

THÈSE PRÉSENTÉE

POUR OBTENIR LE GRADE DE

**DOCTEUR DE  
L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGÉNIEUR (SPI)

SPÉCIALITÉ : MÉCANIQUE

Par **Youssef BENAMA**

---

**FORMALISATION DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION  
D'UN SYSTEME DE PRODUCTION MOBILE : INTEGRATION  
DES CONCEPTS DE MOBILITE ET DE RECONFIGURABILITE**

---

Sous la direction de : Nicolas PERRY (Pr Arts et Métiers Paris Tech)

Encadrement : Thècle ALIX (Mcf Université de Bordeaux)

Soutenue publiquement le 12/02/2016

Membres du jury :

M.B. GRABOT	Professeur des universités, LGIP, ENI Tarbes	Rapporteur
M. E. CAILLAUD	Professeur des universités, ICUBE, Université de Strasbourg	Rapporteur
M. A. BERNARD	Professeur des universités, IRCCYN, Ecole centrale de Nantes	Président
M. B. VALLESPER	Professeur des universités, IMS, Université de Bordeaux	Examineur
Mme. T. ALIX	Maître de conférences, IMS, Université de Bordeaux	Examineur
M. N. PERRY	Professeur des universités, I2M, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. M. COUDRAIS	Responsable recherche et innovation technologiques, ASTF	Invité



# FORMALISATION DE LA DEMARCHE DE CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION MOBILE : INTEGRATION DES CONCEPTS DE MOBILITE ET DE RECONFIGURABILITE.

## Résumé

Le secteur industriel français se trouve en difficulté en raison de l'augmentation simultanée du coût de ses consommations intermédiaires et des coûts salariaux. Ces deux facteurs rendent les entreprises industrielles moins compétitives sur la scène internationale et moins profitables que leurs congénères européennes. Le déficit de la balance commerciale montre à quel point la production industrielle française est en souffrance : peu d'exportations des produits fabriqués par un territoire lui-même peu attractif. Face à ce constat, certaines entreprises ont entrepris de délocaliser leur production et de se rapprocher de leur client final dans l'objectif d'accroître leur marge. Lorsque la production doit prendre place pour un client sur une durée limitée, une solution consiste à rendre le système de production mobile (SPM). Le concept de SPM consiste à mobiliser le même système de production pour satisfaire successivement plusieurs commandes de clients géographiquement dispersés, directement sur le site du client final. Ce concept permet de concilier les objectifs de rentabilité économique de l'entreprise et d'amortissement des moyens de production. Bien que ce concept soit largement étudié dans la littérature, aucune démarche de conception de système de production mobile n'est formalisée dans la littérature.

Dans cette thèse nous analysons dans quelle mesure le concept de mobilité peut être pris en compte dans la démarche d'analyse et de conception de systèmes de production. Notre apport vise à formaliser la démarche d'analyse et de conception de ce dernier, explicitant les décisions à prendre, les informations nécessaires et les critères de décision à mettre en place. Dans cet objectif, deux niveaux d'analyse ont été distingués : un niveau local concernant un site de production et un niveau global comprenant un ensemble de sites.

Le premier niveau local considère un seul site de production. A ce niveau nous avons proposé une approche prenant en compte les caractéristiques du site de production. Dans notre contexte, le choix de la localisation géographique de production est imposé par le client. De ce fait, la conception du système de production doit s'adapter à cette contrainte. D'un point de vue conception, quatre questions sont abordées : **(1)** dans quelle mesure le concept de mobilité peut être intégré dans une démarche de conception de système de production mobile ? **(2)** quelles caractéristiques de l'environnement de production doivent être prises en compte ? **(3)** comment déterminer ce qu'il faut produire sur site ou ce qu'il serait opportun d'externaliser ? et **(4)** compte tenu des informations obtenues quelle est la meilleure configuration du SPM à envisager et selon quels critères de choix ? La réponse à ces questions conduit à la proposition d'une configuration du SPM adaptée pour un seul site de production.

Le deuxième niveau global traite la problématique de mobilité successive multi sites. En effet, pour être rentabilisé le système de production doit être mobilisé sur plusieurs sites de production. A chaque changement de site de production, une reconfiguration du système de production s'impose en se basant sur la configuration existante (version i-1). La

reconfigurabilité concerne d'une part l'architecture interne du système (choix des machines, recrutement de nouvelles équipes locales, etc) et d'autre part l'organisation de la chaîne d'approvisionnement du SPM (faire en interne ou externaliser, fournisseur local, etc.). A ce niveau global d'analyse, nous proposons deux modèles d'analyse : **(1)** un premier modèle pour l'analyse de la reconfigurabilité interne. Ce modèle d'analyse permet d'adapter le nombre de lignes de production et le nombre d'équipes en fonction d'un scénario de demande (localisations géographiques, capacité nécessaire par site). L'originalité de notre proposition consiste d'une part en l'évaluation des coûts de reconfiguration nécessaires et d'autre part l'appréciation du niveau d'adéquation de la configuration proposée avec le contexte du site de production via l'utilisation de l'indicateur de mobilité. **(2)** Le deuxième modèle d'analyse concerne la reconfigurabilité de la chaîne d'approvisionnement amont du SPM. Il consiste en une adaptation du modèle d'aide à la décision "faire ou faire faire" par l'intégration d'un côté de l'importance du site de production et d'un autre côté des spécificités de chaque site de production.

La démarche d'analyse proposée est illustrée sur le cas industriel concernant la conception d'une usine mobile pour la fabrication et l'installation sur site de composants de centrales solaires thermodynamiques.

**Mots clés :**

Système de production mobile, système de production reconfigurable, aide à la décision multicritères, analyse socio-économique et technique, délocalisation de la production.

---

FORMALISATION OF A MOBILE MANUFACTURING SYSTEM DESIGN  
APPROACH : INTEGRATION OF MOBILITY AND RECONFIGURABILITY  
CONCEPTS

**Abstract**

In this thesis we analyse how the concept of mobility can be taken into account in the analysis and design of production systems. Our contribution aims to formalize the analysis and design process, explaining the decisions, the necessary information and decision criteria to be taken into account. For this purpose, two levels of analysis were distinguished: a local level concerning one production site and a global level including a set of sites.

The first level considers one production site. At this level we have proposed an approach that takes into account the characteristics of the production site. In our context, the choice of the geographical location of production is imposed by the final client. Therefore, the design of the production system should be adapted to this constraint. From a design perspective, four questions are addressed: (1) To what extent the concept of mobility can be integrated into a mobile production system design approach? (2) What characteristics of the production environment must be taken into account? (3) How to determine what to produce on site or that it would be appropriate to outsource? And (4) taking into account all obtained information what is the best configuration of the mobile production system to consider and according to

which criteria? The answer to these questions led to the proposal of a configuration of SPM suitable for a single production site.

The second Level of analysis addresses the problem of global mobility. In order to be profitable, the production system must be used on several production locations. every change of production location led to a need of reconfiguration of the Production System. Reconfigurability Concerns the internal architecture of the system (machine selection, recruitment News local teams, etc.) as well as the organization of the SPM supply chain. For this global level, we propose two analytical models: (1) the first model for the analysis of internal reconfigurability. This analysis model is used to adapt the number of production lines and the number of teams according to a production scenario (Geographical locations, necessary capacity per site). The originality of our proposal consists on the assessment of costs to support reconfiguration and the appreciation the convenience level with the context of the production site by using the mobility indicator. (2) Second model to analyse Concerns reconfigurability of the upstream supply chain of PMS. It Consists in June adaptation of the model using the decision "to do ou do" by integrating A side of the importance of the production site and another side Specifics Each of the production site.

The proposed approach is illustrated on an industrial case concerning the design of a mobile manufacturing plant used to produce in-site and Install components of solar plant

**Keywords:**

Mobile production system, reconfigurable manufacturing system, multicriteria aid decision, Technical and socio economic analysis, production delocalization.



## Remerciements

L'aboutissement de ce travail n'aurait pas vu le jour sans la collaboration et l'aide de plusieurs personnes qui d'une façon directe ou indirecte ont contribué à sa concrétisation. Qu'elles trouvent à travers ces quelques lignes l'expression de mes chaleureux remerciements.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma sincère gratitude à mes encadrants de thèse Nicolas Perry et Thècle Alix. Je ne saurais les remercier pour toute l'aide qu'ils m'ont procurée pendant ces quelques années de travail. Je tiens à les remercier pour leurs conseils, leur pédagogie et leur amitié. Leurs deux approches complémentaires ont illuminé ce travail. Je ne pourrai que les encourager à continuer d'encadrer des thèses dans les mêmes conditions.

Ensuite, je souhaite adresser mes sincères remerciements à M. Alain Bernard d'avoir accepté de présider mon jury de thèse, M. Bernard Grabot et M. Emmanuel Cailloux d'avoir rapporté et apporté de précieuses remarques à ce rapport et, M. Bruno Vallespir et M. Michel Coudrais d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens à noter que ce travail a été réalisé dans le cadre du Projet SolR<sup>2</sup>. Je remercie tout d'abord le Conseil de la Région d'Aquitaine pour avoir financé ce projet. Je remercie également l'équipe de l'entreprise ASTF pour leur accueil dans leurs locaux durant la première année et pour tous les échanges qu'on a eus pendant ces années de recherche. Je remercie également l'ensemble des doctorants SolR<sup>2</sup> et leurs encadrants pour les échanges et le travail collaboratif qu'on a eu pendant les réunions académiques.

J'exprime une pensée de gratitude envers mes collègues à l'I2M et l'IMS. Cette aventure a été aussi une expérience humaine très riche. Je tiens à remercier l'ensemble des collègues pour les échanges qu'on a eues. Mes remerciements vont également à l'équipe NWM pour l'aide qu'ils m'ont procurée dans l'impression de ce rapport.

Une pensée particulière pour ma petite famille et mes parents. Je les remercie pour leur soutien et leur amour.





## *Sommaire général*

<b>SOMMAIRE GÉNÉRAL .....</b>	<b>9</b>
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>15</b>
1.1 INTRODUCTION.....	17
1.1 CONTEXTE INDUSTRIEL .....	17
1.2 DEMARCHE DE RECHERCHE.....	18
1.3 LES PROBLEMATIQUES ET VERROUS SCIENTIFIQUES .....	19
1.4 ORGANISATION DU MANUSCRIT.....	20
<b>2 CONCEPTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....</b>	<b>23</b>
2.1 INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 .....	25
2.2 LE SYSTEME DE PRODUCTION .....	25
2.2.1 <i>Les paradigmes des systèmes de production</i> .....	26
2.2.2 <i>Comparaison des paradigmes des systèmes de production</i> .....	30
2.2.3 <i>La nécessité de s'adapter à un environnement changeant</i> .....	31
2.3 LE PROCESSUS DE CONCEPTION ET DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE PRODUCTION .....	34
2.3.1 <i>Le processus de conception : généralités</i> .....	34
2.3.2 <i>Le processus de conception de système de production</i> .....	35
2.3.3 <i>Approches académiques et industrielles de conception</i> .....	40
2.4 APPROCHES DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION.....	40
2.4.1 <i>La conception axiomatique</i> .....	41
2.4.2 <i>L'approche système</i> .....	45
2.4.3 <i>La conception modulaire</i> .....	51
2.4.4 <i>Les démarches de conception de types FBS-PPRE</i> .....	53
2.4.5 <i>Conclusion sur les approches de conception de systèmes de production</i> .....	53
2.5 MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....	54
2.5.1 <i>Intérêt de la modélisation</i> .....	55
2.5.2 <i>Le cadre de Zachman</i> .....	56
2.5.3 <i>CIMOSA</i> .....	57
2.5.4 <i>GRAI-GIM</i> .....	62
2.5.5 <i>PERA</i> .....	64
2.5.6 <i>GERAM</i> .....	65
2.5.7 <i>Bilan des cadres de modélisation</i> .....	68
2.6 LES OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEME DE PRODUCTION .....	68
2.6.1 <i>Problème multi objectifs</i> .....	68
2.6.2 <i>Formalisation de la préférence</i> .....	69
2.6.3 <i>Les méthodes multi critères d'aide à la décision</i> .....	71
2.7 CONCLUSION DU CHAPITRE 2 .....	73
<b>3 LE CONCEPT DE MOBILITE .....</b>	<b>75</b>
3.1 INTRODUCTION.....	77
3.2 LA MOBILITE : GENERALITES .....	77
3.3 LE CONCEPT DE MOBILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....	78
3.3.1 <i>Le concept de mobilité de système de production dans la littérature</i> .....	78
3.3.2 <i>Le besoin de mobilité de système de production</i> .....	86
3.3.3 <i>Les exigences de la mobilité pour un site de production</i> .....	89
3.3.4 <i>Bilan des aspects et contraintes de la mobilité</i> .....	93
3.4 LA CARACTERISATION DE LA MOBILITE DU SPM.....	94

3.4.1	<i>La mesure de la mobilité</i> .....	95
3.4.2	<i>Des indicateurs similaires à l'indice de mobilité</i> .....	96
3.4.3	<i>Bilan des considérations dans l'évaluation de la mobilité</i> .....	97
3.5	<b>PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DU SPM</b> .....	99
3.5.1	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase d'initialisation</i> .....	100
3.5.2	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase préliminaire</i> .....	101
3.5.3	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase de conception architecturale</i> .....	102
3.5.4	<i>Conclusion sur la considération de mobilité dans le processus de conception</i> .....	120
3.6	<b>CONCLUSION DU CHAPITRE 3</b> .....	120
<b>4</b>	<b>EXTENSION DU CADRE DE CONCEPTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION A LA MOBILITÉ</b> .....	<b>123</b>
4.1	<b>INTRODUCTION</b> .....	125
4.2	<b>ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DU SPM EN AMONT DE LA CONCEPTION</b> .....	128
4.2.1	<i>Analyse de l'environnement direct ou micro économique du SPM</i> .....	129
4.2.2	<i>Analyse de l'environnement indirect ou macro-économique du SPM</i> .....	132
4.2.3	<i>Analyse des systèmes contributeurs</i> .....	134
4.3	<b>CONFIGURATION GÉNÉRIQUE DU SPM</b> .....	136
4.4	<b>ANALYSE DE LA STRATÉGIE DE PRODUCTION DANS UN CONTEXTE DE MOBILITE</b> .....	137
4.4.1	<i>Importance de l'analyse de la stratégie de production dans un contexte de mobilité</i> .....	138
4.4.2	<i>Intérêt de l'analyse de la stratégie de production pour la conception de système de production</i> .	139
4.4.3	<i>Faire ou faire faire : l'analyse de l'existant</i> .....	140
4.4.4	<i>Proposition d'un modèle d'aide à la décision adapté pour le contexte du SPM</i> .....	146
4.4.5	<i>Conclusion sur l'analyse de la stratégie de production</i> .....	177
4.5	<b>LA CONCEPTION DE LA CONFIGURATION DU SPM</b> .....	178
4.5.1	<i>La sélection des implantations de système de production dans la littérature</i> .....	180
4.5.2	<i>Démarche de conception de la configuration du SPM adaptée pour un site de production</i> .....	183
4.5.3	<i>Conclusion sur la conception des configurations du SPM</i> .....	210
4.6	<b>CONCLUSION SUR LA L'APPROCHE GÉNÉRALE DE CONCEPTION DE SPM POUR UN SITE DE PRODUCTION</b> 211	
<b>5</b>	<b>INTÉGRATION DE LA MOBILITÉ RÉCURSIVE : SUCCESSIVE MULTI SITE</b> .....	<b>215</b>
5.1	<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE AU CHAPITRE 5</b> .....	219
5.2	<b>D'UNE APPROCHE DE CONCEPTION DU SPM POUR 1 SITE VERS UNE ADAPTATION POUR UN CONTEXTE MULTI SITES</b> .....	220
5.3	<b>LA PRODUCTION SUCCESSIVE MULTI-SITES : CONCEPT ET EXIGENCES</b> .....	224
5.3.1	<i>Les systèmes de production distribués : paradigme et principales tendances</i> .....	224
5.3.2	<i>Les exigences liées à la production mobile successive multi sites.</i> .....	227
5.4	<b>LA PROBLÉMATIQUE DE FAIRE OU FAIRE FAIRE A L'ÉCHELLE MULTI-SITES.</b> .....	229
5.4.1	<i>Les nouvelles exigences d'une mobilité successive multi sites dans l'analyse de la stratégie de production</i> .....	230
5.4.2	<i>Un modèle d'analyse de la décision faire ou faire faire à l'échelle multi sites</i> .....	232
5.4.3	<i>Une chaîne d'approvisionnement reconfigurable</i> .....	234
5.4.4	<i>Conclusion sur la problématique de faire ou faire faire à l'échelle multi-sites.</i> .....	236
5.5	<b>PRISE EN COMPTE DE L'ADEQUATION AU SITE DE PRODUCTIONS DANS LA GESTION DE LA RECONFIGURABILITE DE L'ARCHITECTURE DU SPM</b> .....	237
5.5.1	<i>La gestion de la reconfigurabilité de l'architecture interne du SPM</i> .....	239
5.5.2	<i>Conclusion sur la gestion de la reconfiguration du SPM</i> .....	246
5.6	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE DU CHAPITRE 5</b> .....	247
<b>6</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	<b>249</b>
6.1	<b>CONTEXTE</b> .....	251

6.2	CONTRIBUTIONS .....	251
6.3	APPLICATIONS .....	256
6.4	LIMITES ET PERSPECTIVES.....	256
6.4.1	<i>Limites et Perspectives concernant l'évaluation de la mobilité du système</i> .....	257
6.4.2	<i>Limites et Perspectives concernant la conception du SPM pour un site d'implantation</i> .....	257
6.4.3	<i>Limites et perspectives concernant la conception du SPM dans un contexte de mobilité successive multi sites</i> .....	258
6.4.4	<i>Une ouverture vers les systèmes PSS (Product Service Systems)</i> .....	258
<b>7</b>	<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>261</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCES .....</b>	<b>267</b>
<b>9</b>	<b>LE CAS D'APPLICATION SOLR<sup>2</sup> : UNE USINE MOBILE POUR LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE.....</b>	<b>279</b>
9.1	INTRODUCTION A L'ANNEXE 1 .....	283
9.2	LE PROJET SOLR <sup>2</sup> .....	283
9.2.1	<i>Préambule</i> .....	283
9.2.2	<i>SolR<sup>2</sup> : un projet collaboratif de recherche</i> .....	283
9.2.3	<i>Une usine mobile pour fabriquer sur site et installer des champs solaires</i> .....	284
9.2.4	<i>Justification économique de l'usine mobile</i> .....	285
9.3	CONCEPTION D'UNE USINE MOBILE POUR UN SITE IDENTIFIE.....	286
9.3.1	<i>Le cahier des charges initial</i> .....	286
9.3.2	<i>L'analyse de l'environnement de l'usine mobile (UM)</i> .....	289
9.3.3	<i>Le cahier des charges (CDC_1) de l'UM</i> .....	290
9.3.4	<i>La conception d'une configuration générique du SPM</i> .....	309
9.3.5	<i>L'analyse du faire ou faire faire un cas d'application</i> .....	311
<b>10</b>	<b>VERS UNE INTÉGRATION DU CONCEPT DE MOBILITÉ DU SYSTÈME DE PRODUCTION DANS LES MÉTHODES DE MODÉLISATION EN ENTREPRISE .....</b>	<b>319</b>
10.1	LE BESOIN D'UNE MODELISATION GENERIQUE DU SYSTEME DE PRODUCTION .....	321
10.2	LE CHOIX DU FORMALISME DE MODELISATION .....	322
10.3	VERS UNE PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LES OUTILS DE MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION.....	323
10.3.1	<i>Les phases de vie du SPM</i> .....	324
10.3.2	<i>La modélisation fonctionnelle du SPM</i> .....	325
10.3.3	<i>La modélisation des ressources du SPM</i> .....	326
10.3.4	<i>La modélisation des aspects informationnels du SPM</i> .....	327
10.3.5	<i>La modélisation organisationnelle du SPM</i> .....	331
10.4	CONCLUSION SUR LA PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LA MODELISATION DU SPM .....	332
<b>11</b>	<b>ANNEXES 3.....</b>	<b>334</b>
11.1	ANNEXE 3.1.....	335
11.1.1	<i>La définition des constructs de CIMOSA</i> .....	336
11.1.2	<i>La démarche de choix des méthodes d'aide à la décision (Roy et Słowiński 2013)</i> .....	338
11.2	ANNEXE 3. 3.....	339
11.2.1	<i>Modèles conceptuels des bases de données pour les ressources</i> .....	339
11.2.2	<i>Le continuum d'agrégation</i> .....	340
11.2.3	<i>Les valeurs de pondérations indiquées dans la formule (40) sont obtenues par la méthode AHP.</i> 341	
11.2.4	<i>La matrice de jugement pour l'indicateur d'intégrabilité de module</i> .....	341



## Nomenclature

$ca_{ie}$	Critère d'adaptabilité du nœud d'énergie entre deux modules du SPM
$ca_{ien}$	Critère d'adaptabilité entre la quantité nécessaire et disponible pour chaque source d'énergie
$ca_{ip}$	Critère d'adaptabilité du nœud physique entre deux modules du SPM
$ca_{iph}$	Critère d'adaptabilité de la hauteur de l'interface physique entre deux modules du SPM
$ca_{ipl}$	Critère d'adaptabilité de la largeur de l'interface physique entre deux modules du SPM
$cvdq$	Critère de validation de la disponibilité de qualification nécessaire pour une configuration du SPM
$EPG$	Evaluation de la performance globale
$EPL$	Evaluation de la performance locale
$dfq$	disponibilité des fournisseurs qualifiés pour fournir le SPM en matière première nécessaire
$I_{configuration}$	Indicateur d'intégrabilité d'une configuration du SPM
$I_{M(k)}$	indicateur d'intégrabilité du module $k$
$Im_{SH}$	Indicateur de mobilité du système humain
$I_{surface}$	le critère de surface occupée par une configuration du SPM
$IPC$	Valeur de satisfaction de l'indicateur de performance économique
$IPG$	Indice de performance global d'une configuration du SPM
$IPS$	Valeur de satisfaction de l'indicateur de performance socioéconomique
$IPT$	Valeur de satisfaction de l'indicateur de performance technique
$ISP$	Importances accordées aux sites de production
$k$	indice utilisé localement pour désigner le rang d'un élément dans son ensemble
$Mb$	Module du sous-système bâtiment et infrastructure
$Me$	Module du sous-système d'énergie
$Mh$	Module du sous-système humain
$Mi$	Module du sous-système d'information
$Mm$	Module du sous-système de manutention
$mq_i$	Valeur de satisfaction associée à la disponibilité d'une qualification $i$
$Mt$	Module du sous-système technique du SPM
$n$	Variable utilisée localement pour désigner le nombre d'éléments dans un ensemble
$NC_k$	valeur d'adéquation des interfaces de compétence pour un module $k$ du SPM
$NE_k$	valeur d'adéquation des interfaces d'énergie pour un module $k$ du SPM
$NI_k$	valeur d'adéquation des interfaces d'information pour un module $k$ du SPM
$n_{mod}$	Nombre total de modules contenus dans une configuration du SPM
$nombre_{ligne}$	nombre de lignes de production contenues dans la configuration
$NP_k$	valeur d'adéquation des interfaces physiques pour un module $k$ du SPM
$n_{se}$	le nombre total des modules d'énergie compris dans la configuration du SPM
$n_{si}$	le nombre total des modules d'information compris dans la configuration du SPM
$n_{sm}$	le nombre total des modules de manutention compris dans la configuration du SPM

$n_{st}$	le nombre total des modules techniques compris dans la configuration du SPM
$P_{sp}$	Proximité des fournisseurs du site de production
$qd$	Quantité d'énergie disponible
$qn$	Quantité d'énergie nécessaire
$sca$	Valeur de satisfaction de l'attribut de capacité d'approvisionnement
$scc$	Valeur de satisfaction de l'attribut de capacité de conception
$scf$	Valeur de satisfaction de l'attribut de capacité de fabrication
$sir$	Valeur de satisfaction de l'attribut d'investissement en recherche et développement
$smp$	Valeur de satisfaction de l'attribut de mobilité de process
$snp$	Valeur de satisfaction de l'attribut de taux d'introduction de nouveau produit
$srd$	Valeur de satisfaction de l'attribut de rapidité de développement
$ssi$	Valeur de satisfaction de l'attribut de site d'implantation
$sst$	Valeur de satisfaction de l'attribut de support technique
$surf_{interligne}$	surface prévue entre les lignes de production
$surf_{passages}$	surface prévue pour la circulation des opérateurs
$surf_{se_i}$	la surface occupée par un module d'énergie
$surf_{si_i}$	la surface occupée par un module d'information
$surf_{sm_i}$	la surface occupée par un module de manutention
$surf_{st_i}$	la surface occupée par un module technique
<b><math>ush_{mc}</math></b>	Valeur de satisfaction du coût de mobilisation de la qualification
$ush_{mq}$	Valeur de satisfaction de l'indice de mobilité de la qualification
$vii$	Vecteur d'interface d'information
$vse$	Vecteur sources d'énergie regroupant les différentes sources d'énergie
$vse_{necessaire}$	Vecteur sources d'énergie regroupant les différentes sources d'énergie requises dans une interface
$\omega_{OMR}$	Importance de l'objectif de maîtrise des risques
$\omega_{OTD}$	Importance de l'objectif de performance technico-durable
$\omega_{si}$	Importance du site $i$

---

Chapitre  
1

1 INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE  
INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

---

## *Sommaire du chapitre 1*

---

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION GENERALE : CONTEXTE INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE .....</b>	<b>15</b>
1.1	INTRODUCTION.....	17
1.2	CONTEXTE INDUSTRIEL .....	17
1.3	DEMARCHE DE RECHERCHE.....	18
1.4	LES PROBLEMATIQUES ET VERROUS SCIENTIFIQUES .....	19
1.5	ORGANISATION DU MANUSCRIT.....	20



## 1.1 INTRODUCTION

Les entreprises industrielles font face à un marché de plus en plus changeant et une demande de client d'avantage variable. Dans un environnement concurrentiel, la réduction des coûts, le respect des délais, le maintien de la qualité et la réactivité face aux changements sont des impératifs pour l'entreprise. Dans un tel contexte, assurer les activités de production au plus près du client final est une stratégie permettant d'atteindre ces objectifs. Cependant, lorsque la production doit prendre place pour un client sur une durée limitée, investir dans une usine qui serait abandonnée après la fin de la production n'est pas rentable. Le concept de système de production mobile (SPM) vise alors à concilier les objectifs stratégiques de l'entreprise tout en assurant une rentabilité économique des moyens de production. En effet, le concept de SPM consiste à mobiliser le même système de production pour satisfaire successivement plusieurs commandes de clients géographiquement dispersés, directement sur le site du client final. Par ailleurs, aucune démarche de conception de SPM n'a été formalisée.

Pour concevoir un système de production capable de s'adapter successivement à plusieurs contextes de production, il est nécessaire de comprendre dans quelles mesures le concept de mobilité peut être pris en compte dans la démarche de conception de systèmes de production. Dans cet objectif, nous nous sommes intéressés aux travaux existant dans littérature et sur le cas d'un industriel souhaitant développer une usine mobile.

## 1.1 CONTEXTE INDUSTRIEL

Les travaux de thèse exposés dans ce manuscrit se sont appuyés sur le besoin d'une entreprise industrielle de développer une unité de production mobile. L'industriel conçoit, fabrique et installe des champs solaires thermodynamiques à miroirs de Fresnel, pour le compte d'un client final qui représente le plus souvent un institut public. L'unité de production mobile sera utilisée pour produire et installer localement sur le site du client final, des composants de la centrale solaire. L'idée générale est de concevoir un SPM pour produire et installer des produits en grande série sur le site final du client. A la fin de la production sur un site de production, l'usine mobile est acheminée jusqu'au prochain site de production où un nouveau cycle de production est déclenché. Pour être rentable, le SPM doit être opérationnel et rentabilisé sur au moins 7 sites de production successivement (i.e. site après site). L'industriel exige que le niveau de qualification requise pour l'exploitation du système de production soit faible. En effet, L'entreprise envisage de recruter des opérateurs localement et souhaite minimiser les contraintes de qualification exigée. L'unité de production mobile, telle que spécifiée par le cahier des charges de départ, est composée de deux unités fonctionnelles : (1) une unité de fabrication et d'assemblage des produits sur site et (2) une unité d'installation des produits sur site.

Notre périmètre d'étude se limite à la conception de l'unité de production (fabrication de composants plus assemblages) et exclut l'unité d'installation sur site<sup>1</sup> et la base de vie sur site<sup>2</sup>

Les exigences exprimées initialement par l'industriel pour la conception de l'unité de production mobile concernent :

- *La réduction des coûts* : un faible coût de revient des produits
- *Le respect des délais* : le respect de la cadence nécessaire
- *Le maintien de la qualité* : la qualité des produits à fabriquer doit être assurée pendant 25 ans. Ce qui se traduit pour l'unité de production par une exigence sur les process de fabrication à utiliser.
- *La réactivité face aux changements* : l'adaptabilité au contexte du site de production,
- Un faible niveau de qualification requise pour l'exploitation du système de production.

En guise d'hypothèses de notre raisonnement, nous nous positionnons dans le contexte d'un système de production fabriquant un produit unitaire en grande série avec des commandes par projet, et un client unique par projet. Chaque projet étant réalisé sur une localisation géographique différente.

Dans le but de tenir compte de ces exigences dans la démarche de conception du SPM nous avons mis en place une démarche de recherche.

## 1.2 DEMARCHE DE RECHERCHE

Dans un premier temps, à travers une revue de la littérature, nous nous sommes intéressés d'une manière générale à la conception des systèmes de production. Nous nous sommes posés la question de la définition et de la constitution d'un système de production. Nous nous sommes intéressés aux différentes méthodologies et démarches de conception de systèmes de production, nous conduisant ainsi à la définition d'un processus de conception de système de production. La démarche systémique fournissant des outils et méthodes pour comprendre et analyser le système de production, nous nous sommes intéressés aux techniques de modélisation d'entreprise dans le but de voir comment le système de production peut être représenté et de quels points de vue faut-il disposer pour l'analyser. Le concept de vues de modélisation nous a fourni une base pour analyser notre système de production.

Ensuite, afin d'aborder la particularité de notre sujet de recherche qui est la mobilité, nous nous sommes intéressés au concept de mobilité et plus spécifiquement aux aspects en relation avec la mobilité de système de production. La revue de la littérature nous a aidés à comprendre comment les différents auteurs ont pu analyser le concept de mobilité. Grâce aux travaux conduits dans le cadre du projet suédois, "*Factory-in-box*", nous avons distingué deux

---

<sup>1</sup> L'unité d'installation des produits sur site ne sera pas intégrée dans notre champ d'analyse, car ce n'est pas une particularité de l'usine mobile.

<sup>2</sup> Cette contrainte concerne toutes les composantes du projet global, dans lequel l'usine mobile fait partie. Le découpage global fait que la conception de la base vie sera traitée au niveau du projet global. Néanmoins, le concepteur de l'usine mobile doit spécifier le nombre de ressources humaines concernées.

formes de mobilité : la mobilité de modules et la mobilité du système entier. Quelques exigences de la mobilité ont été identifiées à cette occasion telle que la nécessité de considérer d'autres phases de vie opérationnelles et de considérer la dépendance au système humain qui interviendra sur le système. Nous nous sommes également intéressés au paradigme des systèmes de production reconfigurables puisque la mobilité, en l'occurrence celle des modules, est considérée comme une de leurs caractéristiques. Cependant, la vision holistique du système de production nous manquait car les travaux exposés dans la littérature s'intéressent essentiellement aux problématiques de gestion de quelques modules (machines, moyens de manutention) qui doivent être rendus mobiles pour s'intégrer dans un système existant.

Cette revue de la littérature nous a donc permis de comprendre comment aborder un système de production (classique) et considérer quelques spécificités du concept de mobilité et des systèmes de production reconfigurables. Le cas industriel nous a permis de compléter cette liste de spécificités du SPM et d'intégrer :

- Le besoin de formaliser une démarche de conception du SPM en partant uniquement des spécifications du cahier des charges, où aucune version antérieure du système n'existe.
- Le besoin d'adopter une vision holistique du système de production en intégrant tous ses sous-systèmes et composants, notamment le système humain avec une forte contrainte concernant la prise en compte du niveau de qualification.
- Le besoin de considérer une mobilité successive multi-sites du système de production qui implique de considérer les contraintes de chaque site mais aussi évaluer des performances du système de production au niveau de chaque site puis au niveau d'un ensemble des sites.
- Enfin la question s'est posée de ce qu'il fallait produire localement sur site ou externaliser. Dû à la complexité de cette décision augmentée par le contexte de mobilité, le besoin de formaliser une démarche d'analyse multicritères et aide à la décision a émergé.

En se basant sur la compréhension acquise grâce à la revue de la littérature des systèmes de production et du concept de mobilité, complétée par les points soulevés dans le cas d'étude industriel, nous avons identifié nos problématiques de recherche.

### 1.3 LES PROBLEMATIQUES ET VEROUS SCIENTIFIQUES

D'un point de vue scientifique, la conception de SPM rencontre plusieurs verrous scientifiques:

1 *QR 1 : Dans quelle mesure le concept de mobilité peut être intégré dans une démarche de conception de système de production?*

Plusieurs sous questions en découlent :

1.1 QR 1.1 : Comment formaliser une démarche de conception de système de production ?

- 1.2 QR 1.2 : Quelles analyses faudrait-il conduire en amont de la conception ?
- 1.3 QR 1.3 : Quelles sont les exigences de la mobilité ?
- 1.4 QR 1.4 : Comment le concept de mobilité peut être considéré le long du processus de conception de système de production ?
- 1.5 QR 1.5 : Comment formaliser la décision de faire ou faire faire dans un contexte de mobilité du système de production ?
- 1.6 QR 1.6 Comment générer la configuration optimale du SPM ?
- 2 *QR 2 : Dans quelle mesure le concept de mobilité successive multi sites du système de production peut être intégré dans la démarche d'analyse du système de production?*
  - 2.1 QR 2.1 : Quelles sont les nouvelles exigences de la mobilité successive multi sites?
  - 2.2 QR 2.2 : Comment gérer le besoin de reconfigurabilité du SPM pour un scénario de production défini?
  - 2.3 QR 2.3 : Comment gérer le besoin de reconfigurabilité de la chaîne logistique amont du SPM.

Pour lever ces verrous, nous avons mis en place une démarche scindée en deux étapes:

- dans un premier temps, il conviendra de formaliser une démarche de conception de SPM pour un site spécifique de production.
- Puis, itérer pour intégrer la mobilité du système de production d'un site à l'autre sur plusieurs cycles successivement.

Bien que la mobilité du système de production sur plusieurs sites soit une contrainte forte pour la conception du SPM, les informations nécessaires ne sont pas toutes disponibles pour tous les sites d'implantation envisagés. La considération de la problématique de mobilité en deux temps a été nécessaire car :

- en l'absence d'une vision long terme sur plusieurs sites, il est nécessaire de fixer un premier périmètre pour aboutir à la définition d'une solution du SPM. D'où le besoin de considérer un seul site dans un premier temps.
- Ensuite ces solutions envisagées peuvent être améliorées pour intégrer les contraintes de mobilité sur plusieurs successivement, en proposant d'adapter la configuration existante.

## 1.4 ORGANISATION DU MANUSCRIT

La suite de ce manuscrit est organisée en quatre chapitres. La figure 1-1 reprend la démarche proposée dans ce manuscrit.

Le chapitre 2 permet de poser les bases de la conception d'un système de production en général. Dans ce chapitre essentiellement basé sur une revue de la littérature, nous nous questionnerons sur la définition du système de production et des sous-systèmes qui le constituent. Nous nous intéressons ensuite au processus de conception des systèmes de

production. La modélisation d'entreprise nous permet de poser le cadre du système à concevoir et de définir les vues nécessaires pour représenter le système à faire.

Le chapitre 3 aborde le concept de mobilité. Partant d'un cadre général, notre focus portera spécifiquement sur la mobilité du système de production. Nous analysons les contextes justifiant le recours aux SPMs puis, nous examinons les exigences liées à la mobilité et les éléments qu'il faut considérer dans le processus de conception d'un SPM. Ayant posé un cadre pour la définition de la mobilité des systèmes de production, nous nous intéressons à analyser comment la mobilité peut être considérée durant chaque phase du processus de conception du système de production. Cette analyse nous conduit à formaliser un indicateur pour apprécier la mobilité d'un système de production.

En se basant sur le processus de conception défini dans le chapitre 2 et les exigences de mobilité définies dans le chapitre 3, le chapitre 4 vise à formaliser une démarche d'analyse et de conception de SPM. Dans un premier temps, pour caractériser l'environnement du site de production une analyse macro et micro économique est suggérée. Ensuite, on se pose la question de ce qu'il faut produire sur site et ce qu'il est nécessaire d'externaliser. La conception du SPM va considérer uniquement les moyens nécessaires pour produire sur site. Puis, une démarche est proposée pour la génération et de choix de la configuration optimale pour un contexte de site de production donnée.

Enfin le chapitre 5 propose une extension de la démarche proposée pour prendre en compte l'aspect de mobilité successive multi-sites. La première partie de ce chapitre focalise sur la définition et la spécification du concept de mobilité successive multi-sites. La deuxième partie focalise sur la gestion de la reconfigurabilité qui elle est considérée selon deux niveaux : une reconfigurabilité de l'architecture interne du SPM et une reconfigurabilité de la chaîne d'approvisionnement du SPM.

L'approche de conception discutée dans ce manuscrit a pour objectif d'aboutir à la définition d'un SPM (le résultat de la conception) qui servira pour la production d'un produit destiné à un client final. Une confusion peut toutefois subsister entre ces deux éléments (le système à concevoir et le produit final). Dans un souci de clarté, le résultat de la conception sera appelé SPM ou système alors que le terme de produit ou produit final désignera le produit final destiné au client qui est fabriqué par le SPM.

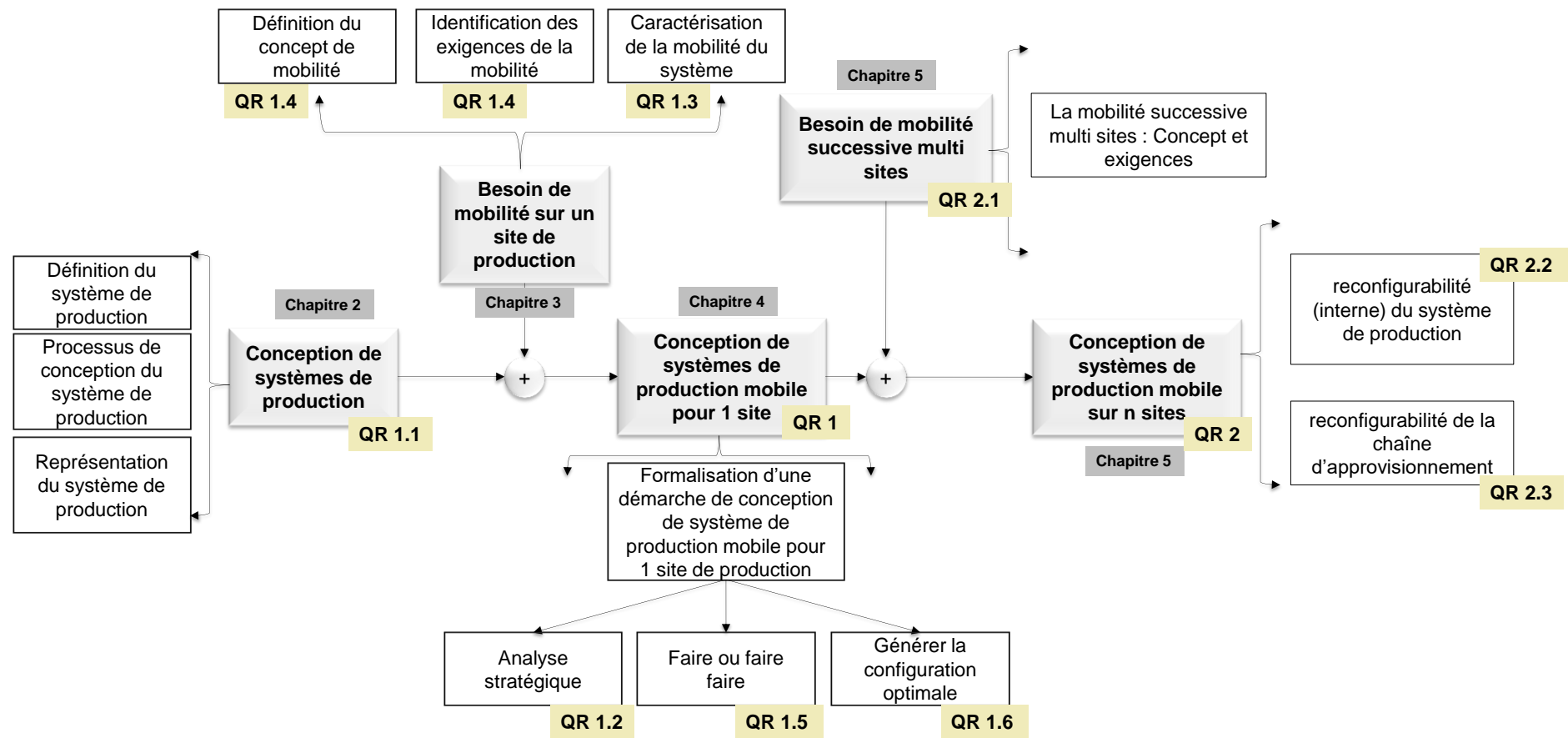


Figure 1-1 schéma de lecture du manuscrit

---

Chapitre  
2

---

2 CONCEPTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

---

## Sommaire du chapitre 2

---

<b>2</b>	<b>CONCEPTION DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....</b>	<b>23</b>
2.1	INTRODUCTION AU CHAPITRE 2 .....	25
2.2	LE SYSTEME DE PRODUCTION .....	25
2.2.1	<i>Les paradigmes des systèmes de production .....</i>	26
2.2.2	<i>Comparaison des paradigmes des systèmes de production.....</i>	30
2.2.3	<i>La nécessité de s'adapter à un environnement changeant.....</i>	31
2.3	LE PROCESSUS DE CONCEPTION ET DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE PRODUCTION .....	34
2.3.1	<i>Le processus de conception : généralités.....</i>	34
2.3.2	<i>Le processus de conception de système de production.....</i>	35
2.3.3	<i>Approches académiques et industrielles de conception .....</i>	40
2.4	APPROCHES DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION .....	40
2.4.1	<i>La conception axiomatique .....</i>	41
2.4.2	<i>L'approche système .....</i>	45
2.4.3	<i>La conception modulaire.....</i>	51
2.4.4	<i>Les démarches de conception de types FBS-PPRE.....</i>	53
2.4.5	<i>Conclusion sur les approches de conception de systèmes de production.....</i>	53
2.5	MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....	54
2.5.1	<i>Intérêt de la modélisation.....</i>	55
2.5.2	<i>Le cadre de Zachman .....</i>	56
2.5.3	<i>CIMOSA .....</i>	57
2.5.4	<i>GRAI-GIM.....</i>	62
2.5.5	<i>PERA .....</i>	64
2.5.6	<i>GERAM.....</i>	65
2.5.7	<i>Bilan des cadres de modélisation.....</i>	68
2.6	LES OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEME DE PRODUCTION .....	68
2.6.1	<i>Problème multi objectifs.....</i>	68
2.6.2	<i>Formalisation de la préférence .....</i>	69
2.6.3	<i>Les méthodes multi critères d'aide à la décision .....</i>	71
2.7	CONCLUSION DU CHAPITRE 2 .....	73



## 2.1 INTRODUCTION AU CHAPITRE 2

Dans ce chapitre, nous étudions les différents travaux effectués dans les domaines abordés par notre problématique. La nécessité de formaliser la phase de conception du système de production, nous incite d'abord à nous intéresser aux systèmes de production en général et à leurs différents paradigmes. L'objectif est de comprendre les différentes typologies existantes ainsi que les caractéristiques dont il faut tenir compte dans la conception de tels systèmes. Comme le soulignent Pahl et al. (2007), un processus de conception est fondamentalement un processus de recherche de solutions. Plusieurs aspects doivent être adressés qui sont relatifs à la spécification des besoins, à la recherche de solutions, à l'évaluation des solutions disponibles et à la sélection de la meilleure solution. Il est important de comprendre ces différentes étapes qui jalonnent le processus de conception afin de concevoir un système de production.

Comme le préconise la démarche d'analyse fonctionnelle ou d'approche système, il faut étendre l'analyse du système à l'analyse de son environnement. Cette analyse de l'environnement permet de comprendre quels services et contraintes le système doit rendre ou subir durant son cycle de vie.

En résumé, ce chapitre a pour objectif de répondre aux deux questions suivantes:

QR 1.1 : Comment formaliser la démarche de conception d'un système de production ?

QR 1.2 : Quelles analyses faut-il conduire en amont de la conception ?

## 2.2 LE SYSTEME DE PRODUCTION

Un système est une collection d'un ensemble d'éléments (hommes, machines, méthodes) dont la synergie est organisée pour répondre à une finalité dans un environnement donné (Fiorèse and Meinadier, 2012). Le terme de production est dérivé du Latin *pro ducere* qui signifie action de créer ou d'engendrer (CNRTL). La production ou production manufacturière (terme utilisé par CIRP<sup>3</sup>) représente l'ensemble des actions et processus (ou une série coordonnée d'actions et processus) organisés dans le but de créer physiquement un produit à partir de ces constituants matériels (Chisholm, 1990).

***Un système de production représente l'ensemble des ressources (hommes, machines, méthodes et processus) dont la synergie est organisée pour transformer de la matière première (ou composants) dans le but de créer un produit ou un service***

<sup>3</sup>CIRP=Collège International pour la Recherche en Productique

La fabrication concerne toutes les activités au sein d'une entreprise qui englobe la conception, l'approvisionnement de matière, la planification et production, l'assurance qualité, la gestion et le marketing. De fait, l'activité de fabrication (manufacturing) est considérée comme étant hiérarchiquement supérieure à l'activité de production (Bellgran and Sèafsten, 2010). Un système de production est alors considéré comme une partie du système manufacturier/de fabrication comme le montre la figure 2-1.

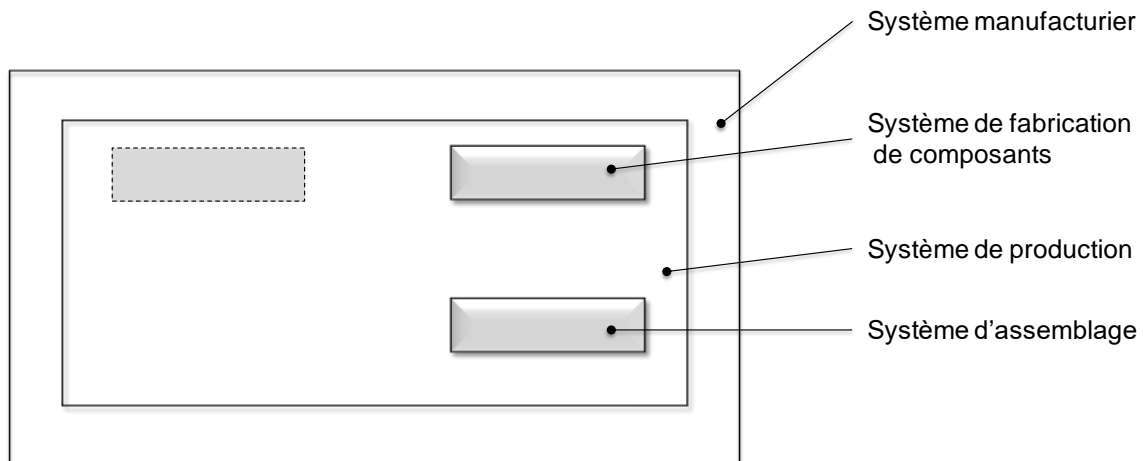


Figure 2-1 Représentation hiérarchique du système de production (Bellgran and Sèafsten 2010)

Nous nous intéressons à l'évolution des systèmes de production pour comprendre les particularités de chacun des trois paradigmes les plus importants, à savoir les systèmes de production dédiés, flexibles et reconfigurables. Ensuite, nous proposons une analyse comparative de ces paradigmes. Puis nous identifions les facteurs d'environnement appelant à une nécessité d'adaptation dans la structure du système de production.

## 2.2.1 LES PARADIGMES DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Nous nous intéressons aux trois paradigmes les plus communs : les systèmes de production dédiés (lignes de transfert), les systèmes de production flexibles et enfin les systèmes de production reconfigurables.

### 2.2.1.1 LES SYSTEMES DE PRODUCTION DEDIES (DML<sup>4</sup>)

L'invention des lignes de production dédiées, aussi appelées lignes de transfert, a facilité le paradigme de production de masse. Chaque ligne est conçue pour produire une seule pièce à un taux de production élevé en utilisant tous les outils simultanément. Les lignes de transfert sont économiquement fiables si elles sont utilisées le plus longtemps possible à capacité maximale. Du moment où les volumes de production sont élevés, les coûts par unité produite sont relativement minimisés (Koren, 2006). Toutefois, dans un contexte caractérisé par une compétitivité globale et une saturation mondiale, les DMLs ne sont pas pleinement exploités, ce qui engendre des pertes (Koren, 2006). Une étude dans le secteur automobile, a montré que le taux d'occupation des lignes de transfert est proche de 53% (Tolio et al., 1998).

<sup>4</sup> Dedicated Manufacturing lines

### 2.2.1.2 LES SYSTEMES DE PRODUCTION FLEXIBLES (FMS<sup>5</sup>)

L'ère des années 80 témoigne d'une évolution du besoin des consommateurs. On passe d'un besoin de production de masse à un besoin de personnalisation de masse. La nécessité d'avoir des systèmes de production réactifs et flexibles est alors apparue. Le concept de systèmes de production flexibles a été introduit en réponse au besoin de personnalisation de masse et pour fournir une grande réactivité dans les changements de produits (ElMaraghy, 2006). Dans la période 1980 - 1990 les objectifs stratégiques des entreprises étaient : productivité, qualité et flexibilité. Les FMS se basent sur des machines à commandes numériques ainsi que d'autres machines robotisés qui permettent de produire, en moyenne série, une variété de produits avec le même système (Stecke, 1983). Il y a un glissement de la ligne de production vers les îlots flexibles de production. L'acquisition de ces machines présente un coût important. A cause des investissements initiaux élevés, il a fallu presque 20 ans pour que ces systèmes pénètrent l'industrie automobile qui représentait en 2010 le plus gros marché des FMS (Koren and Shpitalni, 2010).

Une revue de la littérature permet de classer 10 types de flexibilité du système de production (ElMaraghy, 2006). Le tableau 2-1 en expose une synthèse. Cette classification permet de comprendre les différents types de flexibilité. Cependant plusieurs d'entre elles sont inter-reliées. Il est à noter que la définition de "*flexibilité d'extensibilité*" est consistante avec la définition courante de la reconfigurabilité du système de production, présentée dans la section suivante.

Tableau 2-1 différents types de flexibilité du système de production (ElMaraghy, 2006)

Type de flexibilité	Description
<b>Flexibilité de machine</b>	Les différentes opération effectuées sans changement de la configuration de la machine,
<b>Flexibilité de moyen de manutention</b>	Nombre de parcours utilisés/ nombre total de parcours possibles entre toutes les machines,
<b>Flexibilité des opérations</b>	Nombre des différents plans de réalisation disponibles pour la fabrication d'une pièce,
<b>Flexibilité des processus</b>	Ensemble des types de pièces qui peuvent être produites sans nécessiter de changements majeures,
<b>Flexibilité de routage</b>	Facilité, en terme de coût et délai, d'introduction d'une nouvelle pièce parmi un mix de pièces existant,
<b>Flexibilité des volumes</b>	Aptitude de varier , avec une efficacité économique, le volume de production en respectant la capacité du système
<b>Flexibilité d'extensibilité</b>	Facilité, en terme de coût et délai, d'adapter quand il est nécessaire la capacité ou la capabilité du système en apportant des changements physiques au système.
<b>Flexibilité du programme de contrôle</b>	Aptitude du système de s'exécuter virtuellement sans interruption grâce à la disponibilité de machines intelligentes et des logiciels de contrôle du système.
<b>Flexibilité de la production</b>	Nombre de toutes les pièces qui peuvent être produites sans ajout majeur d'équipement

<sup>5</sup> Flexible manufacturing system : terme utilisé en anglais pour désigner les systèmes de production flexibles

Dans le milieu des années 1990 la compétitivité mondiale a prouvé que les FMS ne représentaient qu'une solution économique partielle face à un marché compétitif (Koren and Shpitalni, 2010). Quand la demande fluctue, l'objectif stratégique d'une entreprise est de répondre à cette fluctuation via l'adaptation de son outil de production. Cela peut être accompli par l'extensibilité de la structure physique du système. Mais les modifications physiques dans la structure des FMS ne garantissent pas une fiabilité économique (Koren and Shpitalni, 2010). La structure en série d'un système FMS facilitait les modifications dans les produits fabriqués, mais conduisait à un ralentissement du taux de production et n'assurait pas la flexibilité dans le volume pour faire face à des changements imprévus dans la demande.

Pour rester compétitives, les entreprises manufacturières ont dû s'adapter et utiliser des outils qui non seulement permettaient de fabriquer des produits avec une grande productivité, mais également de réagir, d'une manière efficace et économique, aux évolutions du marché et des besoins de leurs clients (Koren, 2006). Les systèmes de production reconfigurables furent alors proposés comme une solution offrant cette capacité.

### 2.2.1.3 LES SYSTEMES DE PRODUCTION RECONFIGURABLES (RMS<sup>6</sup>)

Le concept de reconfigurabilité a été proposé en 1995 par l'université du Michigan (Koren et al., 1999). Le système de production reconfigurable est conçu dès le départ avec la possibilité de modifier sa structure dans le but d'ajuster rapidement sa capacité et ainsi de s'adapter à des fluctuations de volume et d'ajuster rapidement sa capacité afin de s'adapter à de nouveaux produits<sup>7</sup> (ElMaraghy, 2006; Koren et al., 1999). Un système RMS est installé initialement avec la capacité et les fonctionnalités juste nécessaires et peut, si besoin est, ajuster dans le futur sa structure pour s'adapter aux évolutions des exigences du marché (Koren et al., 1999). Ceci permet de minimiser le besoin en investissement initial.

A la différence d'un FMS, le focus de flexibilité d'un RMS est limité et porte sur une famille de produits. La reconfigurabilité concerne aussi bien la structure physique du système de production que sa structure logique. Pour être reconfigurable, un système de production doit posséder certaines caractéristiques clés (Koren et al., 1999), qui incluent :

- *La modularité* de tous les composants du système RMS. L'utilisation de composants modulaires facilite leur reconfiguration, maintenance ou remplacement.
- *L'intégrabilité* par l'utilisation de composants conçus avec des interfaces standards (mécanique, informationnels et de contrôles) afin de faciliter l'intégration rapide des composants modulaires et interchangeables. L'intégrabilité concerne aussi bien des composants physiques (machines, outils, etc.) que des composants logiques (logiciels, algorithmes de contrôle, etc.).
- *La personnalisation* concerne l'incorporation d'une flexibilité limitée à une famille de produits. Ceci permet d'avoir une flexibilité personnalisée se différenciant ainsi des DMLs et FMSs.

<sup>6</sup> RMS : Reconfigurable Manufacturing System

<sup>7</sup> En cas de variété de produits ou introduction de nouveaux produits.

- *L'extensibilité* définit l'aptitude du système à modifier facilement sa capacité de production par l'ajout ou suppression de ressources (e.g. machines) ou par le remplacement de composants du système. L'ajout peut concerner des équipements identiques ou des équipements similaires (Putnik et al., 2013).
- *La convertibilité* correspond à la faculté de transformer facilement les fonctionnalités du système pour satisfaire de nouvelles exigences de production (Maler-Speredelozzi et al., 2003).
- *La diagnosticabilité* détermine l'aptitude du système à analyser sa situation actuelle pour diagnostiquer rapidement les sources des défaillances et corriger rapidement les défauts opérationnels (Koren and Shpitalni, 2010). Partant du principe que le système RMS, pendant son cycle de vie est sujet à plusieurs reconfigurations qui nécessitent à chaque fois des phases de mises en service et de montée en cadence, la remise en service du système doit être rapide. La caractéristique de diagnosticabilité est nécessaire puisqu'elle permet d'identifier et corriger rapidement les problèmes qui peuvent avoir lieu pendant cette phase de mise en service, ce qui accélérera la montée en cadence du système.
- *La mobilité* définit la facilité de déplacement de certains équipements (en utilisant des roues par exemple) à l'intérieur du système de production afin de faciliter sa réorganisation (ElMaraghy, 2006).
- *L'automatisabilité* définit la capacité du système à changer le degré d'automatisation de ses opérations. En fonction de certains facteurs tels le taux de production ou le niveau de salaires, le système doit permettre l'adaptation du degré d'opérations manuelles ou automatisées (ElMaraghy and Wiendahl, 2009). Ce changement de niveaux d'automatisation peut être illustré par le remplacement d'une station manuelle par une cellule robotisée dans le but de s'adapter à une augmentation de volume de production, par exemple. Cette caractéristique d'automatisabilité concerne principalement les systèmes d'assemblage (ElMaraghy and Wiendahl, 2009).

Les relations entre les caractéristiques de reconfigurabilité et les conditions nécessaires pour atteindre la reconfigurabilité ont été décrites en 4 propositions (Koren, 2006) :

- Un système qui incorpore les caractéristiques de personnalisation et d'extensibilité est considéré comme un RMS
- Un système qui possède les caractéristiques de personnalisation et de convertibilité est considéré comme un RMS
- Un système de production qui possède les caractéristiques de modularité et d'intégrabilité est susceptible d'être un RMS. En effet, la modularité peut faciliter la modification des capacités ou fonctionnalités du système, mais elle ne fournit pas une garantie de ces modifications.
- Les caractéristiques de modularité, intégrabilité et diagnosticabilité participent à la réduction du temps de reconfiguration et de montée en cadence.

De cette analyse, on peut observer que toutes les caractéristiques n'ont pas le même degré d'impact sur la reconfigurabilité du système. Les caractéristiques de personnalisation,

extensibilité et convertibilité peuvent être considérées comme des caractéristiques critiques et nécessaires pour la reconfigurabilité (Koren and Shpitalni, 2010). Les caractéristiques de modularité, intégrabilité et de diagnosticabilité sont des facilitateurs pour la reconfigurabilité et permettent de supporter les autres caractéristiques qui sont, elles, nécessaires. Toutefois une ambiguïté persiste sur le rôle de la mobilité et de l'automatisabilité, Rösiö (2012) propose de catégoriser l'automatisabilité comme une caractéristique critique pour la reconfigurabilité.

## 2.2.2 COMPARAISON DES PARADIGMES DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Les trois paradigmes, DML, FMS et RMS peuvent être comparés selon trois critères (Koren and Shpitalni, 2010) : capacité, fonctionnalité et coût. La capacité "s'entend par 'la capacité à faire' ou la 'capacité de faire'" (Fiorèse and Meinadier, 2012). Dans notre contexte, on définit la capacité comme la cadence nécessaire pour répondre à la demande du client (en terme de volume de production) dans les délais prescrits. La fonctionnalité renseigne sur l'aptitude du système à exécuter l'ensemble des opérations nécessaires à la fabrication d'un ou plusieurs produits (familles de produits).

### 2.2.2.1 COMPARAISON D'UN POINT DE VUE CAPACITE-FONCTIONNALITE

Les DML et FMS sont des systèmes statiques. Les DML sont conçus pour produire un produit avec un taux élevé de production. Les FMS peuvent produire plusieurs produits, mais à cause de leur coût élevé, ils sont conçus pour des basses capacités. Les RMS sont des systèmes dynamiques et évolutifs, dont la capacité et la fonctionnalité évoluent dans le temps suivant la demande (Koren, 2002). La figure 2-2 illustre une comparaison des trois paradigmes sur la base de critères de fonctionnalité (familles de produit) et capacité (volume de production).

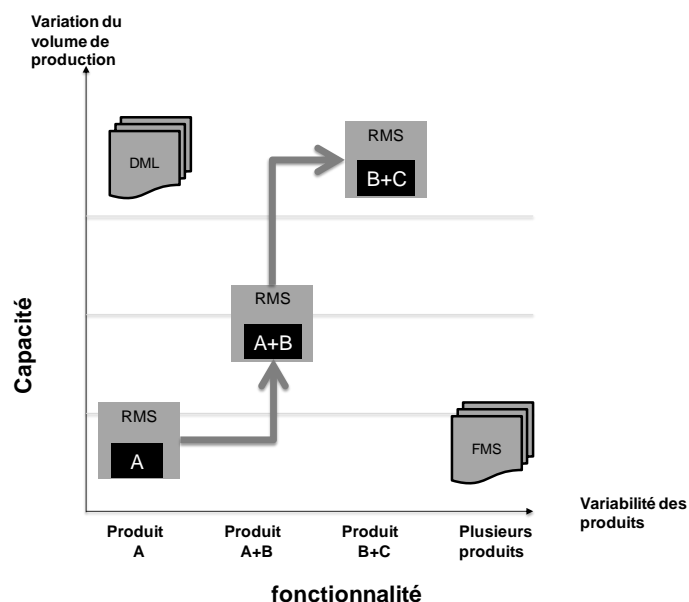


Figure 2-2 comparaison des trois paradigmes de systèmes de production d'un point de vue capacité et fonctionnalité (Koren, 2006)

### 2.2.2.2 COMPARAISON D'UN POINT DE VUE CAPACITE-COUT

En considérant le coût du système en fonction de sa capacité, les systèmes DML présentent des coûts constants jusqu'à atteindre la capacité maximale du système. Au-delà de la capacité maximale, une ligne de production entière doit être rajoutée. La capacité des systèmes FMS est extensible à des taux constants (ajout d'une nouvelle machine en parallèle). Mais le coût initial d'un système FMS est élevé. Les systèmes RMS sont pour leur part extensibles, mais à des ratios variant, en fonction de l'investissement initial et de la demande du marché. (Koren and Shpitalni, 2010).

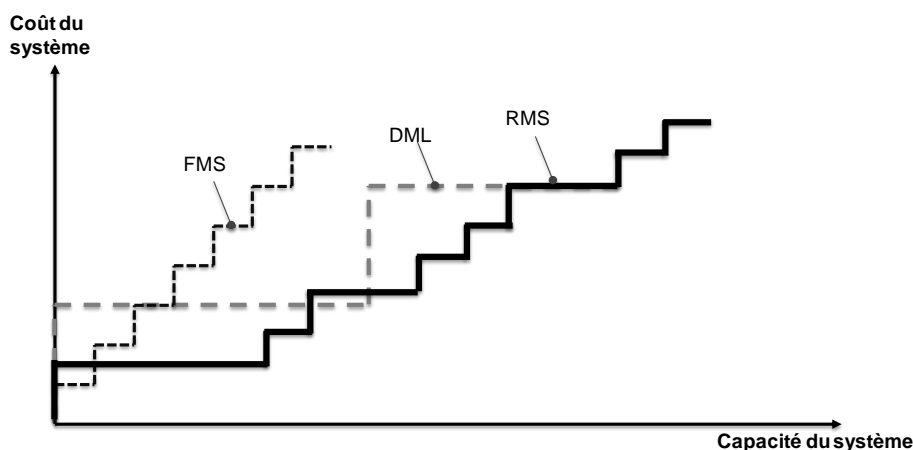


Figure 2-3 comparaison des différents paradigmes en considérant les coûts et la capacité du système

Face à un changement de son environnement, l'aptitude de réactivité d'une organisation, via l'adaptation de son système de production est présentée de plus en plus comme un atout stratégique. Le niveau de réactivité nécessaire dépend de la nature du changement et des facteurs introduisant ce changement. Le paragraphe suivant a pour objectif de discuter les différents facteurs de changement qui peuvent impacter une entreprise.

### 2.2.3 LA NECESSITE DE S'ADAPTER A UN ENVIRONNEMENT CHANGEANT

Afin de s'adapter à un marché turbulent, les entreprises industrielles doivent comprendre et cerner les principaux facteurs qui déclenchent des changements dans leur environnement et nécessitent une adaptation de leurs systèmes de production. Plusieurs facteurs ont été identifiés dans la littérature comme des facteurs inducteurs de changement (Wiendahl et al., 2007) :

- (1) La volatilité de la demande qui peut être mesurée par la fluctuation des volumes.
- (2) La variété des produits en terme de nombre de variantes obtenus par modification de taille, changement de matériaux ou ajout de nouveaux éléments.
- (3) De nouvelles technologies qui peuvent être liées soit au produit soit aux procédés.
- (4) Une nouvelle stratégie d'entreprise pour se positionner sur de nouveaux marchés, acheter ou vendre une nouvelle gamme de produits, lancer un nouveau programme, etc.

(5) Lorsqu'une entreprise se positionne sur un nouveau marché, elle peut choisir d'installer ses moyens de production au plus proche de ses clients, ce qui nécessite un changement de localisation géographique pour le système de production. ElMaraghy introduit la nécessité de changement de localisation géographique comme un nouveau défi pour les systèmes de production, dû à la mondialisation (ElMaraghy, 2006). Les systèmes de production doivent non seulement avoir l'aptitude de se transformer rapidement pour s'adapter à des nouvelles technologies ou de nouvelles demandes, mais ils doivent en plus adapter leurs équipements et mêmes leurs localisations<sup>8</sup> (ElMaraghy, 2006). Le système de production peut être amené à changer de localisation géographique plusieurs fois pendant le cycle de vie d'un produit. Ce changement de localisation peut être motivé par des facteurs d'ordre stratégique (nouvelle stratégie, nouveau marché), économique (être proche des clients pour minimiser les coûts de logistiques) ou socio-environnemental (développement local d'une région) (Fox, 2015; Stillström and Jackson, 2007). Quoique le changement de localisation géographique n'est pas un inducteur primaire de changement puisque lui-même est la conséquence d'autres facteurs, lorsqu'il est vrai il appelle à une nécessité d'adaptation du système de production au regard des caractéristiques du nouveau site de production.

L'impact de ces inducteurs de changement peut s'étendre soit à l'intérieur d'une entreprise soit à l'extérieur. L'impact interne peut concerner la performance de l'entreprise en terme de rentabilité par exemple et dont l'effet peut remettre en question l'organisation interne. Quant à la portée externe du changement, elle peut concerner la valeur ajoutée pour les clients en terme de réduction du coût de cycle de vie par exemple (Wiendahl et al., 2007) ou peut avoir un impact sur l'organisation de la chaîne d'approvisionnement et les relations avec les fournisseurs.

La stratégie pour faire face à un changement peut varier selon les objectifs visés. Trois cas de figure peuvent être distingués (Gerwin, 1993; Wiendahl et al., 2007):

- L'entreprise peut avoir une stratégie réactive qui vise uniquement à satisfaire le besoin du changement immédiat, et qui porte uniquement sur le plan opérationnel avec une adaptation des installations ou processus concernés.
- L'entreprise peut adopter une stratégie proactive qui, au-delà de répondre aux changements présents, anticipe ceux qui peuvent avoir lieu dans un avenir proche.
- Enfin, l'entreprise peut avoir aussi la possibilité de mener des investissements stratégiques pour espérer à des avantages compétitifs à plus long terme.

La stratégie d'action face à un changement permet de spécifier les caractéristiques du changement en terme de : partie de l'usine impactée, durée du changement, fréquences d'occurrence du changement, effort nécessaire pour agir, de caractérisation de cet effort sur les équipements nécessaires, le nombre de personnes à mobiliser, les savoirs requis ainsi que le temps pour s'adapter.

Dans le but de limiter les changements dans la conception de tout le système de production, les composants du système qui subissent un changement durant le cycle de vie du système

---

<sup>8</sup> du système de production



doivent être identifiés en fonction des facteurs induisant les changements (Schuh et al., 2009). Ces éléments qui sont sujets aux changements peuvent être des produits, des processus, des équipements et installations, ou même l'organisation (Wiendahl et al., 2007). Les éléments du système dont le changement dépend souvent des mêmes facteurs de changement doivent être identifiés (les variables du système) et, dans la mesure du possible, regroupés dans les mêmes modules. Les éléments qui restent invariables, ou qui changent pour des raisons différentes doivent être séparés. L'identification des éléments variables et invariables du système facilite la gestion des modifications dans le système dans la mesure où seuls les éléments qui nécessitent d'être adaptés, sont identifiés et remplacés ou mis à niveau.

Une fois les modifications mises en place, il est nécessaire d'évaluer l'impact de ces changements sur la performance du système. Cette mesure de performance peut s'appuyer sur des indicateurs tels que: les délais de livraisons, les niveaux de stocks, les durées d'approvisionnement, les frais généraux, etc. (Wiendahl et al., 2007).

La figure 2-4 permet d'illustrer cette logique de gestion du changement.

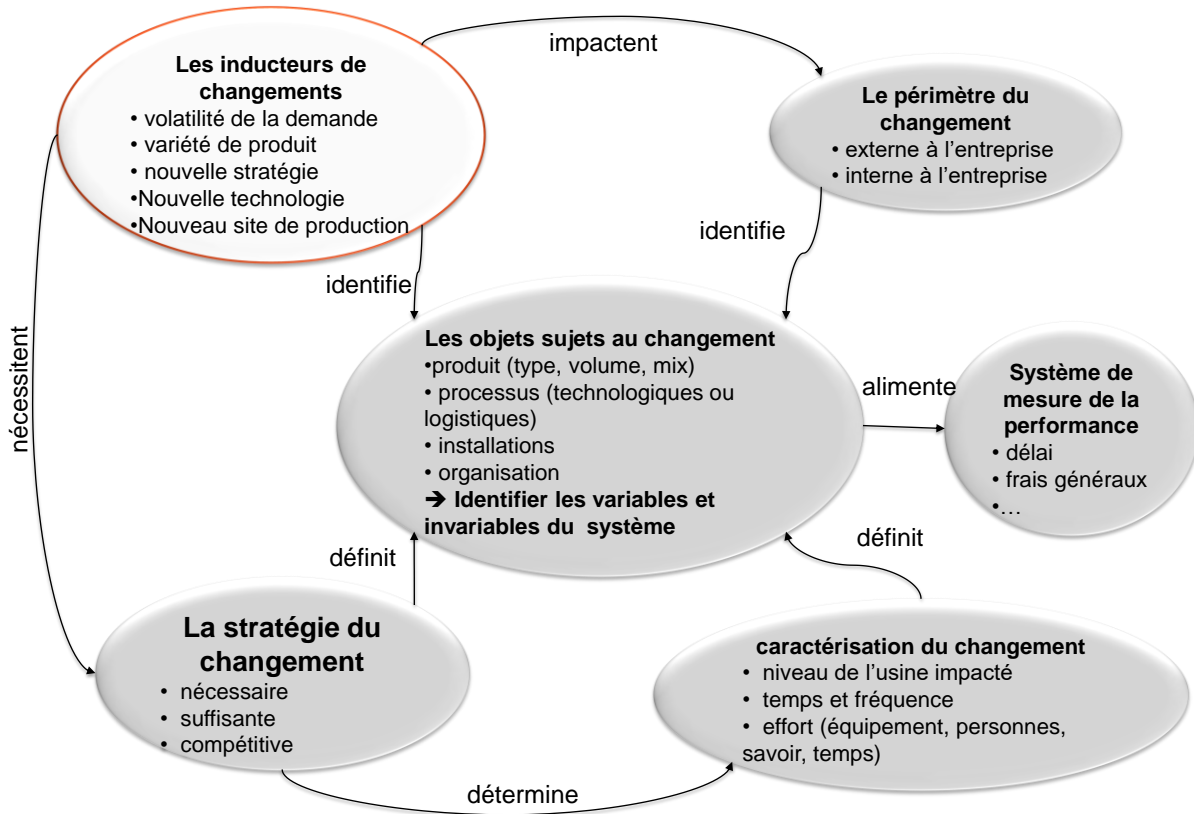


Figure 2-4 démarche de gestion des changements, adaptée de (Wiendahl et al., 2007).

Il faut, dès la phase de conception du système, identifier des facteurs de changement potentiels (ceux qui peuvent impacter le système de production ainsi que les caractéristiques d'adaptabilité) et les intégrer dans le système avec des potentiels d'adaptation. Le paragraphe suivant a pour objectif de discuter du processus de conception du système de production.

## 2.3 LE PROCESSUS DE CONCEPTION ET DE DEVELOPPEMENT D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

La conception d'un système représente l'ensemble des activités nécessaires qui partant de la spécification des exigences du système, conduit à la définition de son architecture et de ses constituants (Fiorèse and Meinadier, 2012). Nous allons nous intéresser, par la suite, au processus de conception et de développement d'un système de production.

### 2.3.1 LE PROCESSUS DE CONCEPTION : GENERALITES

Auparavant peu structuré, le processus de conception s'est peu à peu formalisé à partir des années 70 dans une visée d'optimisation : réduction des coûts et des délais de conception, volonté d'accroître la qualité et de gérer la complexification croissante des systèmes. Le domaine scientifique de « l'engineering design » a d'abord cherché à comprendre les pratiques de conception avant de développer des méthodes et des principes destinés à les structurer. Le processus de conception doit préciser ce qui doit être fait et à quel moment, quels techniques et outils sont nécessaires à chaque phase, quelles informations nécessitent d'être collectées et quels seront les résultats et le rendu de chaque phase (Love, 1996). Le processus de conception est souvent représenté comme un processus linéaire, bien qu'il soit localement itératif. Ce processus linéaire peut être découpé en quatre grandes phases (Pahl et al., 2007):

- *La planification et clarification des tâches* va collecter les informations concernant les exigences que le produit doit satisfaire ainsi que les contraintes existantes et leurs importances.
- *La conception conceptuelle* va établir des concepts de solution qui répondent aux exigences du cahier des charges. Sur la base de critères spécifiques, souvent d'ordre technico-économique, un concept de solution est retenu. Elle se conclut par la rédaction du cahier des charges du système.
- *La conception architecturale* va spécifier une structuration globale du produit, à partir du concept retenu, en définissant les dimensions et les configurations des composants.
- *La conception détaillée* fournit, grâce à des simulations et des calculs avancés, une description détaillée du "produit" permettant sa production. Cette phase résulte en une spécification des informations sous forme de documentation métier pour la production (plans détaillés,...).

D'une manière générale, les méthodologies et modèles de processus dédiés au développement des systèmes de production restent moins nombreux comparés à ceux proposés pour le développement de produits (Vielhaber and Stoffels, 2014). Un système de production peut être vu comme un produit complexe intégrant des composants socio-techniques. En particulier, la conception d'un système de production détermine de quelle façon les produits sont fabriqués en décidant de l'implantation du système ou du nombre de machines nécessaires.

### 2.3.2 LE PROCESSUS DE CONCEPTION DE SYSTEME DE PRODUCTION

Dans la littérature quelques exemples de processus de conception dédiés aux systèmes de production sont proposés (Bennett et al., 1990; Cochran et al., 2002; Duda, 2000; Suh et al., 1998; Vaughn et al., 2002; Wu, 1994). Les approches proposées pour la conception de systèmes de production se focalisent sur les phases de conception détaillée au détriment des autres phases de conception (Vielhaber and Stoffels, 2014). De plus, l'activité de conception part souvent de l'existence d'un système antérieur auquel il faut apporter des modifications pour le rendre conforme aux nouvelles exigences. Dans ce sens, le cadre de conception proposé par (Wu, 1994) (Figure 2-5) permet de mettre en lumière deux approches de conception d'un système de production :

- La première approche, qui peut être qualifiée de conception originale du système. Elle débute par la définition d'un ensemble d'objectifs pour créer un système de production qui satisfasse à ces objectifs.
- La deuxième approche suppose l'existence d'un système antérieur et consiste à apporter des modifications au système existant afin de satisfaire aux nouvelles exigences. Cette approche peut s'apparenter à une démarche de re-conception du système.

Le processus défini par (Wu, 1994) est un processus itératif, où chaque phase dépend des résultats de la phase précédente. Ce cadre met en évidence l'aspect décisionnel dans le processus de conception d'un système de production. La conception de système de production concerne les phases de : définition du problème, identification des objectifs et proposition des alternatives de conception (résolution de problème et proposition de solutions). Ces alternatives sont évaluées par la suite, et une solution est retenue et détaillée. Le résultat est une description du système (la solution) tel qu'il sera. Le cadre proposé par Wu n'explique pas les activités de la planification du processus de conception.

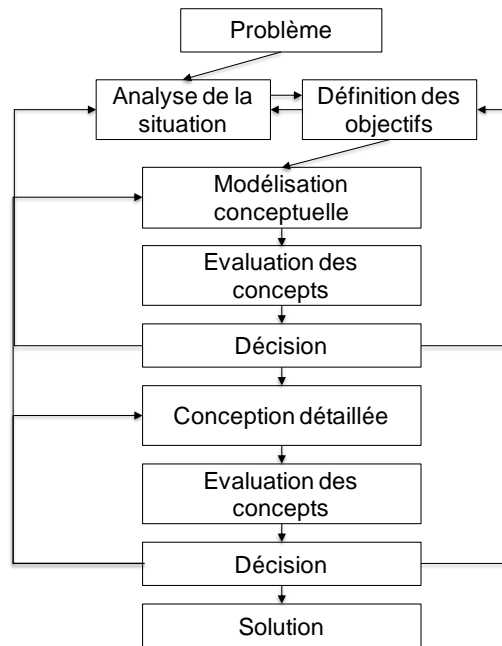


Figure 2-5 Cadre général de conception proposé par (Wu 1994)

En se basant sur ce cadre, trois scénarios de conception de système de production sont distingués (Bellgran and Sæfsten, 2010; Sæfsten, 2002) (Figure 2-6):

- *une conception pilotée par un concept*: ce cas s'applique lorsqu'un système de production existe déjà. La conception commence par la définition d'un ensemble d'objectifs qui peuvent être fixés pour répondre à une certaine vision ou philosophie comme le lean manufacturing (Bellgran and Sæfsten, 2010).
- *une conception pour générer des concepts*: de nouveaux concepts de système de production sont proposés pour répondre à des contraintes externes telles qu'un nouveau type de produit, un changement du volume et du nombre de variantes de produit. Les concepts créés par ce type d'approche servent de base pour les processus de type « conception pilotée par un concept » (cf. figure 2-6) (Bellgran and Sæfsten, 2010).
- *une conception pilotée par le prestataire* : dans ce cas la conception du système de production est conduite par un prestataire extérieur à l'entreprise. L'étendu des activités allouées au prestataire peut aller de la spécification du besoin jusqu'à la proposition de solution.

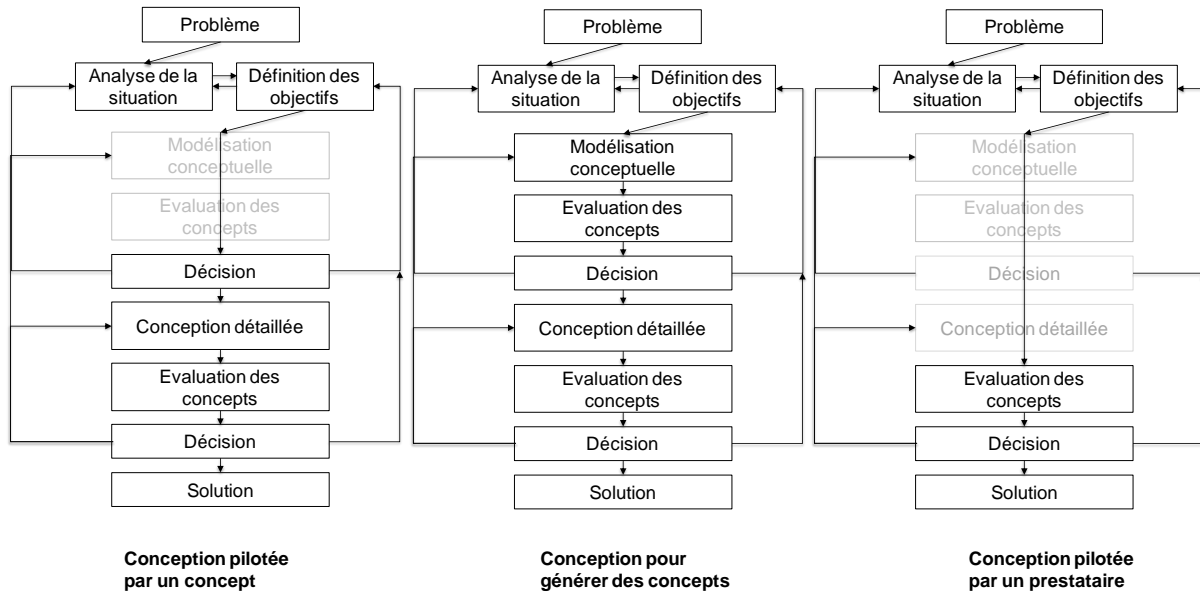


Figure 2-6 Les différentes approches du processus de conception

Le degré d'implication de l'entreprise dans le processus de conception du système de production varie selon le type de scénario adopté. Les raisons de choix d'un scénario peuvent être stratégique ou tout simplement effectuées selon les préférences du responsable de production (Bellgran and Sæfsten, 2010). Toutefois, le scénario basé sur un concept existant (scénario A) reste le plus commun en industrie (Bellgran and Sæfsten, 2010; Sæfsten, 2002), où des systèmes de production sont développés selon le concept de Toyota Production System par exemple.

Dans sa description du cycle de vie d'un système, le cadre de modélisation GERAM (cf. 2.5.6) fournit une description des phases liées à la conception du système. Ce cycle de vie est dérivé de celui de PERA (cf. 2.5.5) à la terminologie près (Vernadat, 1999). La description du processus de conception comporte cinq niveaux :

1. *Le niveau d'identification* précise les limites ou périmètre d'étude du système industriel. Il met en évidence toute l'analyse stratégique et décisionnelle qui conditionne la conception du système et qui se situe avant les activités de conception proprement dites.
2. *Le niveau de conceptualisation* définit les missions et objectifs du système.
3. *Le niveau de définition des besoins* consiste en une analyse fonctionnelle du système. Il définit les besoins, les tâches et les modules nécessaires pour ces besoins.
4. *Le niveau de conception préliminaire* est une étape de spécification fonctionnelle qui permet de définir les tâches et organisations humaines, l'architecture de la partie information/commande et l'architecture de la partie humaine.
5. *Le niveau de conception détaillée* complète la conception préliminaire et fournit un niveau de détail suffisant pour l'implantation du système.

La figure 2-7 fournit une cartographie des 3 processus de conception présentés ci-dessus.

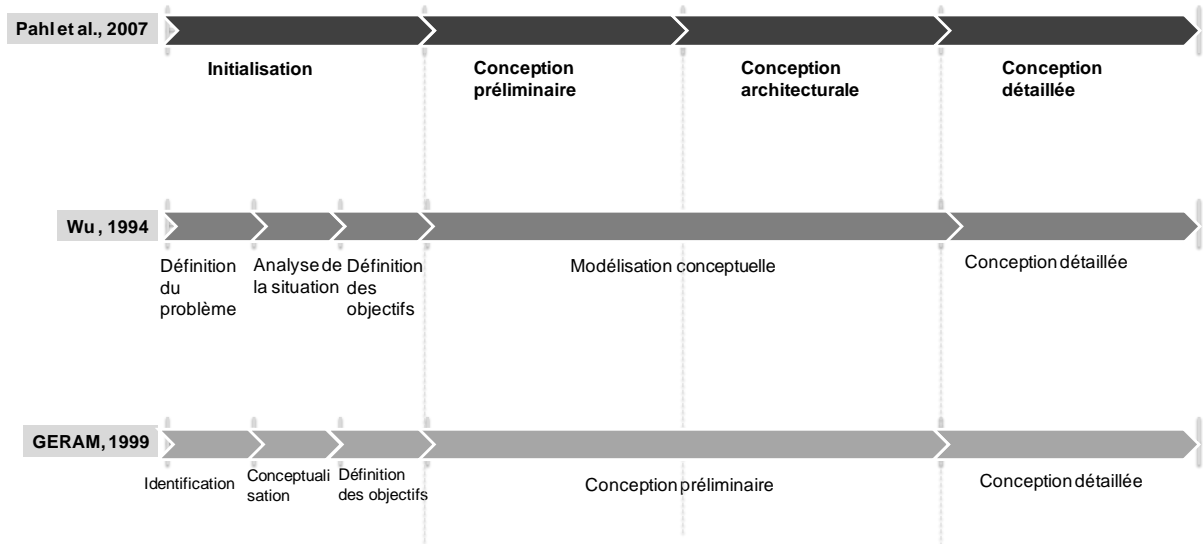


Figure 2-7 cartographie et mise en perspective des trois processus de conception

En se basant sur les travaux de (Pahl et al., 2007; Wu, 1994), on admet que le processus de conception d'un système de production peut être décomposé en 4 phases (figure 2-8) :

- Une phase d'*initialisation* permet de définir le problème de conception. Elle consiste à collecter les informations concernant les exigences que le système à concevoir doit satisfaire ainsi que les contraintes existantes et leur importance. Elle analyse aussi l'existant et définit les objectifs. Une étape importante de cette phase est de spécifier l'ensemble des informations nécessaires pour alimenter le processus de conception.
- Une phase de *conception conceptuelle (ou préliminaire)*. A partir du cahier des charges défini dans la phase d'initialisation, elle génère plusieurs concepts du système répondant aux exigences définies. Sur la base d'une évaluation de ces concepts vis-à-vis des objectifs du cahier des charges, un concept principal de solution est choisi pour être développé par la suite. Cette phase permet en l'occurrence de préciser quels procédés et machines sont nécessaires.
- Une phase de *conception architecturale*. A partir du concept de solution retenu à la phase précédente, les concepteurs définissent la configuration physique du système de production. Cela concerne le choix du type d'implantation (fonctionnelle, cellule, ligne de transfert, reconfigurable, etc.) et le dimensionnement du nombre des ressources (nombre de machines, moyens, etc.). Enfin, après évaluation de la solution finale,
- Une phase de *conception détaillée*. L'ensemble des plans et représentations des composants du système de production sont générés. Cette phase conduit à l'édition des plans et cahiers des charges qui vont permettre la réalisation de chaque composant du système de production. La phase d'implémentation concerne les trois types de composants du système de production que sont les ressources humaines, physiques et les composants logiques. Plus précisément, pour les ressources humaines cela concerne l'allocation des tâches, la définition des fiches de travail et des plans de formation. Pour les ressources physiques ceci correspond à l'édition des plans d'installation et des cahiers des charges pour la réalisation. Pour les composants logiques, c'est l'installation des programmes et la définition des plans de contrôles.

Chacune de ces quatre phases du processus de conception est un enchaînement de 3 types d'activités :

- Une activité de choix et de dimensionnement : le concepteur propose des solutions, choisit des concepts et les dimensionne par rapport à son besoin.
- Une activité d'évaluation : par l'utilisation de modèles analytiques ou de simulation ou des prototypes, la performance attendue des concepts proposés est évaluée.
- Une activité de décision : des activités décisives jalonnent le processus de conception où l'on peut décider d'accepter et avancer d'avantage dans le processus, retourner en arrière pour affiner un concept ou abandonner un concept.

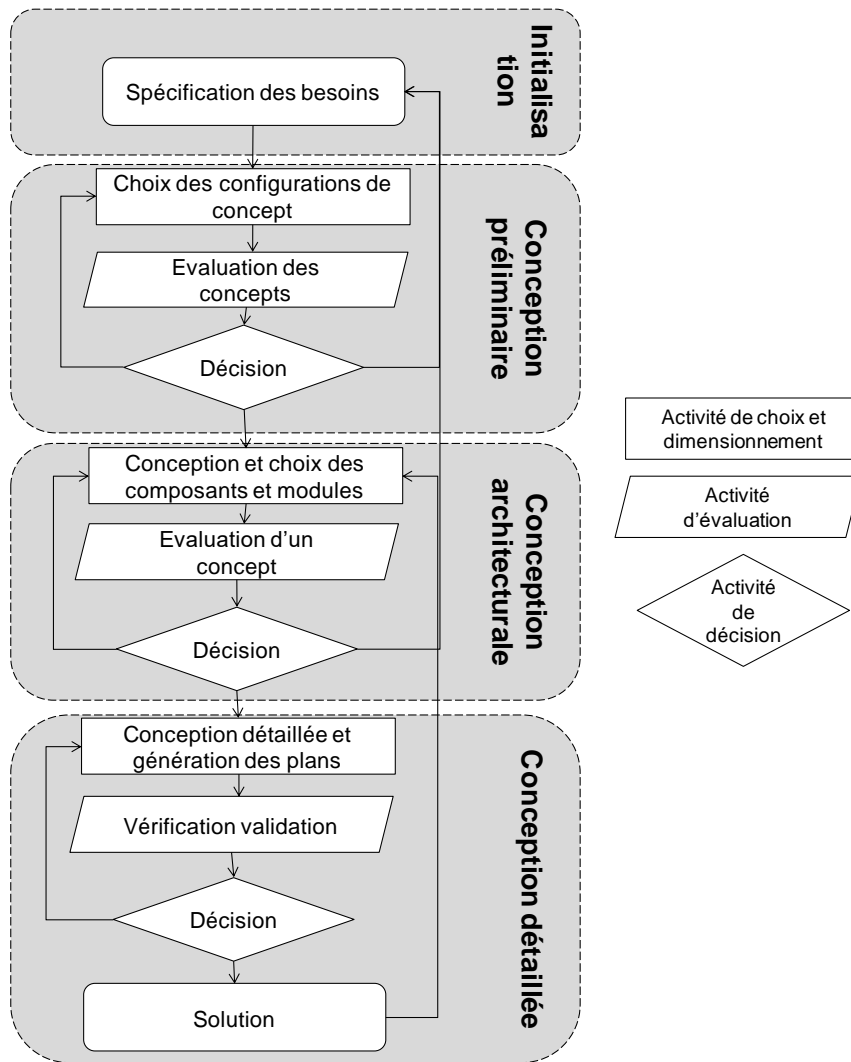


Figure 2-8 Le processus de conception du système de production

Par ailleurs, le processus de développement d'un système de production considère au-delà de la phase de conception, la phase d'implémentation du système qui tient compte de la construction et la réalisation du système de production. Le processus de développement concerne une partie plus large du cycle de vie du système de production que sa conception (figure 2-9).

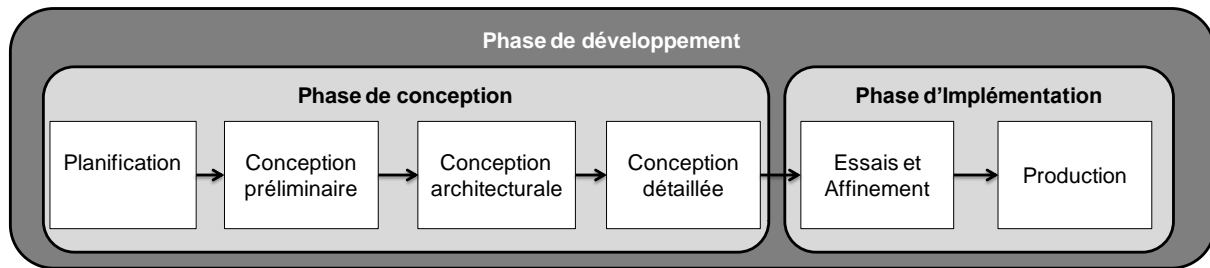


Figure 2-9 Processus de conception et processus de développement

### 2.3.3 APPROCHES ACADEMIQUES ET INDUSTRIELLES DE CONCEPTION

En pratique, l'approche industrielle pour la conception de système de production s'appuie souvent sur une démarche de type essaie/erreur/expérimentations (Bellgran and Sèafsten, 2010; Vaughn et al., 2002). Vaughn évoque 3 méthodes d'essai/erreur qui sont communément utilisées par les industriels (Vaughn et al., 2002):

- Les maquettes à petite échelle où les idées sont testées sur des versions réduites des équipements du système de production dans le but d'évaluer la faisabilité et la performance du système.
- Les ateliers d'essais d'erreurs où des zones pilotes sont aménagées pour tester de nouvelles idées sur des composants et équipements à l'échelle réelle.
- Les simulations numériques qui permettent de vérifier des concepts de solutions avant leur implantation physique. Bien que cette solution permette d'économiser des coûts et des délais significatifs, les résultats peuvent ne pas être très fiables car il est difficile de modéliser mathématiquement certains aspects du système.

Les entreprises focalisent d'avantage sur le développement du produit car elles y voient un moyen de gagner un avantage compétitif, tandis que le processus de conception de système de production est rarement vu comme un moyen d'avoir le meilleur système de production (Bellgran and Sèafsten, 2010)

## 2.4 APPROCHES DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION

Une méthode de conception est une approche prescrite qui offre au concepteur un guide et les moyens nécessaires pour implémenter le nouveau système. Parmi les méthodes de conception présentées dans la littérature, Tomiyama distingue de nombreuses théories et méthodes de conception (TMC) qu'il propose de classer selon trois catégories (Tomiyama et al., 2009):

- TMC pour générer une nouvelle solution de conception telle que les approches intuitives, les approches systématiques ou la méthode TRIZ.
- TMC pour enrichir pour les informations fonctionnelles et attributives des solutions de conception, telles que le QFD ou la conception axiomatique.



- TMC pour la gestion de la conception et la représentation des connaissances de conception telles que la conception concourante ou la méthode DSM.

Tomiyama a proposé une classification des différentes méthodes de conception eu égard aux 3 catégories citées ci-dessus (Tomiyama et al., 2009) (tableau 2-2). Nous proposons de passer en revue quelques-unes de ces méthodes qui ont été appliquées pour la conception de systèmes de production.

Tableau 2-2 Catégorisation des TMC basée sur la théorie générale de conception (Tomiyama et al., 2009)

Catégories des TMC	Exemples
<b>TMC pour générer une nouvelle solution</b>	
Conception basée sur la créativité	Abduction (Hartshorne and Weiss, 1932) Synthèses émergentes (Algorithmes génétiques, recuit simulé, ANN, et apprentissage) Approches intuitives (association analogie, méthode de simulation, brainstorming, conception bio-inspirée.
Conception basée sur la combinaison	Approches systématiques (Pahl et al., 2007)
Conception basée sur la modification	Conception paramétrique, raisonnement à partir de cas; TRIZ, Synthèses émergentes
<b>TMC pour enrichir pour les informations fonctionnelles et attributives des solutions de conception</b>	QFD, Conception axiomatique, AMDEC Techniques d'analyses, techniques d'optimisation, DfX, méthode de Taguchi, Algorithme génétique
<b>TMC pour la gestion de la conception et la représentation des connaissances de conception</b>	La modélisation de connaissance dans la conception Ingénierie concourante, DSM

### 2.4.1 LA CONCEPTION AXIOMATIQUE

La théorie de conception axiomatique a été proposée par Suh (1990, 1995). Cette approche adopte des principes qui permettent de conduire aux "meilleures" alternatives de conception. Le but est de créer une démarche de conception scientifique, généralisée et systématique.

#### 2.4.1.1 DEFINITION ET PRINCIPE

La conception axiomatique distingue quatre domaines : le domaine du client qui est défini par des attributs orientés vers le client (CAs : Customer Attributes), le domaine fonctionnel qui contient les exigences fonctionnelles (FRs : Functional Requirements), le domaine de conception qui fournit les paramètres de conception (DP : Design Parameters) pour l'implémentation des exigences fonctionnelles, et le domaine du Process qui contient les variables de process (PV: Process variables) qui contrôlent les paramètres de conception.

Suh considère que la meilleure solution de conception doit répondre à deux axiomes :

1. Axiome de l'indépendance : Indépendance maximale des exigences fonctionnelles
2. Axiome d'information : Besoin d'information minimale. Cet axiome permet de favoriser les solutions nécessitant une description minimale (en terme du nombre de paramètres).

#### 2.4.1.2 DEMARCHE ET METHODOLOGIE D'APPLICATION

La gouvernance par ces axiomes présente l'avantage d'une évaluation systématique du processus de conception. La démarche d'application de la méthode de conception axiomatique commence par l'identification des besoins du client qui sont convertis en un ensemble d'exigences fonctionnelles de haut niveau. L'objectif est de développer le plus petit ensemble d'exigences qui caractérise complètement les fonctions désirées de la conception. Ensuite le concepteur doit déterminer quels paramètres de conception (DP) vont permettre de satisfaire les exigences fonctionnelles (FR). L'activité de détermination des paramètres de conception est une activité essentiellement créative (Cochran et al., 2002). Selon le niveau de définition des paramètres de conception (DP) leur niveau d'abstraction peut être différent : Les (DP) déterminés à un niveau plus haut peuvent bien être de nature abstraite décrivant un système général sans fournir assez d'information pour son implémentation; tandis que les (DP) déterminés à un niveau plus bas de la décomposition fournissent assez de détails pour que la solution puisse être implémentée. Le processus de décomposition se poursuit jusqu'à ce que tous les (FR) et (DP) soient décrits à un niveau suffisamment opérationnel pour être implémentés. Un exemple simplifié de processus de décomposition pour la conception axiomatique est proposé par (Cochran et al., 2002) (Figure 2-10).

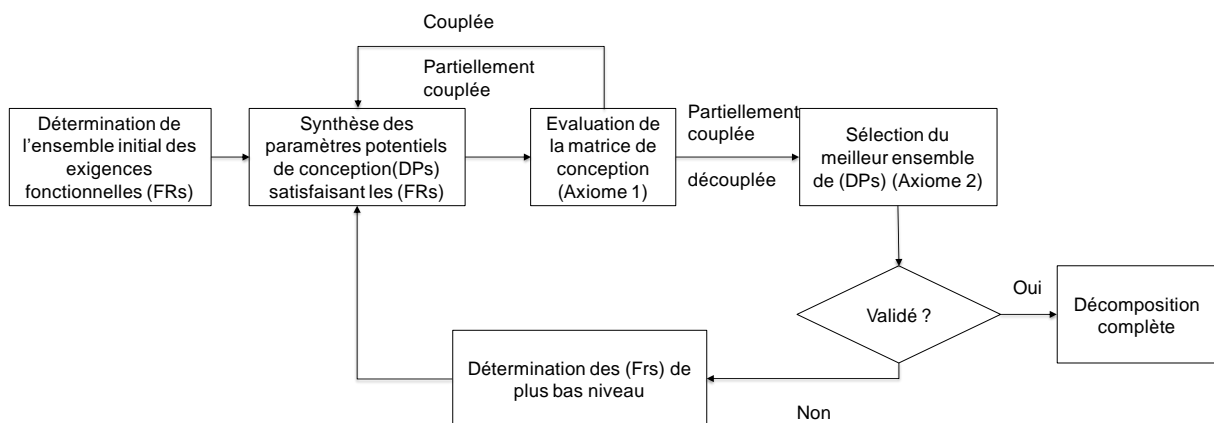


Figure 2-10 Processus simplifié de décomposition pour la conception axiomatique (Cochran et al., 2002).

Dans le but de vérifier la conformité du processus de conception avec l'axiome d'indépendance, Suh définit une matrice de conception ( $[A]$ ) qui permet de montrer quels (DPs) influencent quelles (FRs) :

$$[FR]=[A][DP] \quad (1)$$

où chaque élément de la matrice ( $[A]$ ) peut prendre la valeur 0 qui signifie qu'il n'y a pas de lien entre le (FR) et (DP); ou la valeur X pour mentionner l'existence d'un lien entre l'exigence fonctionnelle (FR) et le ou les (DPs) considérés.

On peut distinguer 3 états pour la matrice A :

- La matrice A est diagonale : la conception est dite découplée. Dans ce cas l'axiome 1 est satisfait et chaque (FR) est décrite par un seul paramètre de conception (DP). Chaque (FR) peut être satisfaite sans affecter les autres (FRs).
- La matrice A est triangulaire supérieure ou inférieure : la conception est dite partiellement découplée. L'axiome d'indépendance n'est pas satisfait
- La matrice A ne peut pas être diagonalisée ou rendue triangulaire : la conception est couplée. l'axiome d'indépendance n'est pas satisfait. Dans ce cas, des contraintes de conception existent. Les contraintes doivent être nécessairement satisfaites en dépit de la violation de l'axiome d'indépendance (Park, 2007).

#### 2.4.1.3 EXEMPLES D'APPLICATION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION

Les principes de la théorie de conception axiomatique ont été appliqués pour la conception de systèmes de production (Suh et al., 1998). Parmi ces cadres de conception la démarche MSDD (Arinez and Cochran, 1999a; Cochran et al., 2002) a été largement discutée dans la littérature. La démarche MSDD (Manufacturing System Design Decomposition) est une approche par décomposition Top-Down qui suit les principes de la théorie de conception axiomatique. Elle vise à satisfaire quatre objectifs (Cochran et al., 2002):

- Séparer clairement les objectifs par rapport aux moyens mis en œuvre pour les atteindre (grâce à l'application des principes de la théorie de conception axiomatique)
- Lier les activités et les décisions locales (de bas niveau) aux exigences et objectifs globaux.
- Comprendre les relations entre les différents éléments de conception d'un système : par l'utilisation des matrices de conception.
- Communiquer ces informations efficacement à travers l'organisation. La démarche elle-même est un outil de communication.

La figure 2-11 donne un aperçu du niveau supérieur de l'approche de Cochran. La structure de la démarche s'appuie sur six branches: la qualité, l'aptitude d'identification et de résolution des problèmes, la stabilité du système (résultats prévisibles), la réduction des délais, la réduction des coûts et l'optimisation des investissements (Cochran et al., 2002). Cochran définit la maximisation à long terme du retour sur investissement comme objectif ultime de toute

organisation industrielle. Quoique d'autres auteurs revendiquent qu'une telle réflexion favorise une pensée à court terme plutôt qu'une stratégie d'expansion durable à long terme.

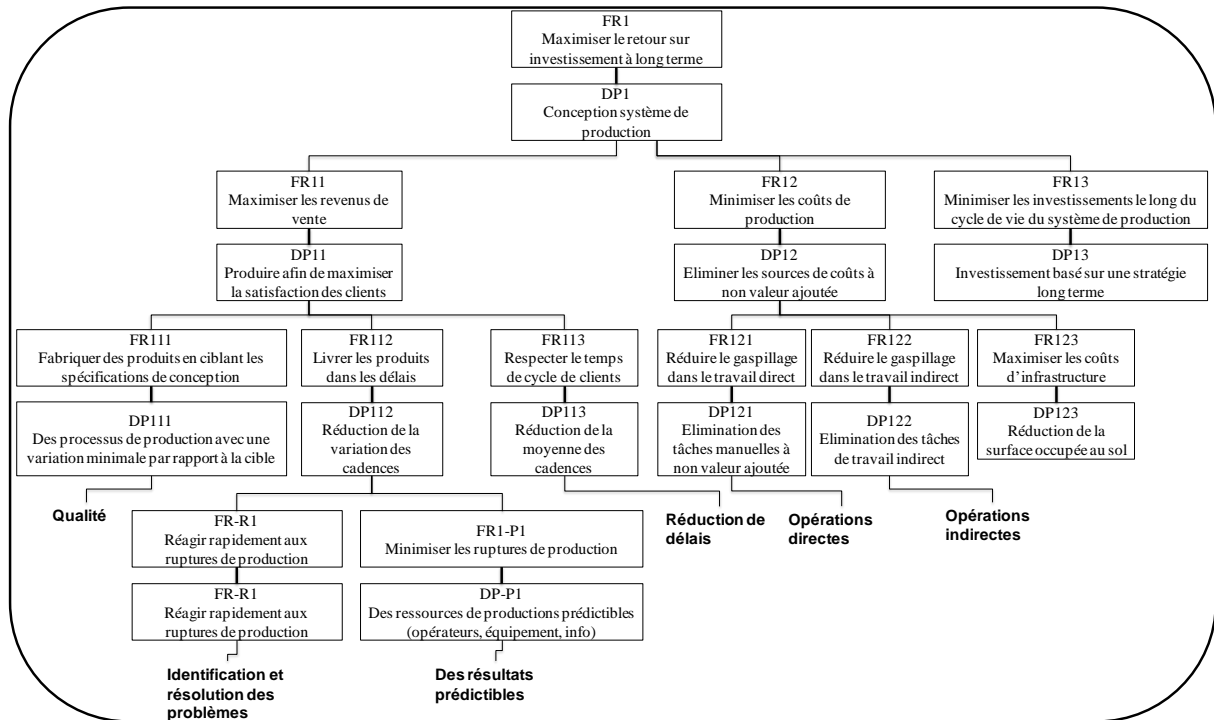


Figure 2-11 Les niveaux supérieurs de l'approche de conception par décomposition du système de production (Cochran et al. 2002)

Cette approche propose une démarche simple pour décomposer et spécifier ce qu'il faut concevoir en décomposant le système de production complexe en un ensemble de composants moins complexes. Toutefois elle ne propose pas de guide pour montrer comment les concevoir ou comment les intégrer pour former le système global. D'autres travaux combinent l'approche MSDD dans plusieurs disciplines. (Duda, 2000) présente une utilisation pour lier stratégie, mesure de performance et conception de système de production. (Arinez and Cochran, 1999b) proposent un cadre de conception pour la conception des équipements basé sur l'approche MSDD.

#### 2.4.1.4 APPLICATION DANS LES SYSTEMES MOBILES ET RECONFIGURABLES

Concernant les applications pour les systèmes de production mobiles et reconfigurables, (Erwin Rauch, 2015) propose une méthodologie pour la conception d'un système de production mobile adapté pour des applications dans le secteur de la construction. Quatre exigences sont décrites par le cahier des charges : **(1)** maximiser la capacité et l'efficacité opérationnelles, **(2)** minimiser l'effort d'assemblage, désassemblage et d'adaptations des unités sur site, **(3)** minimiser la rigidité de fabrication sur site et, **(4)** minimiser la dépendance vis-à-vis des conditions sur site. Le cadre proposé par Erwin Rauch est présenté en annexe 3 dans la figure 11-1. Ce cadre en 3 niveaux, permet de traduire les exigences du cahier des charges liées à la conception d'une unité de production mobile en un ensemble d'entités à concevoir. Comme il l'a été évoqué, ce cadre décrit prioritairement les exigences liées aux aspects

techniques et physiques du SPM et ne tient pas compte des autres composantes d'un système de production (humaines, informationnelles ou décisionnelles). Le niveau de description obtenu correspond à un niveau d'abstraction ne permettant pas une spécification détaillée pour l'implémentation du système de production. L'utilisation de la conception axiomatique conduit uniquement à la spécification de concept, elle ne permet pas d'aboutir à une conception détaillée. En outre, elle ne tient pas compte des aspects liés à la gestion du cycle de vie du système.

#### 2.4.1.5 CONCLUSION SUR LA CONCEPTION AXIOMATIQUE

En conclusion, la conception axiomatique présente l'avantage de s'appuyer sur une approche de conception par décomposition descendante (top-down). Cette logique de décomposition consiste en une détermination progressive des exigences fonctionnelles. En effet, les exigences fonctionnelles d'un niveau ne peuvent être déterminées qu'après que les variables de conception du niveau supérieur soient connues. Un deuxième avantage de la conception axiomatique est le contrôle des couplages entre les variables de conception (DPs) et la différenciation entre les objectifs (FRs) et les moyens pour les satisfaire (DPs). Toutefois, d'un côté la théorie de la conception axiomatique ne décrit pas le processus de développement ni les aspects du cycle de vie du système de production. D'un autre côté, l'application d'un cadre basé sur la conception axiomatique reste surtout valable surtout pour la génération des concepts du système de production correspondant à la phase de conception préliminaire.

#### 2.4.2 L'APPROCHE SYSTEME

Un système de production est vu comme un système composé de plusieurs sous-systèmes généralement décomposé en vue externe et interne couplés avec des vues des systèmes physiques, de décisions et d'informations. Par exemple pour la vue physique on trouve le système de fabrication, système d'assemblage, système de transfert, système de stockage, etc. La conception du système de production dépend alors de la conception (ou du choix des éléments lorsque des solutions existent sur le marché) de chacun des systèmes le constituant, mais aussi de la connexion entre ces sous-systèmes pour les intégrer dans le système global.

*"Les systèmes de systèmes se caractérisent par la connexion de systèmes différents pour obtenir des effets, des fonctionnalités qu'aucun ne peut fournir isolément, chacun d'eux ayant été conçu de façon indépendante et, le plus souvent, sans qu'il ait été envisagé qu'il soit intégré au sein d'un système de systèmes."* (Fiorèse and Meinadier, 2012). Le système de systèmes comprend un certain nombre de constituants dont chacun a son propre cycle de vie et certains existaient préalablement. Dans le but d'identifier les systèmes de systèmes, (Maier, 1998, 2009) cite cinq critères qui sont considérés comme une référence pour la classification des architectures de système de systèmes (Fiorèse and Meinadier, 2012) :

- 1 ***L'indépendance opérationnelle des éléments*** : les différents systèmes n'ont pas besoin systématiquement des autres pour être mis en œuvre. Chacun produit les services et satisfait les besoins pour lesquels il a été conçu.

- 2 **L'indépendance managériale des éléments** : les différents systèmes constituant le système de systèmes relèvent de prescripteurs / propriétaires / constructeurs différents. Ces acteurs peuvent avoir des statuts différents, public / privé, et des modèles économiques différents, but non lucratif / but lucratif ainsi que des budgets différents (personnels ou publics) ; des choix industriels et économiques différents (externalisation versus intégration verticale). Ils peuvent mettre en œuvre des dispositifs d'acquisition différents (achat, location, code des marchés publics) dans des relations entre partenaires différentes (B2B ; B2C; B2A Business to Administration).
- 3 **Les comportements émergents** : l'intégration des différents systèmes entre eux permet de produire des comportements émergents qu'aucun système ne peut réaliser isolément.
- 4 **Le développement évolutif** : le développement de la capacité n'est pas fait en une fois, mais est incrémental, c'est à dire en plusieurs incréments à échéances qui sont dépendantes de la mise en service et du retrait de service des systèmes qui composent le système de systèmes.
- 5 **La distribution géographique** : les systèmes ne sont pas co-localisés. Ils peuvent être distribués sur un vaste territoire ; voire, pour certains systèmes de systèmes sur la terre entière.

Un système de production peut être défini comme un système de systèmes dans la mesure où d'une part, il est composé d'un ensemble de sous-systèmes dont chacun a son propre cycle de vie et chaque sous-système peut être défini indépendamment des autres. D'autre part, les interactions entre ces sous-systèmes définissent des contraintes pour le système de systèmes, affectant la performance du système global (Alfieri et al., 2013).

#### 2.4.2.1 DEMARCHE ET METHODOLOGIE D'APPLICATION

Le problème de conception du système de production étant complexe, il est nécessaire de passer par une approche de décomposition jusqu'à arriver à des sous-problèmes suffisamment simples pour trouver des solutions sous formes de composants que l'on peut soit réaliser soit acquérir. Ensuite, pour obtenir le système global le problème de "recomposition" se pose. La "recomposition" correspond à une intégration du système à partir de ses composants une fois qu'ils sont réalisés ou acquis. La "recomposition" correspond à un problème d'agencement et d'interfaçage de ces éléments. Cette activité est qualifiée de conception de l'architecture du système (Fiorèse and Meinadier, 2012).

Cette démarche repose sur deux approches différentes et complémentaires (Figure 2-12) :

- **Une approche Analytique.** Cette approche vise à obtenir une solution conforme aux exigences système<sup>9</sup>. Elle consiste d'une part, en une décomposition des exigences fonctionnelles du système en un ensemble d'éléments suffisamment indépendants avec allocation des exigences à chaque niveau de décomposition ; et d'autre part, à identifier toutes les interactions entre ces éléments.

<sup>9</sup> Exigences techniques spécifiant ce que l'on attend d'un système et servant de référence pour sa conception

La conception du système est d'abord pensée en termes fonctionnels. D'abord une analyse externe du système permet de déterminer les fonctions du service attendues par le système. Ces fonctions de service sont décomposées par la suite en sous-fonctions. Ensuite cette décomposition est conduite de façon itérative : chaque fonction est re-décomposée en sous-fonction. Cette analyse fonctionnelle interne du système définit l'arborescence fonctionnelle du système. Par la suite ces fonctions sont allouées à des constituants capables de les réaliser. Le processus de décomposition fonctionnelle se poursuit jusqu'à l'on arrive sur des constituants qu'il n'est plus utile de décomposer soit parce qu'il est possible de le développer en interne ou sous-traiter soit parce que c'est un composant qui existe sur le marché (produit sur étagère). Cette démarche de décomposition fonctionnelle fait appel à un besoin de traçabilité des exigences. En effet, en plus des exigences fonctionnelles qui décrivent ce que doit faire le système et avec quels niveaux d'exigences, d'autres exigences dites non fonctionnelles émergent telles que des contraintes non attribuables aux fonctions ou de nouvelles exigences induites par les choix de conception. La traçabilité permet donc d'enregistrer l'historique des choix effectués.

Dans la décomposition fonctionnelle, les interactions fonctionnelles sont identifiées. Elles correspondent aux interactions (flux échangés) nécessaires pour reconstituer les fonctions de service à partir de leurs sous-fonctions. Ces interactions peuvent être représentées soit par des diagrammes de flux soit par des matrices de couplages.

Lorsque des éléments fonctionnels en interaction sont alloués à des constituants physiques différents; les interfaces physiques sont générées dans les architectures. (Fiorèse and Meinadier, 2012) note qu' "*une interface vue comme une frontière entre constituants à un certain niveau de granularité peut être vue, au fil de la décomposition, comme un sous-système lui-même complexe*".

Le système est alors vu comme une composition d'organes en interaction capables de réaliser les fonctions attendues avec les performances voulues (Fiorèse and Meinadier, 2012).

Approche Analytique

**Problème**  
Système prescrit par les exigences système

Décomposer en sous-problèmes en allouant les exigences et définissant les interactions jusqu'à ce que les sous-problèmes soient suffisamment simples pour leur trouver une solution technique



Approche Constructive

Architecturer les éléments de solution pour définir le système tel qu'il devra être intégré afin de satisfaire aux exigences et présenter les comportements attendus

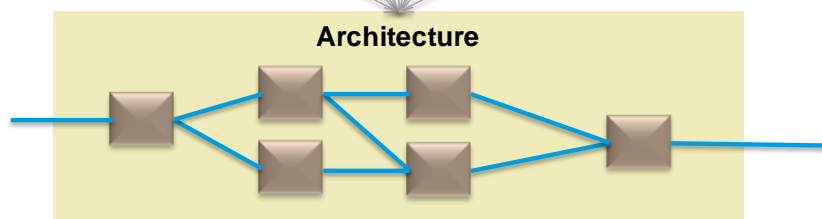


Figure 2-12 Principe de décomposition et d'architecture dans l'approche système, adaptée de (Fiorèse and Meinadier, 2012)

- **Une approche constructive.** La logique de recombinaison du système se base sur un agencement des éléments de solution en les interfaçant de manière à supporter les interactions identifiées. Le résultat de la recombinaison définit l'architecture du système<sup>10</sup>. L'architecture du système peut être placée au niveau fonctionnel, qui définit l'architecture logique ou fonctionnelle du système décrite par des fonctions ou modules fonctionnels (arrangement de sous fonctions), ou placée au niveau organique qui définit l'architecture organique ou physique du système. L'architecture physique représente l'agencement des constituants physiques interfacés entre eux définissant la solution conçue ou envisageable.

L'architecture du système est conçue et représentée selon deux approches complémentaires (Fiorèse and Meinadier, 2012) :

- *L'approche structurelle* représentant l'agencement des fonctions (pour l'architecture logique) ou des constituants (pour l'architecture physique) avec leurs interactions (interfaces physiques)

<sup>10</sup> "L'architecture décrit l'organisation fondamentale du système représentée d'une part, par ses constituants, leurs interrelations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution." (Fiorèse and Meinadier, 2012)



- *L'approche comportementale* représentant le fonctionnement du système pour ses différentes conditions d'emploi et de vie (aspects temporels et dynamiques).

Enfin, la définition du système inclut d'une part la définition de son architecture et des organes constituants et d'autre part la définition de tous les systèmes contributeurs (outillages, processus et procédures nécessaires à leur production, leur intégration, leur vérification, leur approvisionnement, leur maintenance et leur retrait de service) (Fiorèse and Meinadier, 2012).

L'ingénierie des systèmes adopte deux points de vues complémentaires pour l'analyse des systèmes (Fiorèse and Meinadier, 2012) :

- la vue externe ou approche "boite noire" : la définition des frontières du système permet d'identifier les éléments de l'environnement extérieur qui contraignent le système mais auxquels il doit répondre en fournissant les services attendus. L'environnement est défini comme tout ce qui est susceptible d'influencer ou d'être influencé par le système (Fiorèse and Meinadier, 2012).
- la vue interne ou approche "boite blanche" : le système est considéré comme constitué d'éléments en interaction qui définissent son organisation (architecture) et son fonctionnement.

#### 2.4.2.2 ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DU SYSTEME DE PRODUCTION

Le système de production est inclus dans un environnement avec lequel il interagit pour assurer sa finalité. Dans la vue externe du système, on peut distinguer deux types d'environnements: l'environnement direct et indirect. Dans notre approche on assimile l'environnement direct au contexte micro-économique de l'entreprise, représentant l'environnement dans lequel l'entreprise opère et a une influence (même limitée). Quant à l'environnement indirect, il correspond à l'environnement général ou macro-économique dont les facteurs influencent l'entreprise sans qu'elle ait un contrôle direct sur eux. Dans le cadre de notre contexte de systèmes de production mobiles, l'analyse de l'environnement extérieur requiert une importance particulière puisqu'elle est propre à chaque site de production. Cette analyse fera l'objet d'une discussion approfondie dans la suite de ce manuscrit (cf. §4.2 et §4.4). A présent nous nous intéressons à l'analyse interne du système de production.

#### 2.4.2.3 ANALYSE INTERNE DU SYSTEME DE PRODUCTION: UNE APPROCHE HOLISTIQUE

La décomposition structurelle du système de production permet de fournir une vision holistique du système. Plusieurs descriptions des sous-systèmes du système de production ont été proposées:

- Doumeings et al. (1987) considèrent une décomposition en 3 sous-systèmes : (1) le sous-système physique constitué des ressources physiques et humaines conduisant les activités de transformation des produits (2) le sous-système décisionnel assurant le

contrôle de la production et (3) le sous-système informationnel (3) qui permet d'alimenter les autres sous-systèmes en informations nécessaires.

- pour Suh et al. (1998) un système de production consiste en un arrangement de ressources humaines, ressources physiques (machines, matériels, moyens de transport, ordinateurs, entrepôts, etc) et des ressources informationnelles
- Bellgran et Sèafsten (2010) considèrent qu'une vue holistique du système de production signifie que le système doit être conçu en tenant compte de ses composantes techniques et physiques, de la composante humaine et de la manière dont le travail est organisé.

De cette revue de la littérature, la description globale des éléments constituant un système de production conduit dans premier temps à l'identification de quatre sous-systèmes communs à toutes les descriptions des auteurs susmentionnés :

- le système technique qui inclut les machines et les équipements,
- le système de manutention incluant pour sa part les équipements nécessaires pour assurer le transfert de matière et de produits entre les stations de production,
- le système humain qui inclut le personnel opérationnel et de management, et
- le système d'information incluant les parties matérielle (ex : ordinateurs) et immatérielle (ex : logiciels) nécessaires pour coordonner, communiquer des informations aux opérateurs, contrôler les systèmes techniques et de manutention et la gestion des opérations (Groover, 2007).

En plus de ces quatre sous-systèmes, Notre contexte de mobilité de systèmes de productions nous conduit à intégrer deux autres sous-systèmes qui sont indispensables pour assurer l'opérationnalité et l'autonomie d'un système de production. Ces sous-systèmes sont :

- les bâtiments et infrastructures, car pour assurer l'intégrité du SPM, il est nécessaire que les murs et la structure du système soient également mobiles.
- et le système d'énergie, car l'approvisionnement en énergie peut être une contrainte pour les systèmes de production opérant sur des localisations éloignées et ne disposant pas de sources d'énergies (électricité, eau, etc.) (Fox, 2015). Dans ce cas il est nécessaire de prévoir un système d'auto-alimentation en énergie.

En conclusion, nous considérons qu'un système de production est constitué de six sous-systèmes qui sont rappelés dans la figure 2-13.

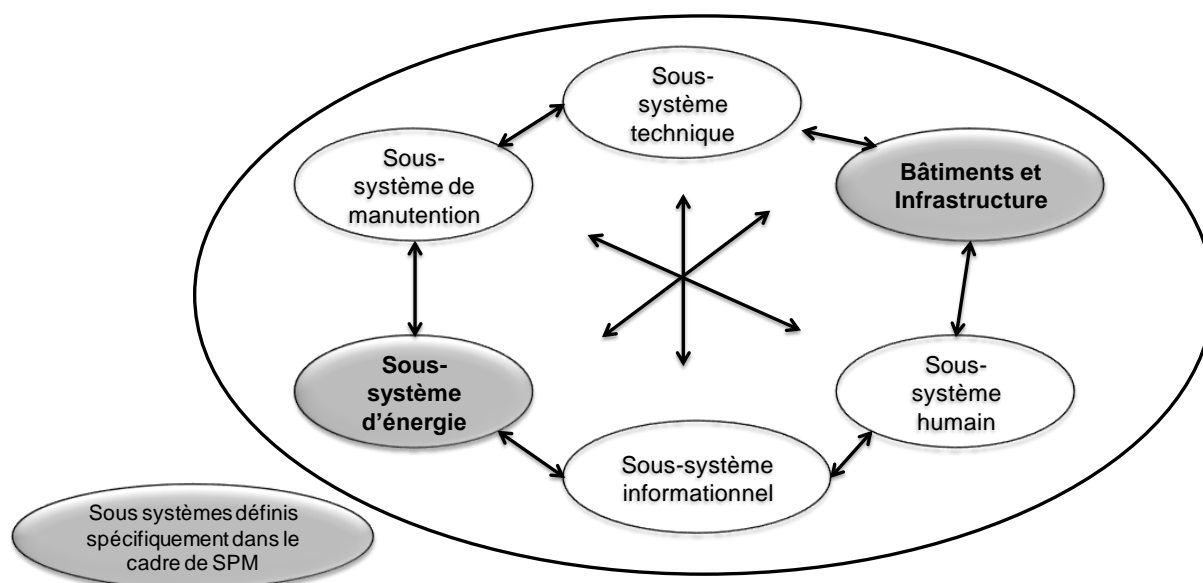


Figure 2-13 Les sous-systèmes constituant un système de production

### 2.4.3 LA CONCEPTION MODULAIRE

Ce concept a été largement discuté dans la littérature avec des applications souvent pour la conception de produits (Flores, 2005; Henderson and Clark, 1990; Miller et al., 1998; Ulrich, 1994). Le terme de modularité a plusieurs interprétations selon le contexte d'utilisation. Dans le domaine de l'architecture, il désigne la construction d'un bâtiment à partir de plusieurs composants standard. En ingénierie des produits, la modularité est liée par exemple au concept de personnalisation de masse (mass customization). Elle désigne l'utilisation d'unités indépendantes. En fabrication, la modularité signifie l'utilisation d'éléments interchangeables (Ulrich, 1994). Dans ce qui suit, nous nous focalisons sur le concept de modularité appliquée à la conception de systèmes de production.

Le concept de système de production modulaire a été proposé dans un objectif de fournir une solution pour améliorer l'agilité et la flexibilité des systèmes de production (Rogers, 1990; Rogers and Bottaci, 1997). La modularité est considérée comme une caractéristique importante dans les systèmes de production flexibles et reconfigurables (Koren et al., 1999; Mehrabi et al., 2000). La modularité dans ce cas d'application signifie que tous les composants physiques (hardware) et logique (software) du système sont conçus pour être modulaires (Mehrabi et al., 2000). Ceci nécessite un grand degré d'indépendance entre des éléments séparés du système de production, une accessibilité accrue et des interfaces standard entre les éléments (Tsukune et al., 1993). En pratique la modularité est facilitée par : (1) des interfaces standards et modulaires qui assurent l'échange de flux (mécaniques, informationnels et d'énergies), (2) des modules facilement utilisables "plug-and-produce" et, (3) des systèmes d'informations à architecture ouverte qui permettent un rajout ou une suppression faciles de modules de commande ou d'information (Koren et al., 1999; Mehrabi et al., 2000).

On note que la définition d'un module est liée à son aspect structurel (ensemble de composants) et à son aspect fonctionnel (regroupement des fonctions rendues par le module). La littérature sur la configuration des modules s'intéresse à l'analyse des relations entre composants et fonctions (Chakrabarti, 2001; Zamirovski and Otto, 1999).

L'application de la modularité dans le processus de conception semble présenter des avantages à tous les stades de vie d'un système :

- pendant la **phase de développement** : la standardisation des interfaces des modules privilégie l'indépendance de développement des modules. En effet, du moment où les interfaces sont compatibles, les choix de conception faits à l'intérieur d'un module n'affecte pas la conception d'un autre (Henderson and Clark, 1990).
- pendant la **phase de transport** : avoir des modules s'adaptant aux différents modes de transport (routier, maritime, ferroviaire) facilite leur transportabilité et les rend facilement mobiles.
- pendant la **phase d'exploitation** : la modularité contribue à réduire les coûts de maintenance d'une part, dans la mesure où lorsque qu'une reconfiguration du système est nécessaire pour s'adapter à des exigences d'évolution, le principe de modularité assure que seulement les modules concernés par le changement peuvent être remplacés ou adaptés. D'autre part, en ce qui concerne la maintenance des équipements, au lieu d'entretenir ou mettre à niveau tout le système, les opérations de maintenance peuvent porter uniquement sur les modules concernés. Tout ceci contribue à la réduction des coûts sur le cycle de vie.
- pendant la **phase de recyclage** : des travaux s'intéressant à la gestion de fin de vie des produits (Hata et al., 2001; Newcomb et al., 1998) montrent que la modularisation permet de retirer les assemblages de composants réutilisables et de recycler (ou réutiliser) plus facilement les modules construits à partir d'un matériel identique.

Cependant l'adoption du concept de modularité rajoute certaines contraintes pour la conception du système de production. Parmi ces contraintes, on peut citer celles liées à la standardisation des interfaces. En effet, une fois l'architecture modulaire et les interfaces figées, il devient plus difficile de les modifier (Flores, 2005).

La modularité a un impact sur l'organisation à mettre en place. Une fois les modules techniques et fonctionnels définis et les interfaces figées, un ou plusieurs modules peuvent être affectés à des organisations différentes (entreprises sous-traitantes, équipes projets). Ces organisations développent séparément les modules sous leur responsabilité en veillant au respect des interfaces techniques et fonctionnelles figées par l'architecture du système. Dans ce cas, les interfaces techniques issues de la décomposition technique et de l'architecture système induisent des interfaces organisationnelles du projet. L'inverse peut aussi se produire : *"en raison d'impératifs d'ordre supérieur (règles de coopération étatiques ou industrielles, sauvegarde d'intérêts stratégiques, répartition à priori du chiffre d'affaires, etc.) l'architecture industrielle peut être définie indépendamment des considérations fonctionnelles et techniques et, par la même, contraindre l'architecture technique."* (Fiorèse and Meinadier, 2012).

Les travaux s'intéressant à la conception modulaire peuvent être regroupés en 3 catégories (Flores, 2005) : (1) des travaux orientés sur l'évaluation des caractéristiques des éléments nécessaires pour définir les modules, sans prendre en compte les interfaces, (2) des travaux qui s'intéressent principalement à la définition des interfaces et, (3) des travaux qui proposent de combiner les deux approches précédentes.

Parmi les travaux s'intéressant uniquement aux interfaces, des méthodes pour regrouper des modules en se basant sur le nombre d'interfaces entre composants ont été proposées. La spécification des interfaces peut se faire par exemple via des **matrices de couplages** (ou matrices de dépendances) (Huang and Kusiak, 1998) qui représentent l'ensemble des couplages (interactions, interfaces) entre éléments (fonctionnels ou organiques) d'un système. Cette représentation matricielle est utile pour répertorier et suivre la maturité de l'ensemble des interfaces (Fiorèse and Meinadier, 2012).

En somme, la conception d'un système de production modulaire nécessite que l'architecture du système soit définie à partir de modules. Cette modularité se décline en 4 caractéristiques : (1) l'indépendance des composants, (2) la standardisation des , (3) la facilité de mise en place (plug and produce) et, (4) la transportabilité de chacun des modules. L'identification des interactions (physiques ou fonctionnelles) entre les modules permet d'abord de définir quelles interfaces physiques doivent être mises en place et d'autre part de définir les architectures (configurations) possibles du système de production. Dans ce cadre des matrices de couplages peuvent être utilisées pour identifier les interfaces nécessaires. Enfin comme il l'a été souligné, la construction de la modularité doit être appréhendée aussi dans le cadre d'une vision sur le cycle de vie du système de production, en prenant en compte la transportabilité et la mobilité possible des modules. Les composants constituant un module doivent avoir dans la mesure du possible un temps de vie et un taux d'usure similaires ainsi que des intervalles d'entretien proches pour faciliter la maintenance.

#### **2.4.4 LES DEMARCHES DE CONCEPTION DE TYPES FBS-PPRE**

Le modèle FBS-PPRE (Function Behaviour Structure-Product Process Resource External effect) (Gero, 1990; Gero and Kannengiesser, 2004) permet une modélisation générique des objets d'entreprise et de leurs dynamiques d'évolution. Le modèle FBS représente explicitement les fonctions du système qui décrivent sa raison d'être, la structure qui décrit le système d'une manière statique et ses comportements internes qui ajoutent l'aspect dynamique (Labrousse, 2004). Le modèle FBS ne prend initialement pas en compte les notions de ressources, processus, contexte et état (Labrousse, 2004). Labrousse propose d'enrichir le modèle FBS en intégrant quatre vues : produit, processus, ressource et effet externe (Labrousse, 2004). Ce modèle générique est destiné à la conception de produits.

#### **2.4.5 CONCLUSION SUR LES APPROCHES DE CONCEPTION DE SYSTEMES DE PRODUCTION**

Les systèmes de production sont de plus en plus complexes car ils doivent faire face à plusieurs changements et ont besoin d'intégrer une réactivité/flexibilité. En plus du besoin

d'intégrer ces caractéristiques, une méthode de conception se doit d'être (Houshmand and Jamshidnezhad, 2006) :

- compréhensive pour considérer tous les aspects du système,
- simple afin d'être largement utilisée par les ingénieurs,
- efficiente avec un minimum d'actions d'essai-erreur,
- adaptable pour qu'il soit applicable dans différentes situations,
- prescriptive au lieu d'être descriptive pour recommander des solutions.

La conception d'un système de production va utiliser la modélisation d'entreprise comme outil de spécification dans le sens où ce sont les modèles construits qui vont permettre l'expression (GRP, 1999) :

- des besoins du système de production et des performances attendues,
- de l'organisation fonctionnelle du système,
- de la spécification et de l'intégration des composants techniques, humains et organisationnels.

Nous nous intéressons dans le paragraphe suivant aux techniques de modélisation d'entreprise.

## **2.5 MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION**

La notion d'entreprise réfère à un ensemble organisé d'activités mises en œuvre par des ressources socio-techniques dans le cadre d'une finalité identifiée. Au sens de l'ingénierie des systèmes, toute entreprise ou organisation d'entreprises (entreprise virtuelle ou étendue) sera perçue comme un système (Fiorèse and Meinadier, 2012). Vernadat définit les objectifs de la modélisation en entreprise comme une discipline qui consiste à décrire l'organisation et les processus opérationnels d'une entreprise soit dans le but de simuler ces processus pour comparer divers scénarios, soit dans le but de les analyser et de les restructurer pour améliorer la performance de l'entreprise (Vernadat, 1999). Dans tous les cas, on cherche à comprendre le fonctionnement de l'entreprise soit pour aider la prise de décision soit pour améliorer le fonctionnement. Il ne s'agit pas de modéliser l'entreprise dans sa globalité. Le but est de comprendre la structure et le fonctionnement de la partie de l'entreprise fixée comme objet de l'étude dans un souci d'analyse, de conception ou d'évaluation de performance. C'est pour cela qu'on parle de modélisation en entreprise et non de modélisation d'entreprise (Vernadat, 1999).

Le système de production étant la partie de l'entreprise correspondant aux activités de création de valeur, on se référera aux techniques de modélisation en entreprise pour modéliser le système de production.

## 2.5.1 INTERET DE LA MODELISATION

La modélisation en entreprise a pour objet la construction de modèles d'une partie déterminée de l'entreprise pour en expliquer la structure et le fonctionnement ou pour en analyser le comportement (Vallespir, 2012). L'intérêt de modéliser peut être présenté selon différents points de vue :

- du point de vue du scientifique : comprendre et analyser la structure et le fonctionnement de l'entreprise. La modélisation peut servir pour construire des raisonnements, et conduire des simulations.
- du point de vue du manager : communiquer, conduire le fonctionnement (piloter), capitaliser et partager les connaissances.
- du point de vue de l'ingénieur : concevoir, spécifier les applications informatiques, conduire l'évolution, évaluer la performance pour choisir la (ou les ) meilleure(s) alternatives (s) possibles.

En raison de la complexité et de la nature multi-face d'un système industriel, les cadres de modélisations<sup>11</sup> se doivent de respecter certains principes (Vernadat, 2014):

- *Principe 1 la nature plurielle des modèles d'entreprise* : tout ou partie d'une organisation est si complexe qu'il n'est possible de la représenter par un seul modèle exprimé dans un seul langage. Le modèle d'entreprise est formé à partir de plusieurs modèles qui sont nécessaires, chacun d'eux représentant un aspect particulier.
- *Principe 2 le concept des vues de modélisation* : la complexité structurelle peut être gérée en se focalisant sur certains aspects du système et en cachant les autres.
- *Principe 3 trois types de flux fondamentaux* : en excluant les flux financiers, on distingue 3 types de flux circulant dans un système industriel : les flux matériels, les flux d'information et les flux de contrôle.
- *Principe 4 processus vs. agents* : l'entreprise peut être vue, à un niveau macro, comme un ensemble de processus permettant d'atteindre des objectifs opérationnels et des agents interagissant ou des entités fonctionnelles qui permettent d'exécuter les processus opérationnels.
- *Principe 5 synchronisation des processus opérationnels* : la synchronisation peut se baser sur différents déclencheurs : (1) des événements, (2) des objets ou (3) des ressources.
- *Principe 6 le concept des niveaux de modélisation* : permet de spécifier les modèles nécessaires selon le niveau de détail souhaité. D'une manière générale, trois niveaux de détails sont utilisés : la définition des exigences, la spécification de la conception et la description de l'implantation.

Dans la littérature plusieurs cadres de modélisation sont proposés. Nous passerons en revue les 5 cadres de modélisation les plus évoqués, à savoir : Le modèle de Zachman, CIMOSA, GRAI/GIM, PERA et GERAM. Puis, nous procéderons à une comparaison de ces modèles.

---

<sup>11</sup> Un cadre de modélisation comporte une architecture de référence permettant de construire un modèle générique ainsi qu'une architecture particulière (modèle spécifique à un cas donné).

## 2.5.2 LE CADRE DE ZACHMAN

Zachman est un cadre créé en 1987 chez IBM initialement destiné pour la conception de systèmes d'informations (Zachman, 1987). Ce cadre a été étendu par la suite pour couvrir les aspects d'ingénierie d'entreprise.

### 2.5.2.1 PRINCIPES DE MODELISATION

Le cadre de Zachman est considéré comme une ontologie d'entreprise, et utilise un modèle de classification sous la forme d'une matrice 6x6 à deux dimensions (figure 2-14) :

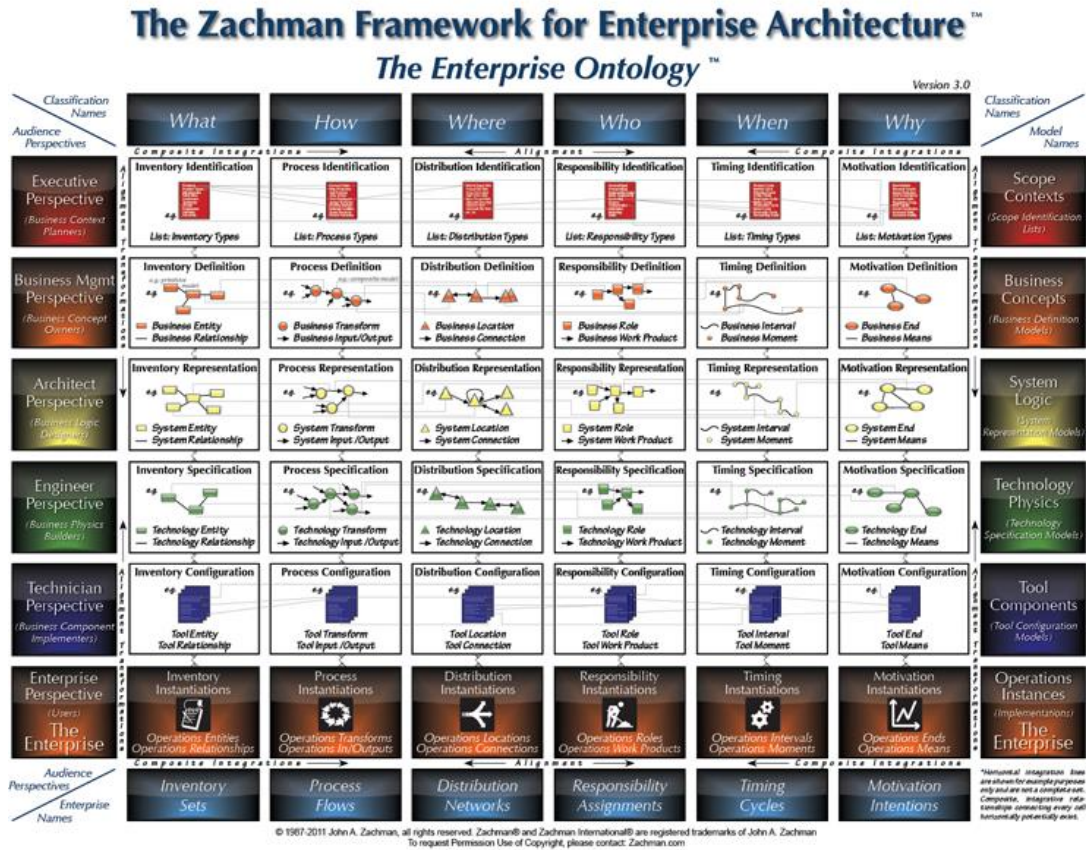
- une dimension horizontale qui permet de décrire plusieurs aspects de l'entreprise en utilisant des vues de modélisation. Ces vues sont formulées grâce à des questions que se posent les acteurs d'un projet d'ingénierie d'entreprise. Ces vues sont : "Data" (quoi) qui liste les données et leurs relations, "fonction" (comment) qui est la même que la vue fonctionnelle dans les autres cadres de modélisation que nous verrons par la suite, "Network" (où) spécifie les ressources, non humaines, de l'entreprise ainsi que leurs emplacements, "People" (qui) représente les ressources humaines de l'entreprise et leurs organisations, "Time" (quand) représente l'ordonnancement des activités, "Motivation" décrit les objectifs et les buts du fonctionnement et de l'organisation de l'entreprise.
- une dimension verticale qui représente le cycle de vie du système. Ce cycle de vie traduit les visions des acteurs intervenant dans le projet d'ingénierie de l'entreprise.

### 2.5.2.2 DISCUSSIONS

En plus d'offrir un guide méthodologique, l'architecture de Zachman n'impose pas l'utilisation d'un langage de modélisation spécifique, mais en recommande certains pour chaque cellule du cadre de modélisation. Chen et Pooley relèvent quelques limitations de ce modèle (Chen and Pooley, 2009):

- les relations et les dépendances entre les cellules ne sont pas clairement définies,
- il n'existe pas de méta-modèle pour chaque cellule de l'architecture de modélisation,
- il n'y a pas de démarche pour la création de modèles exécutables.





CHAPITRE 2

Figure 2-14 Représentation du cadre de modélisation Zachman, version 3.0 de 2011

### 2.5.3 CIMOSA

CIMOSA (Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture) est une architecture pour construire des systèmes intégrés de production (Vernadat, 1999). Elle a été développée par le Consortium AMICE dans le cadre de projets ESPRIT (1993). Cette architecture comprend (Vernadat, 1999):

- **un cadre de modélisation** (MFW "Modeling FrameWork"), qui comporte une architecture de référence permettant de construire un modèle générique ainsi qu'une architecture particulière (modèle spécifique à un cas donné) ;
- **une plateforme d'intégration** (IIS "Integrating Infrastructure") du système physique et des applications logicielles à partir des différents modèles précédemment définis ;
- **une méthodologie d'intervention** couvrant le cycle de vie du système de production, qui permet d'assurer la cohérence des différents modèles.

Le cadre de modélisation issue de CIMOSA préconise de modéliser l'entreprise suivant les quatre points de vue essentiels que sont : le point de vue fonctionnel, le point de vue informationnel, le point de vue des ressources et le point de vue organisationnel (Vernadat, 1999). Le but de CIMOSA est de fournir un support à l'ingénierie systématique d'un système intégré de production et d'autre part, de participer à l'intégration du système en utilisant le modèle d'entreprise pour piloter les opérations de l'entreprise (Vernadat, 1999).

### 2.5.3.1 PRINCIPES DE MODELISATION

CIMOSA perçoit l'entreprise comme un système dynamique organisé en domaines, interagissant entre eux et contenant des processus maîtres, générant et utilisant des événements et des objets d'entreprises. Les processus maîtres sont activés par des événements. Ainsi, par définition CIMOSA est piloté par les événements et centré processus (Abdmouleh, 2004).

Le cadre de modélisation formalise trois principes fondamentaux et orthogonaux pour la modélisation en entreprises selon une structure à trois axes communément appelée cube de CIMOSA (Figure 2-15) (Vernadat, 1999):

- **l'axe de généricité** (instanciation) se compose de trois niveaux : le niveau générique, le niveau partiel et le niveau particulier, permettant au concepteur de définir des modèles spécifiques à chaque étude à partir de modèles de référence (Sperandio, 2005). Les niveaux générique et partiel constituent l'architecture de référence de CIMOSA (sujette à la normalisation) alors que le niveau particulier correspond à l'architecture particulière d'une entreprise donnée (Vernadat, 1999).
- **l'axe de dérivation** identifie le cycle de développement. Il permet d'identifier trois niveaux de modélisation : le niveau de la définition des besoins, un niveau de spécification de conception, et un niveau de description de l'implantation ou implémentation.
- **l'axe de génération** définit quatre vues essentielles de modélisation. Pour gérer la complexité du modèle, il est possible d'accéder au modèle en utilisant quatre mécanismes d'accès qui permettent de filtrer certains aspects et négliger les autres. Les vues mises en œuvre sont : la vue fonction, la vue information, la vue ressources et la vue organisation.

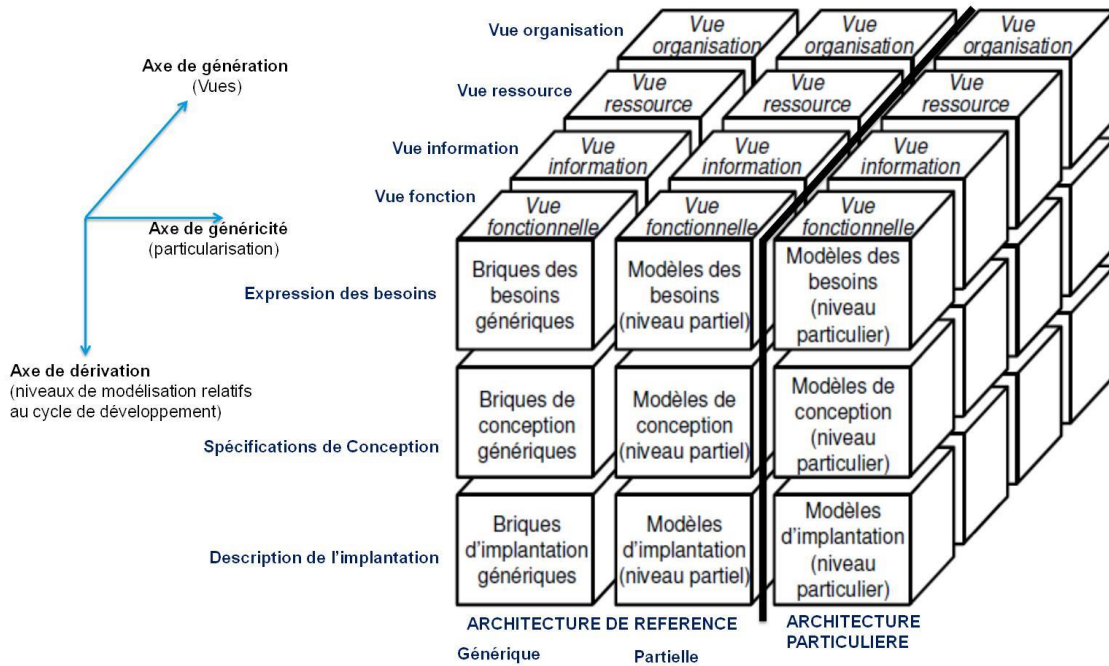


Figure 2-15 Architecture de modélisation CIMOSA (communément appelé cube de CIMOSA)

CIMOSA n'utilise pas un langage graphique de modélisation, son mode de représentation est procédural (Zaidat, 2005). Le cadre de modélisation CIMOSA se base sur le paradigme processus-opération-agent. Il fournit des éléments de modélisation suivant chacune des 4 vues. Ces éléments de modélisation sont synthétisés dans le tableau 2-3. Chacun de ces éléments est exprimé dans un langage formel. Dans ce qui suit, nous allons détailler les éléments constituant chacune des 4 vues de modélisation. La description formelle des éléments est donnée dans l'annexe 3 (cf. § 11.1.1).

Tableau 2-3 description des éléments constituant chacune des vues de modélisation CIMOSA

Vue de modélisation	Eléments de modélisation
Fonctionnelle	domaine, événement, processus, activité, opération fonctionnelle;
Informationnelle	objet d'entreprise, vue d'objet ;
Ressources	ressource, ensemble d'aptitudes, ensemble de compétences
Organisation	unité d'organisation, cellule d'organisation

2.5.3.1.1 LA VUE FONCTIONNELLE

La vue fonction synthétise une description fonctionnelle du système. Elle permet de distinguer deux aspects du système : ses fonctionnalités et son comportement. Les fonctionnalités représentent les tâches que le système doit exécuter pour accomplir ses fonctions. Le comportement est décrit par les processus du système i.e l'enchaînement d'exécution des tâches (Vernadat, 1999). Pour la description de la vue fonctionnelle du système, CIMOSA fournit les éléments de modélisation suivants (Vernadat, 1999) :

- **Le domaine** : représente un ensemble de processus opérationnels regroupés pour définir un domaine fonctionnel de l'entreprise. Des exemples de domaines d'entreprise sont liés aux fonctions : R&D, le marketing, la production, l'amélioration des processus industriels, etc. Une règle d'or est lorsque un processus opérationnel est attribué à un domaine est qu'il doit y être complètement contenu et ne pas s'étaler sur plusieurs domaines (Vernadat, 2014).
- **L'événement** : est un fait instantané qui signale un changement dans l'état du système nécessitant une action. Deux types d'événements peuvent être distingués : les événements sollicités tels que des requêtes ou des commandes ; ou de des événements de types non sollicités qui correspondent par exemple à des aléas de types pannes ou ruptures de stocks. Enfin, un événement peut être déclenché soit par un facteur interne au système (par exemple une demande de mise en maintenance ou une panne sur une ressource) ou externe (comme l'arrivée d'une nouvelle commande).
- **Le processus** : un processus peut être composé d'activités élémentaires ou des sous processus. CIMOSA définit deux types de processus : des processus dits bien structurés dont les activités sont bien connues et les flux de contrôle sont bien définis et, des processus dits semi-structurés dont les étapes sont bien connues mais dont le flux de contrôle est partiellement défini.
- **L'activité** : dans CIMOSA l'activité est une étape élémentaire d'un processus. Elle est constituée d'un ensemble d'opérations fonctionnelles. Une représentation générique d'une *activité* est donnée dans la figure 2-16.
- **L'opération fonctionnelle** est le plus petit élément de la vue fonctionnelle autorisé dans le modèle.

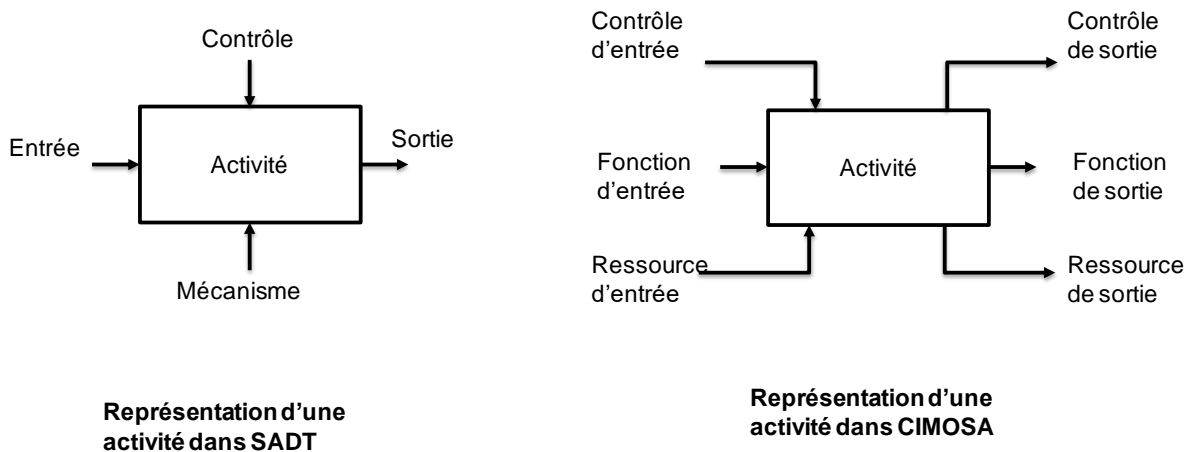


Figure 2-16 représentation d'une activité dans SADT et CIMOSA

La description des constructs de la vue fonctionnelle de CIMOSA est donnée en annexe

#### 2.5.3.1.2 LA VUE INFORMATIONNELLE

Le vue d'information considère les entrées et sorties des activités d'entreprise comme des objets ayant certains états. Deux éléments de modélisation sont utilisés pour décrire les aspects informationnels de l'entreprise :

- **L'objet d'entreprise** est une entité de l'entreprise ayant son propre cycle de vie. Il possède un identifiant unique et est décrit par un ensemble de propriétés qui peuvent être aussi des objets.
- **La vue d'objet** est une manifestation de l'état d'un ou plusieurs objets d'entreprise à un instant donné. Deux types de vues d'objets fondamentaux peuvent être distingués : Une vue physique de l'objet et une vue informationnelle de l'objet.

#### 2.5.3.1.3 LA VUE RESSOURCES

La vue ressources permet de décrire toutes les ressources de l'entreprise, qu'elles soient humaines ou matérielles, contribuant à l'exécution de ses activités. Le cadre CIMOSA différencie deux types de ressources : les *ressources inertes* appelées composants qui ne peuvent exécuter à elles seules des opérations fonctionnelles et des *ressources actives* appelées *entités fonctionnelles* qui permettent d'exécuter des ordres ou commandes. Les entités fonctionnelles peuvent être subdivisées en 3 parties : hommes, machines et applications informatiques. Les éléments de modélisation de la vue ressources sont :

- **Les ressources** servent à décrire aussi bien les composants que les entités fonctionnelles qui composent le système de production.
- **L'ensemble d'aptitudes** utilisé pour décrire les aptitudes nécessaires pour accomplir une activité ainsi que les aptitudes acquises par une entité fonctionnelle.

Dans l'ensemble d'aptitudes, on peut distinguer la notion d'**aptitude** qui définit une caractéristique ou une habilité technique d'une ressources traduisant sa capacité à être apte à réaliser certaines tâches (Vernadat, 1999); et la notion de **compétence qui concerne** la mise en œuvre d'un savoir, savoir-faire ou savoir-être pour mener à bien une mission. (Vernadat, 2014) propose d'enrichir l'élément de modélisation *ensemble d'aptitudes* en formalisant la notion de compétence. La structure de données exprimée dans CIMOSA est donnée en annexe 3 (cf. § 11.1.1).

#### 2.5.3.1.4 LA VUE ORGANISATION

CIMOSA fournit deux éléments de modélisation pour analyser les aspects organisationnels d'une entreprise :

- **L'unité d'organisation** : cet élément décrit la plus petite unité d'organisation qui peut être un rôle ou position tenu par une personne dans une structure organisationnelle. A cette unité est associé un ensemble de compétences nécessaires et est défini une liste de responsabilités et d'autorités affectées à l'unité. Un ensemble d'unités d'organisation forme une cellule d'organisation.
- **La cellule d'organisation** : décrit des compositions d'unités d'organisation pour former un niveau plus haut d'organisation (services, départements, divisions, etc). Les types de composition entre deux entités peuvent être obtenus par des relations de types "*appartient à*", "*comprend*" et "*relié à*".

### 2.5.3.2 DISCUSSION

Le cadre de modélisation de CIMOSA fut l'un des cadres les plus répandus pour la modélisation en entreprise. Le point fort de CIMOSA est qu'il s'appuie sur une modélisation formelle et exécutable. Le tableau 2-4 reprend une synthèse des points forts et des champs non couverts par le cadre CIMOSA.

Dans le cadre des réseaux collaboratifs d'organisation et dans le but de décrire le contexte et les caractéristiques d'une collaboration partant du point de vue de chaque partenaire, une vue "*Collaboration*" a été récemment proposée comme extension du cadre de modélisation d'entreprise (Kosanke et al., 2015). Cette vue propose 3 constructs pour décrire une collaboration :

- *Le domaine de collaboration* décrit la zone de collaboration entre l'entreprise concernée et ses partenaires. Les entités de collaboration mentionnées sont les processus, les activités, les ressources ou unités d'organisation.
- *Les partenaires de collaboration* sont décrits par leurs rôles (fournisseur, prestataire, consommateur, revendeur)
- *Les points de collaboration* définissent les interfaces de collaboration.

Tableau 2-4 Synthèse des avantages et faiblesses de CIMOSA

Avantages	Limitations
Une modélisation cohérente de l'entreprise depuis l'expression précise des besoins jusqu'à une description conforme de l'implantation (Zaidat, 2005)	La définition des constructs n'est pas claire (Williams et al., 1994)
Utilisation de l'approche par processus qui permet l'intégration de l'entreprise (Zaidat, 2005)	Le niveau d'identification du besoin n'est pas bien défini (Williams et al., 1994)
Infrastructure intégrante permettant intégration physique, applicative et une intégration par les données (Zaidat, 2005)	Pas de modèle de référence pour concevoir le système (Williams et al., 1994)
Une modélisation formelle et exécutable (Williams et al., 1994)	Restriction pour les industries de produits discrets (pas de service) (Williams et al., 1994)

### 2.5.4 GRAI-GIM

La méthode GIM (GRAI Integrated Method) est une méthodologie de modélisation et d'analyse des systèmes de décision des entreprises de production de biens ou de services. Elle

a été développée par les Professeurs Pun et Doumeingts de l'Université de Bordeaux (Doumeingts, 1984). Les bases théoriques de la méthode GRAI sont : la théorie des systèmes (Le Moigne, 1994; Simon, 1960), la théorie des organisations (Mintzberg, 1982) et le concept d'activité issu des travaux de (Michel Roboam, 1989; Pun, 1987). GRAI peut être perçue comme un outil de management utile aux décideurs et chefs de projet (Labrousse, 2004).

#### 2.5.4.1 PRINCIPES DE MODELISATION

Les principes de GIM supposent que l'amélioration d'un système doit partir de l'audit du système existant et la détermination des activités nécessaires pour améliorer cet existant. La méthodologie GIM s'appuie sur (Chen et al., 1997) :

- un **modèle conceptuel de référence** (le modèle GRAI) qui décompose une entreprise en trois sous-systèmes : sous-système physique, sous-système d'information et sous-système de décision (voir figure 2-17).

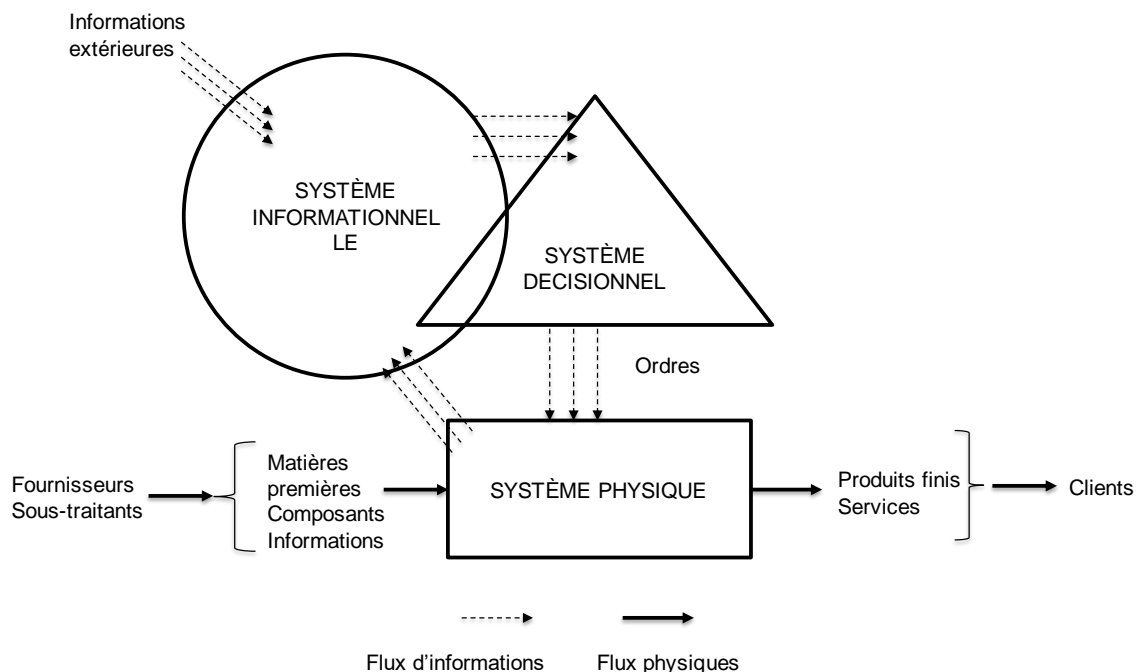


Figure 2-17 les trois sous-systèmes représentés par le cadre GRAI

- une **architecture de référence** GIM qui analyse l'entreprise au travers de quatre vues de modélisation qui sont : la vue information (données/connaissances), la vue décision (chaîne d'activités et centres de décision), la vue physique (ressources) et la vue fonction (décomposition fonctionnelle).
- un **cadre de modélisation** GIM qui permet de vérifier la cohérence du modèle (Doumeingts et Ducq, 2001) (figure 2-18)
- des **formalismes de modélisation** GIM qui permettent de représenter graphiquement les différents concepts définis dans GRAI (actigramme, grille GRAI, réseaux GRAI, diagramme de classes). Outre les concepts de modélisation issus des formalismes

IDEF0 et d'Entités Associations, GIM propose de nouveaux concepts de description des systèmes décisionnels qui sont la grille GRAI et les réseaux GRAI.

- une **approche structurée** GIM qui formalise le processus suivi par les experts de la méthode pendant une étude GRAI (Doumeingts et al., 2000)
- un **outil** supportant la méthodologie GIM (ex. l'outil IMAGIM)

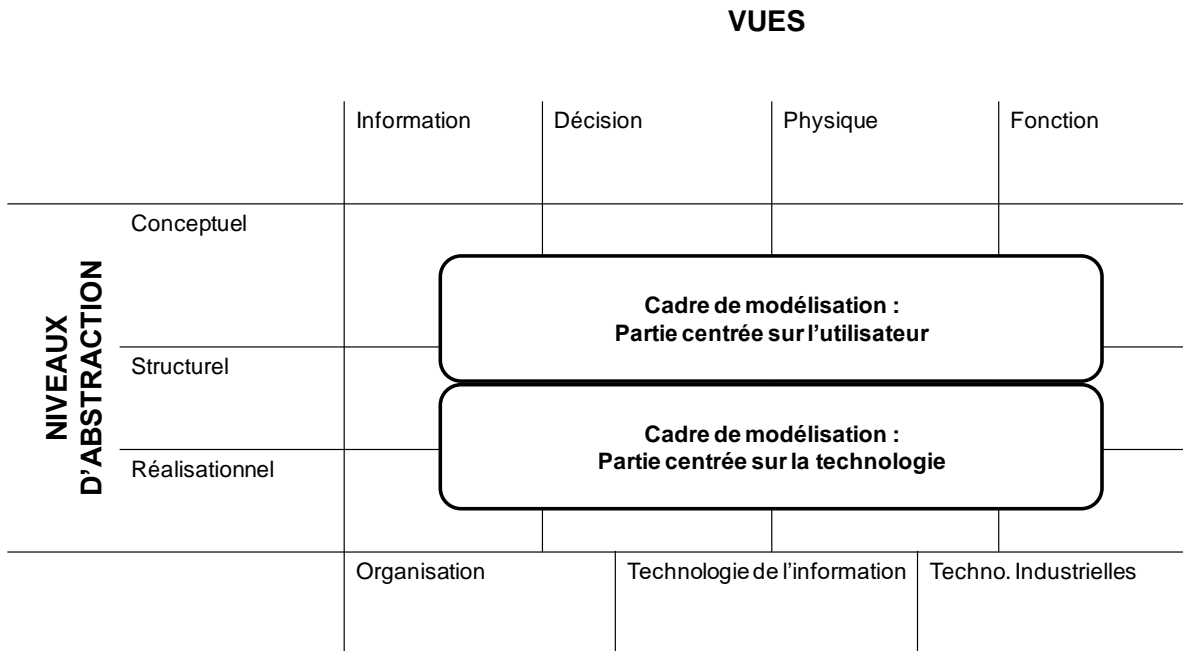


Figure 2-18 Cadre de modélisation GIM

#### 2.5.4.2 DISCUSSION AUTOUR DE GRAI

La force de GIM réside dans sa méthodologie d'intervention composée de deux parties (la partie conceptuelle centrée sur l'utilisateur et la partie centrée sur la technologie) (Figure 2-18). Ce cadre offre une méthodologie bien décrite et bien développée (Williams et al., 1994) qui permet de faire des états des lieux ponctuels (audits) et d'établir des voies d'amélioration pour définir ce vers quoi le système devrait tendre (Labrousse, 2004). Cependant, cette méthode ne permet pas une réelle acquisition "au fil de l'eau" ni une évolution dynamique des représentations (Labrousse 2004). D'un point de vue couverture du cycle de vie, GIM ne tient pas compte des phases de construction et d'implantation du système (Williams et al., 1994). Enfin, les besoins de formation, collaboration, détails d'organisation des aspects humains ne sont pas abordés (Williams et al., 1994).

#### 2.5.5 PERA

PERA (Purdue Enterprise Reference Architecture) est une méthodologie d'ingénierie d'entreprise développée par le Pr. Williams à L'université de Purdue, USA (Williams, 1994). Par rapport aux méthodes précédemment décrites, PERA tient compte de toutes les phases cycle de vie d'une entité industrielle depuis sa conceptualisation jusqu'à sa mise en opération



(Vernadat, 1999). De plus, PERA a imposé et positionné l'architecture humaine au cœur du cadre de modélisation (Vernadat, 2014).

### 2.5.5.1 PRINCIPES DE MODELISATION DE PERA

L'architecture de la méthodologie PERA est organisée autour des phases du cycle de vie d'une entité industrielle. Elle tient compte de cinq phases (Vernadat, 1999) :

- **La phase de conceptualisation** : est composée des deux étapes qui sont (1) *l'identification* définissant le périmètre d'étude du système industriel et, (2) l'étape de concepts qui définit la vision et la politique de la direction concernant les produits, le système opérationnel, la gestion du personnel et de la production. Deux parties sont ainsi distinguées dans la méthodologie : la partie *opérative* et la partie *information / commande*.
- **La phase de définition** : qui correspond à une analyse fonctionnelle. Elle définit les besoins pour chaque partie (opérative et de commande), les tâches et modules nécessaires, les diagrammes de flux, modèles d'entité, etc.
- **La phase de conception** : qui se déroule en deux étapes. Une étape de *conception fonctionnelle (ou préliminaire)* et une étape de *conception détaillée*. La conception concerne la partie humaine (tâches et organisation), l'architecture de la partie information / commande et l'architecture de la partie opérative.
- **La phase d'installation et de construction** : la partie opérative est implantée à partir des plans et modèles de la phase de conception, les bases de données et programmes de commande sont installés et testés et le personnel est formé.
- **La phase opérationnelle et de maintenance** : qui correspond à l'utilisation du système. Au cours des phases d'utilisation (vie active) du système, des parties (information /commande, opératives ou tâches humaines) peuvent subir des opérations de maintenance ou de remise à niveau (ré-engineering).

### 2.5.5.2 DISCUSSION AUTOUR DE PERA

L'originalité de PERA réside dans la prise en compte des aspects humains dans la méthodologie et de leur positionnement clair dans l'architecture (Vernadat, 1999). PERA se base sur une description graphique facile de compréhension par les utilisateurs et offre une méthodologie d'application bien documentée (Williams et al., 1994). Elle se distingue aussi par le positionnement des aspects humains au cœur de la méthodologie et la couverture de tout le cycle de vie du système de production. Toutefois, le manque de description formelle ne facilite pas son développement informatique (Williams et al., 1994).

## 2.5.6 GERAM

GERAM (Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology) est une généralisation de CIMOSA, de GRAI-GIM, de PERA et de quelques autres architectures (Vernadat, 1999). Issue des travaux du groupe de travail "IFAC/IFIP Task Force on Architectures for Enterprise Integration" (IFIP-IFAC, 1999). GERAM a servi de base pour

la mise en place de deux normes : (1) la norme ISO 15704 : 2000 qui liste les exigences que toute architecture de référence doit satisfaire, et (2) la norme ISO 19439 : 2006 qui présente une version standard du cadre de modélisation GERA. GERAM se base sur une approche qui fournit un cadre général et définit l'ensemble des éléments à prendre en compte lors du processus d'ingénierie d'entreprise.

### 2.5.6.1 PRINCIPES DE MODELISATION DE GERAM

GERAM fournit une description de l'ensemble des outils et méthodes recommandés pour l'ingénierie et l'intégration des entreprises. GERAM n'impose pas un ensemble particulier d'outils ou méthodes mais définit les critères que doit satisfaire n'importe quel outil ou méthode utilisé dans la modélisation d'entreprise (IFIP-IFAC, 1999). La figure 2-19 présente l'ensemble des composants identifiés dans GERAM.

GERAM définit, grâce à une architecture de référence de l'entreprise nommée GERA, les concepts génériques recommandées dans les projets d'ingénierie et d'intégration d'entreprise (IFIP-IFAC, 1999):

- **les concepts orientés vers les ressources humaines** définissent les rôles de l'humain, la manière d'organiser ces rôles pour qu'une ressource humaine puisse inter-opérer avec d'autres ressources humaines ou technologiques pour la réalisation des opérations de l'entreprise et enfin les aptitudes et qualités des humains comme élément de ressources de l'entreprises,
- **les concepts relatifs aux processus** pour décrire et modéliser les processus d'entreprise à travers les différentes phases du cycle de vie,
- **les concepts relatifs à la technologie** pour décrire les ressources technologiques et infrastructures utilisées pour réaliser les processus de l'entreprise.

GERAM fournit une description de tous les éléments recommandés pour l'ingénierie et l'intégration de l'entreprise (IFIP-IFAC, 1999). L'ensemble des composants identifiés dans GERAM sont illustrés dans la figure 2-19 et sont brièvement décrits ci-dessous :

- **GERA** (Generic Enterprise Reference Architecture) décrit les concepts génériques liés à l'ingénierie d'entreprise. Cela concerne : (1) des concepts orientés sur l'humain qui décrivent le rôle des humains comme une partie intégrante de l'entreprise et qui en tiennent compte pendant les phases de conception, construction et modification de l'entreprise, (2) des concepts orientés processus pour décrire les processus métiers de l'entreprise et, (3) des concepts orientés technologie pour la description des technologies impliquées dans le fonctionnement et l'ingénierie de l'entreprise.
- **EEM** (*Enterprise Engineering Methodology*) décrit les processus d'ingénierie et d'intégration d'entreprise.
- **EMLs** (*Enterprise Modelling Languages*) définit les constructs de modélisation génériques pour la modélisation d'entreprise adaptés aux besoins des utilisateurs des modèles d'entreprises.

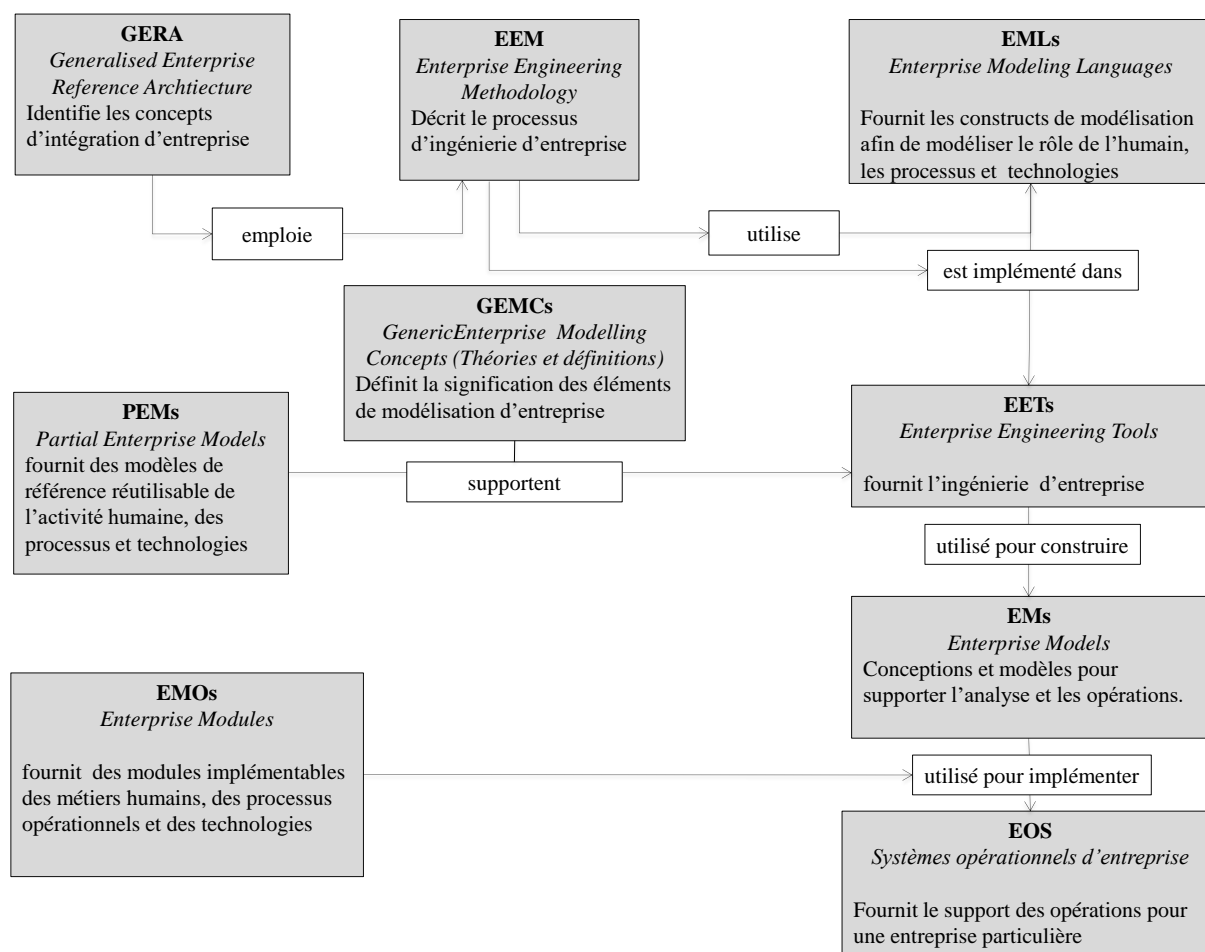


Figure 2-19 Les composants du cadre de modélisation GERAM

- **GEMC** (*Generic Enterprise Modelling*) définit et formalise les concepts les plus génériques dans la modélisation d'entreprise.
- **PEMs** (*Partial Enterprise Models*) capitalise les caractéristiques communes des entreprises dans un secteur industriel donné. Grâce à l'utilisation de bibliothèques, ces modèles partiels peuvent être réutilisés pour la création de nouveaux modèles.
- **EET** (*Enterprise Engineering Tools*) fournit des outils qui permettent d'implémenter les méthodologies d'ingénierie d'entreprise et de supporter les langages de modélisation.
- **EMs** (*Particular Enterprise Models*) représente les modèles d'une entreprise en particulier.
- **EMOs** (*Enterprise Modules*) sont des produits qui peuvent être utilisés pour l'implantation d'entreprises tels que des ressources humaines définies par leurs compétences, des types de ressources industrielles, etc.
- **EOSs** (*Particular Enterprise Operational Systems*) supportent le fonctionnement d'une entreprise en particulier.

### 2.5.6.2 DISCUSSION AUTOUR DE GERAM

GERAM n'est en fait pas une nouvelle proposition d'architecture de référence pour les entreprises, mais c'est un cadre qui vise à organiser la connaissance d'intégration d'entreprise au lieu de la redéfinir (Chen et al., 1997). GERAM offre un cadre de modélisation complet qui prend en compte le cycle de vie de l'entreprise. Cependant aucune démarche d'aide à la modélisation n'est proposée (Sperandio, 2005).

### 2.5.7 BILAN DES CADRES DE MODELISATION

Dans le but de réduire la multiplicité de solutions de modélisation existantes, plusieurs travaux ont été menés pour positionner les cadres de modélisation par rapport à GERAM. (Chen et al., 1997) proposent une cartographie qui lie GIM et GERAM. Williams procède à une comparaison de PERA et GERAM (Williams and Li, 1999). Noran fournit une comparaison du cadre de Zachman et le modèle GERA (Noran, 2003).

## 2.6 LES OUTILS D'AIDE A LA DECISION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEME DE PRODUCTION

Le processus de conception est un processus itératif de prise de décisions. Selon l'avancement de la conception, la prise de décision s'effectue en présence d'informations partielles, incomplètes ou imprécises. La rationalité d'une décision ne peut donc pas être parfaite et absolue, mais est nécessairement limitée. Dans le but d'aider les concepteurs à prendre des décisions dans un tel contexte, il est possible soit de "*créer des "concepteurs artificiels" capables de recréer par le calcul l'intelligence des concepteurs (heuristiques de recherche, règles), soit de modéliser leurs préférences subjectives dans un système algorithmique d'aide à la décision.*" (Lemaire, 2014 p132). Dans cette partie on s'intéresse aux différents 'outils' d'aide à la décision qui pourraient assister le concepteur du système de production dans ses prises de décision. En particulier, nous allons aborder le problème multi objectifs, l'analyse multi critères, la formalisation de la préférence et les méthodes agrégatives.

### 2.6.1 PROBLEME MULTI OBJECTIFS

Le choix d'une alternative de conception se base sur plusieurs attributs mesurables (par exemple coût, qualité, délai, etc.), appelés objectifs. Lorsque plusieurs objectifs doivent être pris en compte, le problème de conception est alors qualifié de multi-objectif. Jones et al. (2002) constatent deux difficultés qui peuvent être rencontrées face à ce problème:

- ces objectifs sont différents par nature, chaque attribut vise à répondre à un but défini ou satisfaire à une contrainte spécifique.
- de plus, ils sont antinomiques. Si une alternative satisfait un objectif (coût par exemple), elle éloigne souvent les autres objectifs de leurs cibles (délais ou qualité).

Une distinction peut être faite entre les buts et les contraintes : d'un côté, un but correspond à une valeur cible (souvent explicite) attendue pour un objectif, qui peut être sujet à une

maximisation, minimisation ou ciblage (Scott, 1998). D'un autre côté, une contrainte représente une restriction sur un objectif (qui peut être éventuellement représentée par une égalité ou une inégalité). Toute violation de cette restriction rend la solution inacceptable. Une contrainte ne traduit pas une notion de préférence.

La meilleure alternative de conception est celle qui satisfait aux préférences du concepteur / décideur. Nous proposons d'aborder la formalisation de la préférence dans le paragraphe suivant.

## 2.6.2 FORMALISATION DE LA PREFERENCE

Pour la formalisation de la préférence du concepteur / décideur, il est nécessaire de déterminer deux éléments : l'importance de chaque attribut et la satisfaction du décideur.

### 2.6.2.1 LE PROCESSUS DE HIERARCHIE ANALYTIQUE

Le processus de hiérarchie analytique (noté AHP<sup>12</sup>) est proposé par (Saaty, 1990) est une méthode de modélisation hiérarchique des préférences dans le but de procéder à un classement entre les solutions en affectant à chacune une note (appelée priorité) généralisée. Cette méthode très répandue, est particulièrement adaptée pour les décisions multi-objectifs. Dans le but d'effectuer un choix entre les différentes alternatives selon les différents attributs, Saaty propose une décomposition des attributs sous forme hiérarchique, cette décomposition hiérarchique résulte en plusieurs niveaux. Pour chaque niveau, Saaty préconise d'utiliser une matrice de jugement pour procéder à une comparaison par paire, au regard du niveau supérieur. Pour cette comparaison une échelle d'importance est (de 1 à 9) est proposée.

La matrice de jugement permet de comparer deux à deux les attributs du même niveau, en termes d'importance reflétant la contribution dans l'atteinte du niveau supérieur

### 2.6.2.2 LES FONCTIONS DE SATISFACCTIONS

Les fonctions de satisfaction permettent de convertir des valeurs naturelles (masses, dimensions, flux, etc.) en valeurs adimensionnées entre 0 et 1. Cette normalisation permet de rendre comparables des variables de natures différentes au travers de l'expression de niveaux de préférences. La préférence peut être mesurée en niveau : d'utilité, de désirabilité ou de satisfaction (Quirante, 2012).

Pour exprimer le niveau de satisfaction vis-à-vis d'un critère, des fonctions de satisfaction ou de valeur (Scott, 1998) sont utilisées. Ces fonctions prennent une valeur dans  $[0;1]$ . Une valeur proche de 1 désigne un critère satisfaisant et une valeur proche de 0 désigne une valeur de critère non satisfaisante. Il existe différents types de fonction de satisfaction : les fonctions d'appartenance (Bellman and Zadeh, 1970), les fonctions d'utilité et les fonctions de désirabilité. Dans la suite, on présente les fonctions de désirabilités qui sont parmi les plus adaptées aux problèmes de conception et peuvent être facilement paramétrables.

---

<sup>12</sup> pour *Analytic Hierarchy Process*

▪ **Fonctions de Harrington**

Harrington propose deux types de fonctions (Harrington 1965):

- deux fonctions adaptées pour des problèmes d'augmentation ou de minimisation nommées One-sided par Harrington (Figure 2-20-I). Elles sont paramétrées par deux points (Collignan, 2011): (1) soft limit (SL) qui indique la zone au-delà de laquelle les valeurs  $y_i$  sont considérées comme satisfaisantes; et (2) accurate constraint (AC) qui indique la zone de non satisfaction.

L'expression générale de la fonction de désirabilité one-sided de Harrington est donnée par la formule (2):

$$d_i(y_i) = \exp(-\exp(\alpha + \beta * x)) \quad (2)$$

avec dans le cas d'une fonction décroissante :

et dans le cas d'une fonction croissante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{\ln\left(\frac{\ln(d_{AC})}{\ln(d_{SL})}\right)}{AC-SL} \\ \alpha = \ln(-\ln(d_{SL})) - \beta * SL \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \beta = \frac{\ln\left(\frac{\ln(d_{SL})}{\ln(d_{AC})}\right)}{SL-AC} \\ \alpha = \ln(-\ln(d_{SL})) - \beta * SL \end{array} \right. \quad (3)$$

où  $d_{SL}$  et  $d_{AC}$  sont les niveaux de satisfaction respectifs de SL et AC qui paramètrent la relaxation des préférences

- une fonction adaptée pour des problèmes de ciblage nommée two-sided. . Elle est paramétrée par 4 points (Figure 2-20-II) : (1) la SL inférieure (LSL : Lower Soft limit) (2) la SL supérieure (USL : Upper Soft Limit) (3) LAC (Lower Accurate Constraint) et (4) UAC (Upper Accurate Constraint). Les points LAC et UAC permettent de paramétrer la pente de la fonction.

L'expression générale de la fonction two-sided de Harrington est donnée par la formule (4).

$$d_i(y_i) = \exp\left(-\left|\left(\frac{2 \cdot y - (U + L)}{U - L}\right)^n\right|\right) \text{ avec } \left\{ \begin{array}{l} U = \frac{UAC + USL}{2} \\ L = \frac{LSL + LAC}{2} \\ n = \frac{\ln(-\ln(d_{SL}))}{\ln\left(\left|\frac{2 \cdot LSL - (U + L)}{U - L}\right|\right)} \end{array} \right. \quad (4)$$

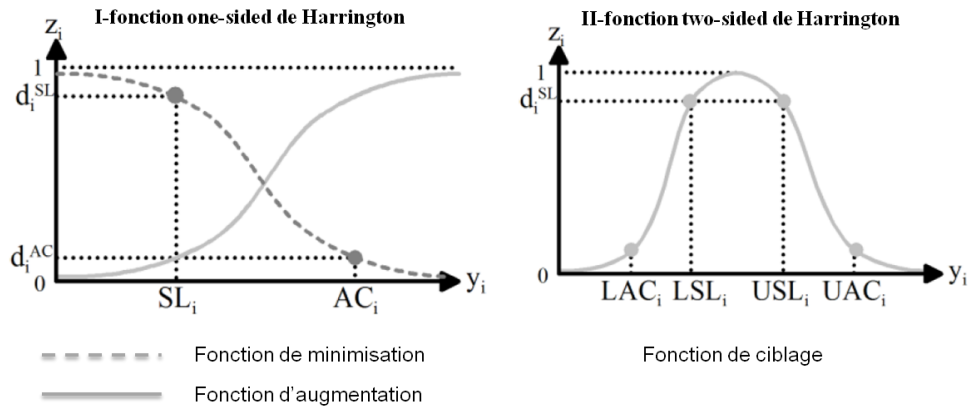


Figure 2-20 Formes générales des fonctions désirabilité de Harrington

### 2.6.3 LES METHODES MULTI CRITERES D'AIDE A LA DECISION

Avant l'apparition des techniques d'analyse multicritère, les techniques de recherche opérationnelles permettaient de ramener les problèmes de décision le plus souvent à l'optimisation d'un seul objectif, appelé fonction économique. Cette approche mono-objectif permettait de bien 'poser' le problème mathématiquement, mais cette représentation restait loin de la réalité. La diversité des méthodes multi critères réside dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information contenue dans chaque critère. Ces méthodes peuvent être classifiées selon trois approches : agrégation complète, partielle et locale.

Une décision de conception multicritères se base sur la définition de 3 attributs : Les préférences individuelles, les pondérations relatives de ces préférences et la sélection d'une stratégie d'agrégation (Scott, 1998).

Les méthodes agrégatives permettent de transformer un problème de choix multi-objectif en un problème mono-objectif, dans lequel l'expression de la préférence entre solutions est largement simplifiée. Selon Scott, afin que les fonctions d'agrégation soient adaptées et utilisables en conception (design-appropriate), elles doivent respecter les 7 axiomes de (Scott, 1998), qui sont : la monotonie, la commutativité, la continuité, l'idempotence, l'annihilation, la conservation d'échelle des poids et les poids nuls.

Le choix d'une méthode d'analyse multicritère qui soit la mieux adaptée pour un problème de décision peut s'avérer difficile. Roy et Słowiński (2013) proposent une démarche pour guider le concepteur / analyste dans le choix d'une méthode d'aide à la décision en fonction du contexte de la décision. Cette démarche se base sur la formulation de certaines questions. Ces questions sont présentées dans un ordre hiérarchique :

- de la plus générale et cruciale concernant quels types de résultats la méthode doit apporter ?
- passant par des questions sur l'agrégation multicritère qui concernent les exigences sur les échelles de préférence, la formalisation de la préférence, l'intégration des connaissances imprécises, acceptation de la compensation des critères et l'existence d'interaction entre les critères

- jusqu'aux celles qui sont secondaires. Ces questions portent sur l'intelligibilité, la caractérisation axiomatique et les faiblesses des méthodes considérées.

Ces questions sont reprises dans l'annexe 3 (cf. § 11.1.2). A présent, nous passons en revue les 4 méthodes d'agrégation les plus utilisées en conception dans la littérature.

### 2.6.3.1 SOMME PONDEREE

La somme pondérée est une méthode intuitive et est la plus connue et la plus employée. Elle consiste en l'addition de critères  $c_i$  associé chacun à une pondération  $\omega_i$  qui reflète l'importance relative de chaque critère.

$$f_{ag}(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots) = \sum_i (\omega_i \cdot c_i) \text{ avec } \sum_i \omega_i = 1 \text{ et } \omega_i \geq 0 \quad (5)$$

Toutefois, cette méthode présente un défaut : elle ne respecte pas l'axiome d'annihilation qui doit garantir que tous les critères soient au moins légèrement satisfaisants : si un des critères est nul (insatisfaction du critère), la valeur agrégée n'est pas nulle.

### 2.6.3.2 PRODUIT PONDERE

La méthode de produit pondéré permet de corriger ce problème. Cette méthode est compensatoire car une forte valeur d'un critère compense une faible valeur d'un autre. Cependant, le sens donné aux poids est moins intuitif car ils reflètent une importance relative exponentielle entre les critères et non plus proportionnelle (Collignan, 2011).

$$f_{ag}(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots) = \prod_i ((c_i)^{\omega_i}) \text{ avec } \sum_i \omega_i = 1 \text{ et } \omega_i \geq 0 \quad (6)$$

### 2.6.3.3 AGREGATION PAR LE MINIMUM

Cette méthode a un comportement non compensatoire. Elle permet d'agréger les critères selon une stratégie du pire des cas, considérant que seule la moins satisfaisante renseigne sur l'ensemble des critères. Elle ne tient pas compte de l'importance relative entre les critères.

$$f_{ag}(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots) = \min(c_i) \quad (7)$$

### 2.6.3.4 OPERATEUR GOWA

L'opérateur GOWA proposé par (Yager, 2004) permet d'unifier au sein d'une même fonction paramétrée les sommes pondérées et le produit pondéré. Cette fonction est munie d'un paramètre  $s$ , appelé "stratégie d'agrégation", qui permet de passer d'une fonction d'agrégation min à une fonction d'agrégation max de manière continue. Ceci permet d'adapter la stratégie d'agrégation entre compensation et non-compensation en fonction des valeurs de  $s$ .

$$f_{ag}(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots) = \sqrt[s]{\left(\sum_i (\omega_i \cdot (c_i)^s)\right)} \text{ avec } \begin{cases} \sum_i \omega_i = 1 \text{ et } \omega_i \geq 0 \\ s \in ]-\infty; +\infty[ \end{cases} \quad (8)$$



- Si  $s \rightarrow -\infty$ , la fonction d'agrégation est une agrégation par le minimum
- Si  $s \rightarrow 0$ , la fonction d'agrégation est un produit pondéré
- Si  $s = 1$ , la fonction d'agrégation est une somme pondérée
- Si  $s \rightarrow +\infty$ , la fonction d'agrégation est une agrégation par le maximum

## 2.7 CONCLUSION DU CHAPITRE 2

De ce chapitre basé essentiellement sur la revue de la littérature, on retient trois aspects importants pour la conception d'un système de production (cf. figure 2-21):

- Le processus de conception d'un système de production est jalonné par quatre macro-phases (figure 2-8) : phase d'initialisation, conception préliminaire, conception architecturale et phases de conception détaillée.
- Une analyse interne du système de production a conduit à la détermination de 6 sous-systèmes du système de production (figure 2-13).
- La modélisation d'entreprises nous permet de définir un cadre du système de production à faire. Pour définir le système à concevoir (To be)<sup>13</sup>, plusieurs vues du système sont nécessaires : une vue fonctionnelle, une vue ressources, une vue information, une vue décisions, une vue organisation entre autres.

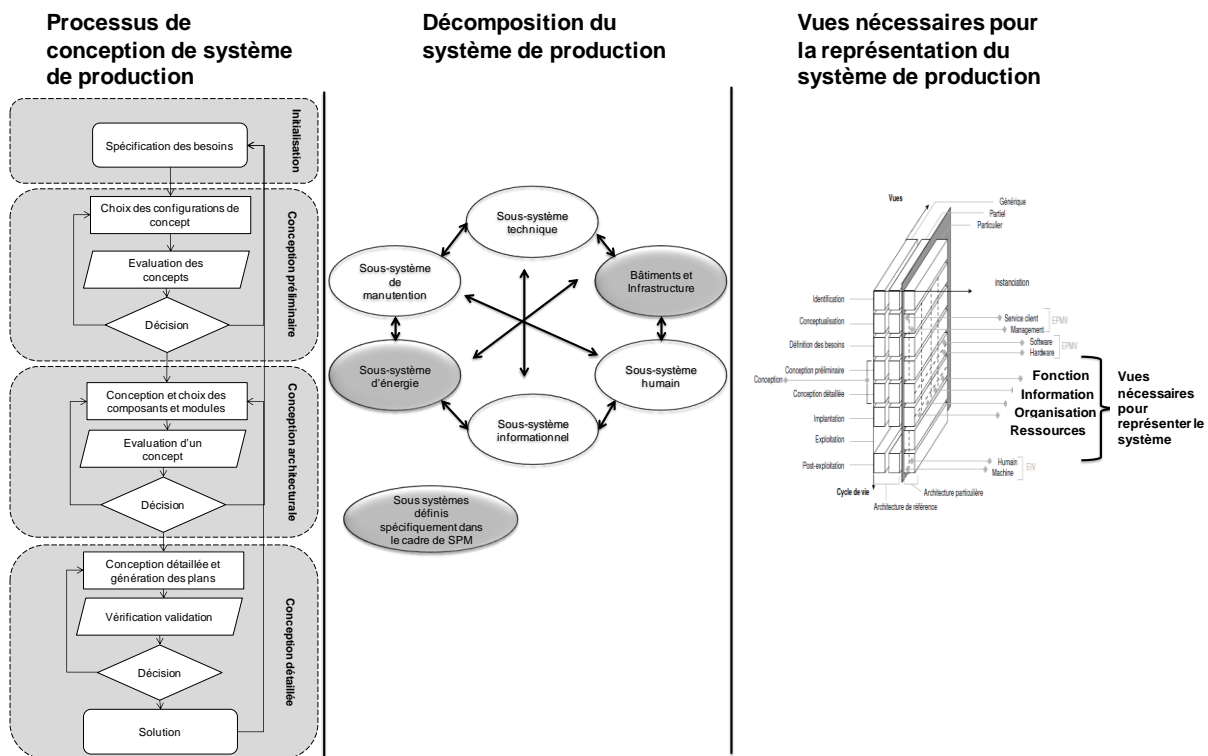


Figure 2-21 synthèses des trois aspects importants retenus dans le chapitre 2

<sup>13</sup> Dans la mesure où le système AS IS est la définition du système traduite par le cahier des charges.

La revue des travaux sur les processus de conception d'un système a révélé deux logiques : la conception à partir d'un existant ou la conception originale à partir d'un besoin. Souvent la conception d'un système de production vise à optimiser un existant ou à l'adapter à de nouvelles spécifications. Dans notre cas on s'intéresse à la conception du système de production pour un site qui part directement des spécifications du cahier des charges et aucune version antérieure du système n'existe. Une contrainte majeure du cahier des charges est la mobilité du système de production. Afin de mieux cerner le concept de mobilité pour les systèmes de production, le chapitre suivant propose de porter plus de lumière sur les spécificités ainsi que les exigences de ce concept innovant dans les systèmes de production.

Les méthodes agrégatives permettent de formaliser les préférences du concepteur à trois stades : les préférences sur les objectifs, la stratégie d'agrégation utilisée et les pondérations relatives.

---

Chapitre  
3

---

3 LE CONCEPT DE MOBILITE

---

" Mobilité : *n.f.*, du latin *mobilitas*. *Propriété, caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction.*" (Larousse 2015).

## Sommaire

---

<b>3</b>	<b>LE CONCEPT DE MOBILITE .....</b>	<b>75</b>
3.1	INTRODUCTION.....	77
3.2	LA MOBILITE : GENERALITES .....	77
3.3	LE CONCEPT DE MOBILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION .....	78
3.3.1	<i>Le concept de mobilité de système de production dans la littérature.....</i>	<i>78</i>
3.3.2	<i>Le besoin de mobilité de système de production .....</i>	<i>86</i>
3.3.3	<i>Les exigences de la mobilité pour un site de production.....</i>	<i>89</i>
3.3.4	<i>Bilan des aspects et contraintes de la mobilité.....</i>	<i>93</i>
3.4	LA CARACTERISATION DE LA MOBILITE DU SPM.....	94
3.4.1	<i>La mesure de la mobilité.....</i>	<i>95</i>
3.4.2	<i>Des indicateurs similaires à l'indice de mobilité.....</i>	<i>96</i>
3.4.3	<i>Bilan des considérations dans l'évaluation de la mobilité .....</i>	<i>97</i>
3.5	PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DU SPM .....	99
3.5.1	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase d'initialisation .....</i>	<i>100</i>
3.5.2	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase préliminaire.....</i>	<i>101</i>
3.5.3	<i>Prise en compte de la mobilité dans la phase de conception architecturale.....</i>	<i>102</i>
3.5.4	<i>Conclusion sur la considération de mobilité dans le processus de conception.....</i>	<i>120</i>
3.6	CONCLUSION DU CHAPITRE 3 .....	120

### 3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre a pour objectif d'aborder le concept de mobilité des systèmes de production. Afin de mieux intégrer la mobilité dans le processus de conception d'un système de production, les spécificités et les contraintes de mobilité doivent être cernées. On note que le cadre qui sera adopté dans ce chapitre est celui d'une mobilité pour un site de production. Les particularités de la mobilité dans un contexte multi sites fera l'objet d'une analyse dans le chapitre 5 (cf. § 5).

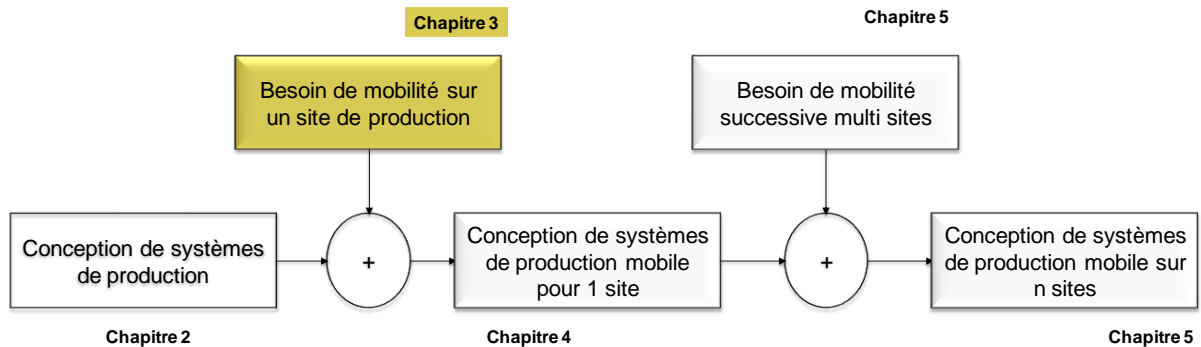


Figure 3-1 positionnement de ce chapitre dans la démarche globale

Nous allons dans un premier temps analyser le concept de mobilité tel qu'il a été abordé dans la littérature afin de formuler une définition de la mobilité d'un système de production. Ensuite, nous allons chercher les aspects à prendre en compte pour l'évaluation de la mobilité. Puis, nous allons proposer une démarche pour construire un indice d'évaluation de la mobilité d'un système de production.

### 3.2 LA MOBILITE : GENERALITES

La mobilité peut être définie, selon le dictionnaire Larousse, comme une "*propriété, caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction*". Ce terme renvoyant à une propriété cinématique est un sujet d'actualité dans plusieurs disciplines. En conductimètre, on évoque la mobilité d'un ion comme sa vitesse de déplacement sous l'effet d'un champ électrique égal à l'unité. En développement urbain, "*la montée des problèmes de congestion routière, des prix du pétrole de plus en plus imprédictibles et de la croissance continue des émissions de carbone, le vieillissement de la population et les questions d'accessibilité, d'exclusion et d'inclusion dus à la dimension spatiale des inégalités sociales, ont contribué à questionner les paradigmes actuels du transport urbain*" (Champagne et Negron-Poblete 2012). Apparue depuis 1992<sup>14</sup>, Le concept de mobilité durable (Bourdages et Champagne 2012) s'intègre de plus en plus dans le vocabulaire politique, technique, scientifique et citoyen. L'enjeu est de "penser" de nouvelles pratiques pour favoriser des villes durables et intelligentes appelant à un renouvellement des

<sup>14</sup>

pratiques de l'urbanisme. Le concept de mobilité durable vient "*renouveler l'intérêt sur les problèmes de transport urbain aujourd'hui et les moyens de les résoudre afin d'opérer le passage entre la société industrielle [...] et une nouvelle société dite urbaine qui reste à penser*" (Bourdages et Champagne 2012). Dans ce sens, plusieurs initiatives sont prises de par le monde afin de sensibiliser et favoriser le développement d'une mobilité durable, par exemple l'agglomération de Bordeaux organise périodiquement le "Challenge de la mobilité" (« Agglomération de Bordeaux - Challenge mobilité Aquitaine » 2015). En sociologie, la mobilité désigne un "*changement de lieu de résidence (mobilité géographique), ou d'activité économique (mobilité professionnelle)*." (Larousse 2015). La mobilité géographique s'intéresse aux formes d'établissement des activités humaines. Dans ce sens, Camagni et al., (2002) identifient deux ressources naturelles rares impactant cette mobilité : les ressources foncières (pour des fins résidentielles) et les ressources énergétiques ( pour des fins de mobilité). Dans le domaine militaire, la mobilité désigne certaines activités de projection des forces militaires sur un nouveau théâtre d'action (McKinzie et Barnes 2004). On reviendra par la suite sur la connotation de mobilité dans ce domaine, puisqu' elle présente certaines similitudes avec notre contexte.

Bien que l'usage du concept de mobilité diffère d'un contexte à un autre, on constate toutefois qu'elle renvoie principalement à une problématique cinématique où on s'intéresserait au mouvement, évolution de l'élément concerné. Cette mobilité est de plus en plus liée à des enjeux de performance durable où les dimensions économiques, sociales et environnementales sont des enjeux majeurs. Cependant, comme le soulevaient Camagni et al., (2002), d'autres facteurs méritent d'être considérés dans l'analyse de la mobilité. Il serait également intéressant de constater que la mobilité peut être analysée à différentes échelles (de l'échelle d'un ion à l'échelle d'une société par exemple). Dans la suite de ce manuscrit, notre intérêt portera sur l'analyse du concept de mobilité des systèmes de production.

### 3.3 LE CONCEPT DE MOBILITE DES SYSTEMES DE PRODUCTION

Dans cette partie, une revue de la littérature concernant le concept de la mobilité est conduite. Puis, on identifiera les facteurs justifiant de l'utilisation de la mobilité dans les systèmes de production ensuite nous allons analyser les particularités d'un SPM vis-à-vis d'un système sédentaire avant de dresser un bilan des aspects et contraintes liés à la mobilité et dont il faut tenir compte dans le processus de conception d'un système de production.

#### 3.3.1 LE CONCEPT DE MOBILITE DE SYSTEME DE PRODUCTION DANS LA LITTERATURE

Le concept de mobilité du système de production a été peu évoqué dans la littérature. Les quelques définitions existantes de la mobilité semblent dépendre des auteurs et des contextes (Stillström et Jackson 2007). La mobilité est également définie à différents niveaux du système de production. On distingue ainsi une mobilité interne au système de production qui

concerne des modules du système (machines, chariots, etc) et une mobilité globale ou externe qui concerne le mouvement de tout le système de production. Ce dernier niveau est analysé à l'échelle de régions géographiques et touche à des considérations stratégiques à moyen et long terme. La description qui va suivre peut se positionner soit à un niveau interne ou externe du système de production.

### 3.3.1.1 LA MOBILITE COMME UNE FLEXIBILITE OPERATIONNELLE

La mobilité opérationnelle (Upton 1995; Koste 1999) est évoquée comme une dimension de flexibilité du système de fabrication, considérée sur un court terme (jour au jour). Elle représente l'aptitude du système de fabrication à basculer, rapidement et avec le minimum d'effort, entre plusieurs gammes de produits définis. Elle correspond à la notion de "facilité de changement" proposée par (Nigel Slack 1987). La mobilité opérationnelle présente l'avantage de réduire les coûts de possession de stock et faciliter la production en "juste-à-temps". Cette aptitude interne de flexibilité, permet ainsi à l'entreprise de devenir compétitive par une réponse rapide aux commandes de ses clients tout en minimisant les stocks de produits (Upton 1995).

On note que les définitions présentées dans ce paragraphe, concernent la mobilité des équipements, de différents niveaux, au sein d'une même usine sur un site figé. Ce niveau peut être qualifié de mobilité de modules (Stillström et Jackson 2007). Cette caractéristique ne conduit pas à un changement de fonctionnalité ou de capacité d'un système de production, mais impacte davantage les délais de reconfiguration de l'usine en facilitant le mouvement des modules et composants (Stillström et Jackson 2007) du système de production.

En se basant sur l'analyse de vingt-deux unités de production de l'industrie papetière, Upton examine particulièrement la relation entre d'un côté la mobilité opérationnelle du système de fabrication et, d'un autre côté, la structure, l'infrastructure et la politique managériale de l'entreprise (Upton 1995). L'expérience des opérateurs est considérée comme un critère pour évaluer l'infrastructure de l'usine. Dans cette étude, Upton considère que la taille de l'installation industrielle ainsi que les technologies d'information n'ont pas d'impact sur la mobilité opérationnelle. Par ailleurs, Upton montre qu'il y a une corrélation négative entre l'expérience des opérateurs et la mobilité opérationnelle (Upton 1995).

Dans le contexte de transformabilité des usines (H.-P. Wiendahl et al. 2007), la mobilité est définie comme une des caractéristiques nécessaires pour faciliter la transformabilité. Dans ce contexte, la mobilité des équipements peut être achevée par exemple en plaçant les machines sur des rouleaux (Nyhuis, Heinen, et Brieke 2007). Afin de représenter la « vue ressources » d'une usine transformable, H.-P. Wiendahl et al., (2007) considèrent quatre niveaux de spécification : Site, segment, système/cellule et station. En effet, la mobilité peut concerner ces quatre niveaux de spécifications (Nyhuis, Heinen, et Brieke 2007).

Dans le paradigme des systèmes de fabrication reconfigurables (RMS : Reconfigurable Manufacturing System) (Koren et al. 1999; ElMaraghy 2005; Koren et Shpitalni 2010), la mobilité est considérée comme une propriété caractérisant les systèmes RMS. Elle concerne la

mobilité des modules et équipement pour faciliter la reconfiguration du système de production sur une localisation géographique figée, en utilisant par exemple des machines sur des rouleaux (H. P. Wiendahl et Heger 2011). Les caractéristiques définissant la reconfigurabilité peuvent être considérées comme des caractéristiques nécessaires ou de support (Koren et Shpitalni 2010). Quand la mobilité concerne des composants du système de production, elle est considérée comme une caractéristique de support (Rösiö 2012).

### 3.3.1.2 LA MOBILITE COMME CARACTERISTIQUE STRATEGIQUE

Dans le contexte des réseaux internationaux de fabrication (International Manufacturing Networks), la mobilité est considérée comme une caractéristique indispensable et un facilitateur pour un réseau de fabrication implanté sur différents sites géographiques (Shi 1998; Miltenburg 2005). Cette caractéristique stratégique permet d'assurer une réactivité dynamique du système à long terme (Shi 1998). Dans ce contexte, Miltenburg définit la mobilité comme la facilité avec laquelle une entreprise peut transférer des produits, processus, ou des personnels entre plusieurs usines, déplacer des usines à de nouvelles localisations, et changer des volumes de production (Miltenburg 2005 p.178). La mobilité est une performance stratégique qui résulte d'une configuration du réseau de production à long terme et qui décrit l'aptitude d'une entreprise à produire sur différentes régions et localisations géographiques (Shi 1998). Une large implantation régionale et mondiale d'une entreprise représente un haut niveau de mobilité. D'autre part, Miltenburg note que le degré de spécialisation d'une entreprise peut négativement impacter l'aptitude de mobilité d'une entreprise. En effet, plus l'entreprise fait appel à des installations industrielles, des processus et des personnels spécialisés, plus son aptitude de mobilité est difficile (Miltenburg 2005 p.179). Enfin, il existe plusieurs facteurs qui peuvent pousser une entreprise à rendre mobile ses produits, processus, personnels ou ses installations : des changements dans les besoins des clients, des facteurs liés à la production, des actions de concurrence, des contraintes réglementaires, ou une nouvelle stratégie de l'entreprise (Miltenburg 2005 p.179).

Le terme de mobilité stratégique est utilisé aussi dans le domaine militaire. Dans ce contexte, la mobilité stratégique désigne certaines activités de projection des forces militaires sur un nouveau théâtre d'action (McKinzie et Barnes 2004). Les opérations liées à la mobilité stratégique sont définies comme une partie des opérations de la logistique stratégique et de la projection des forces (figure 3-2). La problématique de mobilité stratégique pour les militaires consiste à analyser et comparer plusieurs scénarios de déploiement des forces. En particulier, les caractéristiques du site de déploiement (infrastructure, environnement naturel) peuvent avoir un impact sur les décisions de mobilité. Parmi les paramètres d'entrée importants pour les outils de modélisation de la mobilité stratégique on a (McKinzie et Barnes 2004) :

- les exigences transmises : quand et où les cargaisons et les hommes doivent être récupérés et quand et où il faut les livrer.
- les moyens de logistiques : les modes de transport disponibles et leurs capacités, choix des points de transit
- les routes associées pour acheminer les cargaisons et les hommes



- les données sur l'environnement naturel du site de déploiement telles que : changements climatiques, les catastrophes naturelles ou de nature humaines
- les réglementations internationales

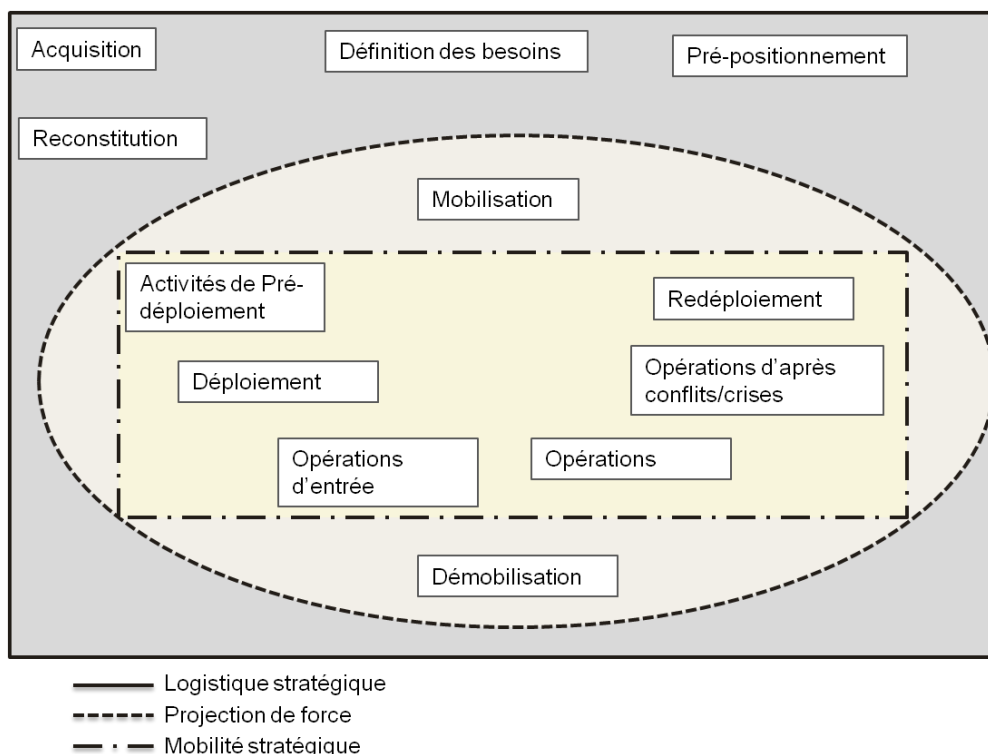


Figure 3-2 hiérarchisation de la logistique stratégique, projection des forces et mobilité stratégique d'après (McKinzie and Barnes 2004)

Bien que dans le domaine industriel et militaire le terme de mobilité stratégique est utilisé, l'analyse des définitions dans les deux domaines révèle que la dimension stratégique n'a pas la même portée. Dans le domaine, industriel la dimension stratégique se positionne à un horizon long terme adoptant une vision sur plusieurs régions géographiques, tandis que dans le domaine militaire, la mobilité stratégique relève d'une dimension à moyen ou court terme considérant des opérations sur un seul théâtre d'action. Si on se réfère à l'échelle d'horizon communément utilisée dans le domaine industriel, la mobilité stratégique telle que utilisée dans le domaine militaire relèverait plutôt d'un niveau tactique voire opérationnel.

### 3.3.1.3 LA MOBILITE GEOGRAPHIQUE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION

Dans la littérature on rencontre des exemples d'unités de production conçues pour être géographiquement mobiles. Stillström et Jackson (2007) présentent le cas de cinq démonstrateurs d'unités de production mobiles développés dans le cadre d'un projet de recherche intitulé "Factory in Box" (Jackson, Wiktorsson, et Bellgran 2008). Dans l'industrie de construction, Rauch discute de l'utilisation d'une cellule de production mobile ou une mini-manufacture mobile qui est installée sur le site de consommation (Erwin Rauch 2015).

Rösiö (2012) introduit la notion de la mobilité de système qui est défini comme la capacité de déplacer l'ensemble du système de production jusqu'à une nouvelle localisation

géographique, avec le moins de sanctions dans les délais, l'effort le coût ou la performance. Pour que le système de production soit facilement déplaçable sur un nouveau site géographique, trois caractéristiques sont requises (Rösiö 2012) :

- la mobilité de ses modules,
- la modularité (JOSE FLORES 2005) et,
- l'intégrabilité.

Toutefois, on note que ces caractéristiques relèvent du point de vue interne du système, et ne tiennent pas compte des caractéristiques de l'environnement externes du système de production. En particulier des propriétés du site géographique telles que l'infrastructure existante et le niveau de développement culturel sur le site.

Dans l'analyse de l'interaction du système avec la localisation géographique, deux typologies de sites sont identifiées (Stillström et Jackson 2007):

3. Base fixe ou localisation stationnaire : Site qui d'où le contrôle du SPM est opéré. Ce site peut servir de base de stockage du SPM pendant les phases de non exploitation.
4. Site de production ou d'implantation : localisation temporaire sur laquelle le système de production sera exploité.

La distance entre la base fixe et le site de production a un impact sur la conception des équipements du système (stratégie de maintenance, conditions opérationnelles), la définition des solutions logistiques, la formation du personnel, le traitement des informations, etc. Outre la distance géographique, d'autres typologies de distance peuvent être identifiées : technologique, culturelle, organisationnelle, etc. Ces dernières typologies de distances sont difficilement identifiables et quantifiables : la distance organisationnelle qui peut être identifiée comme la distance entre les départements, les services ou les niveaux dans la structure organisationnelle d'une entreprise (Stillström et Jackson 2007) est difficile à appréhender. La distance organisationnelle peut avoir un impact sur le traitement et la manipulation des flux d'informations. Par exemple si le SPM est contrôlé et exploité par le même département, alors la communication et les prises de décisions peuvent être simplifiées, et le système mobile pourrait être géré comme dans le cas d'un système sédentaire, même si la distance géographique est importante, tandis que l'échange des flux matériels entre la base fixe et le site de production temporaire dépendent de la distance géographique. La Figure 3-3 synthétise les relations entre les distances géographiques et organisationnelle du SPM, et leurs impacts sur les flux matériels et informationnels.

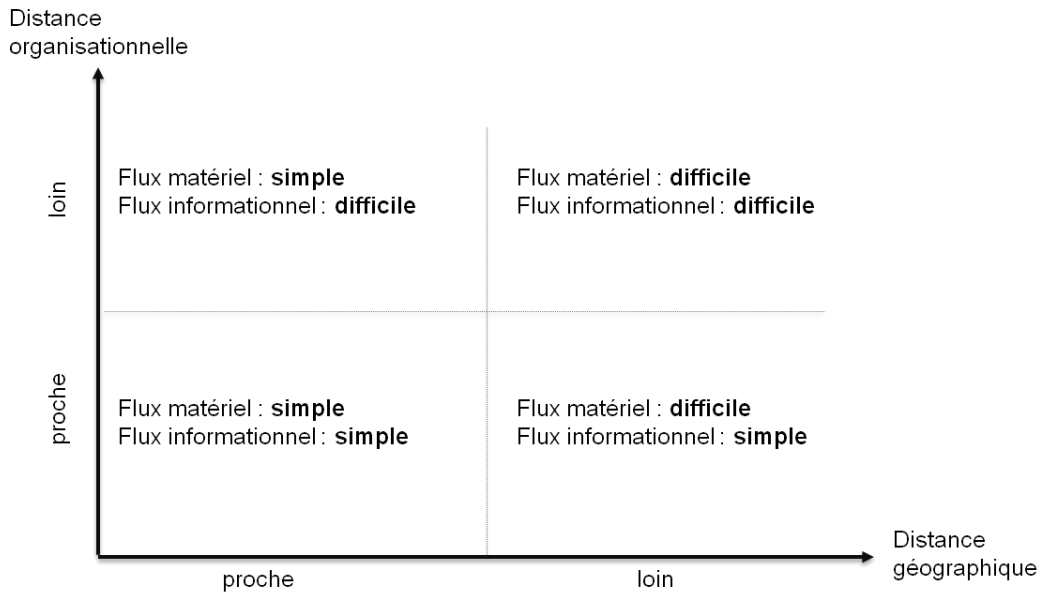


Figure 3-3 Influence de la distance organisationnelle et géographique sur les flux matériels et informationnels.

### 3.3.1.4 SYNTHÈSE DES PRÉSENTATIONS DU CONCEPT DE MOBILITÉ

La mobilité est une caractéristique du système de production qui décrit la facilité de mouvement du système d'un état à un autre. La mobilité peut être analysée soit à l'échelle de l'entreprise ou système de production entier soit spécifiquement à l'échelle de certains de ses composants. Les définitions de la mobilité présentées dans la littérature diffèrent alors dépendamment du contexte et du niveau d'analyse.

A travers cette analyse de la littérature, on a pu noter que d'une part, la mobilité a été d'abord perçue à un niveau opérationnel et interne comme un besoin d'adaptation à des changements à court terme pour accomplir des objectifs de flexibilité entre produits ou pour faciliter une reconfiguration du système de production (cf. 3.3.1.1). D'autre part, dans le contexte des réseaux distribués (cf. § 5.3.1), le terme de mobilité qualifie le niveau de présence d'une entreprise dans certaines zones géographiques et la capacité de cette entreprise à s'introduire facilement dans une région en construisant ou en dupliquant des bases de production fixes (cf. 3.3.1.2).

Dans notre contexte, le même SPM sera amené à produire sur plusieurs régions géographiques. La mobilité géographique du système de production est fortement présente. Les paramètres du site d'implantation doivent être identifiés et renseignés dès la phase de conception. Néanmoins la réalité économique et les incertitudes commerciales font que l'identification de tous les sites de production (qui sont représentés par des clients de l'entreprise) n'est pas aussi facile. Cette identification se fait progressivement. Le processus de conception du SPM doit être adapté à cette contrainte en adoptant une approche de conception progressive et adaptative d'un site à un autre.

La mobilité géographique du système de production peut impacter : les produits, les processus, les installations et le personnel. Dans l'analyse des systèmes de production, souvent

l'aspect mobilité sous-entend uniquement les ressources physiques du système, en terme de machines et moyens de transfert et omis l'aspect humain et informationnel. Bien que la sensibilisation à l'impact de mobilité sur les ressources humaines a été évoqué par (Stillström and Jackson 2007) en terme de besoin de formation du personnel, ou en terme de besoin de développement social et local (Fox 2015), l'analyse de la mobilité souffre d'un manque de méthodologie intégrale qui prend en compte tous les aspects du système de production. Le tableau 3-1 présente une synthèse de quelques aspects qui ont été ou que nous estimons qu'ils doivent être considérés dans l'analyse de la mobilité des systèmes de production.

Tableau 3-1 Synthèse des aspects considérés dans la mobilité

Aspects de la Mobilité	Upton 1993	Shi 1998	Miltburg 2005	Stillström and Jackson 2007)	(Koren and Shpitalni 2010)	(Rösiö 2012)	(Erwin Rauch 2015)	(Fox 2015)	
Analyse stratégique		■	■						
Analyse Opérationnelle	■			■	■	■	■	■	
Echelle module					■				
Echelle système de production				■	■	■			
Aspects techniques					■	■			
Aspects Humains						■		■	
Mobilité géographique				■		■	■	■	
Dépendance du site d'installation								■	
<b>Mobilité sur plusieurs sites</b>									
Méthode de conception							■		
<b>Evaluation de la mobilité</b>									
	■ mentionné	■ Illustré par un exemple	■ Décrit en détail						

On constate par exemple que certains aspects de la mobilité telles que la considération d'une mobilité sur plusieurs sites ou l'évaluation de la mobilité, à notre connaissance, n'ont pas été abordés.

#### 3.3.1.4.1 DEFINITION ET PERIMETRE DE MOBILITE

La *mobilité du système de production* est présentée comme l'aptitude du système de production défini par ses ressources techniques, humaines et informationnelles, à se déplacer et produire sur une plusieurs localisations géographiques successivement. Cette définition de la mobilité du système de production inclut deux aspects :

- la transportabilité : le système de production doit être transportable, et doit s'adapter aux contraintes des différents modes de transport (routier, maritime,...).
- l'opérationnalité : désigne l'aptitude du système à être rapidement opérationnel sur les différents sites géographiques pour lesquels il est conçu.

Le terme mobilité successive multi-sites désigne que le même système de production va opérer sur plusieurs sites de production l'un après l'autre. Le principe de successivité diffère de la notion de production multi-sites; qui sous-entend que plusieurs systèmes de production fixes ou mobiles produisent en même temps sur plusieurs sites géographiques. Nous reviendrons dans le chapitre 5 sur le concept de mobilité successive multi-sites.

*La mobilité du système de production se présente comme l'aptitude du système de production défini par ses ressources techniques, humaines et informationnelles à se déplacer et produire sur plusieurs localisations géographiques successivement. Cette aptitude de mobilité tient compte de deux aspects : la transportabilité et l'opérationnalité du système.*

D'autre part, le SPM doit faire face à plusieurs changements, ces changements peuvent induire une nécessité d'adaptation de la capacité et/ou de la capabilité du système de production. Pour faire face à ces changements, une reconfiguration physique ou logique du système de production peut être requise (Koren et Shpitalni 2010). De ce fait, en fonction de l'environnement du système de production, le système doit être mobile et reconfigurable. A ce titre, il semble être opportun de clarifier les différences et complémentarités entre le concept de mobilité et de reconfigurabilité. En effet, comme expliqué ci-dessus, le SPM (*mobilité du système* au sens de (Stillström et Jackson 2007)) peut être en plus reconfigurable et, la reconfiguration du système de production (externe) peut être facilitée par la mobilité des composants (internes) du système de production (*mobilité des modules* au sens de (Stillström et Jackson 2007)). La figure 3-4 synthétise le positionnement des concepts de mobilité et de reconfigurabilité.

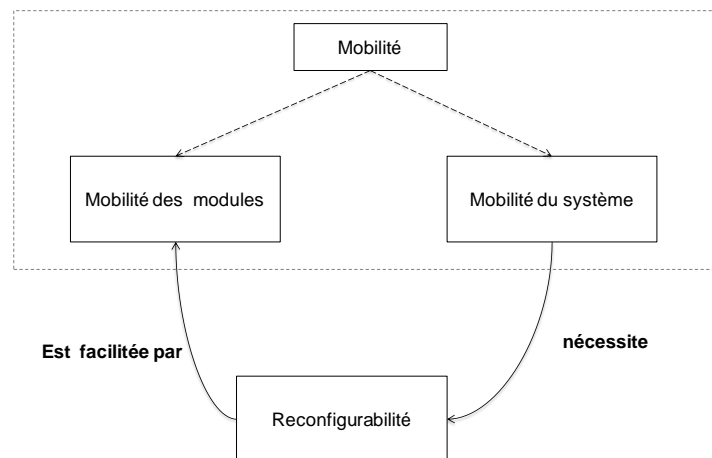


Figure 3-4 positionnement de la mobilité par rapport à la reconfigurabilité

Le SPM peut être exploité sur des localisations géographiques peu peuplées, à l'instar des applications dans le domaine de l'énergie solaire où souvent les sites d'implantations sont situés dans des régions désertiques. La mobilité des ressources humaines impose la prise en compte de la base de vie sur site. Sa considération est importante car : d'une part, tous les équipements nécessaires représentent un investissement et donc ont un poids économique, d'autre part, les activités liées à l'acheminement et l'installation de ces équipements sur site peuvent avoir un impact sur les objectifs du projet (coût, délai) et nécessitent de consacrer une partie des ressources disponibles. Dans notre cas, pour des raisons de découpage du projet initial, la base de vie ne sera pas intégrée dans le champ de nos considérations.

Après avoir clarifié la signification du concept de mobilité, nous nous attachons à identifier les facteurs qui peuvent déclencher un besoin de mobilité.

### 3.3.2 LE BESOIN DE MOBILITE DE SYSTEME DE PRODUCTION

La mobilité permet de répondre à des objectifs de performances : opérationnelles, stratégiques, techniques ou de développement durable.

#### 3.3.2.1 LA MOBILITE POUR AMELIORER DES PERFORMANCES OPERATIONNELLES :

Les performances opérationnelles peuvent concerner un besoin de flexibilité, de réduction des coûts, de synchronisation des flux physiques ou d'amélioration de l'adaptabilité face à certains aléas.

##### 3.3.2.1.1 LE RECOURS AU CONCEPT DE MOBILITE POUR AMELIORER LA FLEXIBILITE DU SYSTEME DE PRODUCTION

Dans la littérature dix types de flexibilité du système de fabrication sont identifiés (ElMaraghy 2005). Parmi ces types de flexibilité, le concept de mobilité du système de production peut être perçu comme un facilitateur pour accomplir trois types de flexibilité :

- la *flexibilité de la capacité du système* qui peut concerner un besoin de capacité supplémentaire et occasionnelle afin de s'adapter à une montée de charge de travail. Dans cet objectif, un ou plusieurs équipements mobiles peuvent être, temporairement, ajoutés à une ligne de production pour augmenter sa capacité.
- la *flexibilité de production*. Lorsque le même équipement de fabrication est occasionnellement nécessaire dans plusieurs départements géographiquement dispersés, un seul équipement mobile peut être partagé entre ces différents sites au lieu d'investir dans plusieurs équipements identiques.
- la *flexibilité de produit*. Lorsqu'un nouveau produit est introduit à un mix déjà existant, la mobilité des équipements peut être un atout pour mener facilement la reconfiguration du système de production pour s'adapter à ce changement.

##### 3.3.2.1.2 LE RECOURS AU CONCEPT DE MOBILITE POUR REDUIRE LES COUTS DE FABRICATION DES PRODUITS

La mobilité peut être une solution pour fabriquer des produits moins chers que dans le cadre d'une usine fixe. Cet avantage économique repose sur certains facteurs clés :

- *Réduire le coût d'investissement en terrain* : le coût d'investissement en terrain est souvent économisé et négligeable car le site d'exploitation est déjà disponible pour le projet global dans lequel le système mobile est utilisé. En outre, pendant sa phase d'inutilisation, le SPM doit alors être stocké. Dans ce cas un terrain peut être nécessaire.
- *Réduire les Coûts logistiques* : Dans le cas de produits encombrants qui sont fabriqués en grande série, les coûts logistiques liés à l'acheminement de ces produits jusqu'au site final sont importants. Une solution économique est de transporter alors de la matière première compacte et de la transformer sur le site final en utilisant un SPM.
- *Des coûts de ressources humaines* : Les coûts de ressources humaines représentent une part importante du coût de revient du produit final<sup>15</sup>. L'utilisation de la main d'œuvre locale donne un avantage économique important. D'un côté, le principe de l'usine mobile oblige d'avoir une équipe d'experts qui aura la charge de maintenir le bon fonctionnement de l'usine mobile et d'encadrer les équipes locales. Le coût de cette équipe experte est loin d'être négligeable et a un poids important dans le coût de revient des produits.
- *Réduire les coûts d'emballage des produits* : Fox (2015) justifie que la production directe sur le site final par usine mobile se dispense de l'utilisation d'emballage pour les produits. Ce qui présente un avantage économique et environnemental.

#### 3.3.2.1.3 LE RECOURS AU CONCEPT DE MOBILITE POUR SYNCHRONISER DES FLUX (JUSTE A TEMPS)

Dans le domaine de la construction, les produits finis doivent être délivrés sur le site de construction en juste-à-temps avec des temps de cycles réduits et un minimum de stock toléré sur site (Erwin Rauch 2015). Pour satisfaire ces contraintes, une synchronisation des flux physiques entre le fournisseur (usine de fabrication) et le client (site de construction) est alors nécessaire. Des usines de fabrication mobiles permettent de répondre à cette contrainte en assurant une production sur demande et, en réduisant les distances de transport entre les lignes de fabrication des composants et le site d'installation. La synchronisation des flux permet de minimiser les stocks de produits finis sur le site d'exploitation, mais l'usine mobile a besoin d'un approvisionnement en matière première qui doit être assuré jusqu'au site d'exploitation. La gestion d'approvisionnement en matière première et le coût de possession de stock sur site doivent donc être pris en compte.

#### 3.3.2.1.4 LA MOBILITE POUR AMELIORER LA REACTIVITE AUX ALEAS

La proximité du système de production de son client final (interne ou externe) favorise la communication et améliore la réactivité face aux aléas de production ou d'installation, ou lorsque les pièces à fabriquer présentent une complexité qui nécessite de les adapter (Erwin Rauch 2015). Les aléas peuvent être détectés et résolus rapidement. D'un autre côté, les aléas peuvent être aussi présents sur l'activité d'approvisionnement des pièces finis. Lorsqu'il y a une grande incertitude sur la livraison des composants finis, la matière première peut être approvisionnée et stockée sur site avant d'être transformée sur site par le SPM.

---

<sup>15</sup> Un rapport de 50% du coût de fabrication a été observé dans le cadre du projet SolR<sup>2</sup>

### 3.3.2.2 LA MOBILITE POUR ATTEINDRE DES OBJECTIFS STRATEGIQUES

Un client (entreprise ou institution d'intérêt public) peut exiger qu'une certaine partie de la production soit assurée localement dans le pays en recrutant du personnel local (Jackson et Zaman 2007). La construction locale d'installations fixes qui sont abandonnées aussitôt que la commande est livrée, peut s'avérer coûteuse. Grâce à une capacité de production mobile, une entreprise peut remporter une commande et produire économiquement dans le pays du client tout en gardant le contrôle sur la production (Stillström et Jackson 2007). En conséquence posséder une capacité de fabrication mobile est un facilitateur pour répondre aux exigences des clients vis-à-vis de la création d'emplois locaux et se positionner ainsi sur de nouveaux marchés.

### 3.3.2.3 LA MOBILITE POUR SATISFAIRE DES CONTRAINTES DE FAISABILITE TECHNIQUE

La mobilité est une solution pour répondre à des contraintes d'ordre techniques, telles que :

- transport difficile ou impossible de produits finis due à des composants encombrants ou lourds.
- livraison de produits à forte valeur ajoutée et qui sont sensibles aux phases de transport (casse de miroirs, produits agricole frais...)
- besoin de livraison en juste-à temps pour cause de temps de cycle réduit où le produit devient inutilisable (exemple : centrale à béton, centrale à enrobé) ou pour éviter des retards de construction.

### 3.3.2.4 LA MOBILITE POUR PROMOUVOIR UN DEVELOPPEMENT DURABLE

Les usines mobiles représentent un vecteur de développement durable dans les pays en voie de développement. Grâce à la création d'emploi local et la possibilité d'industrialisation de produits locaux au lieu d'exporter de la matière première brute. En l'occurrence deux facteurs font obstacle au développement de moyens industriels (Fox 2015) : la rareté de la main d'œuvre qualifié et le manque d'infrastructure. Fox argumente que des SPMs peuvent être conçus pour satisfaire ces deux contraintes et être opérationnels dans ces environnements.

Pour remédier au manque de qualification (Fox 2015) suggère que : (1) les opérations demandés aux opérateurs doivent se limiter à des tâches simples. (2) la conception des processus de fabrication doit tenir compte du niveau de qualification disponible et doit s'appuyer sur des méthodes comme les méthodes "task design" ou les méthodes six sigma (3) Enfin Fox note le besoin d'un management intermédiaire constitué d'ingénieurs locaux qui auront par exemple la charge d'appliquer les méthodes six sigma. Quant au manque d'infrastructures tels que des routes ou des sources d'énergie, Fox justifie, en s'appuyant sur des exemples du domaine agriculture, qu'une usine mobile peut s'adapter au manque de routes développés et par l'utilisation d'équipements propres pour s'approvisionner en énergie (générateur diesel, panneaux solaires..). Le besoin d'infrastructure développé dépend de la sensibilité des processus utilisés.



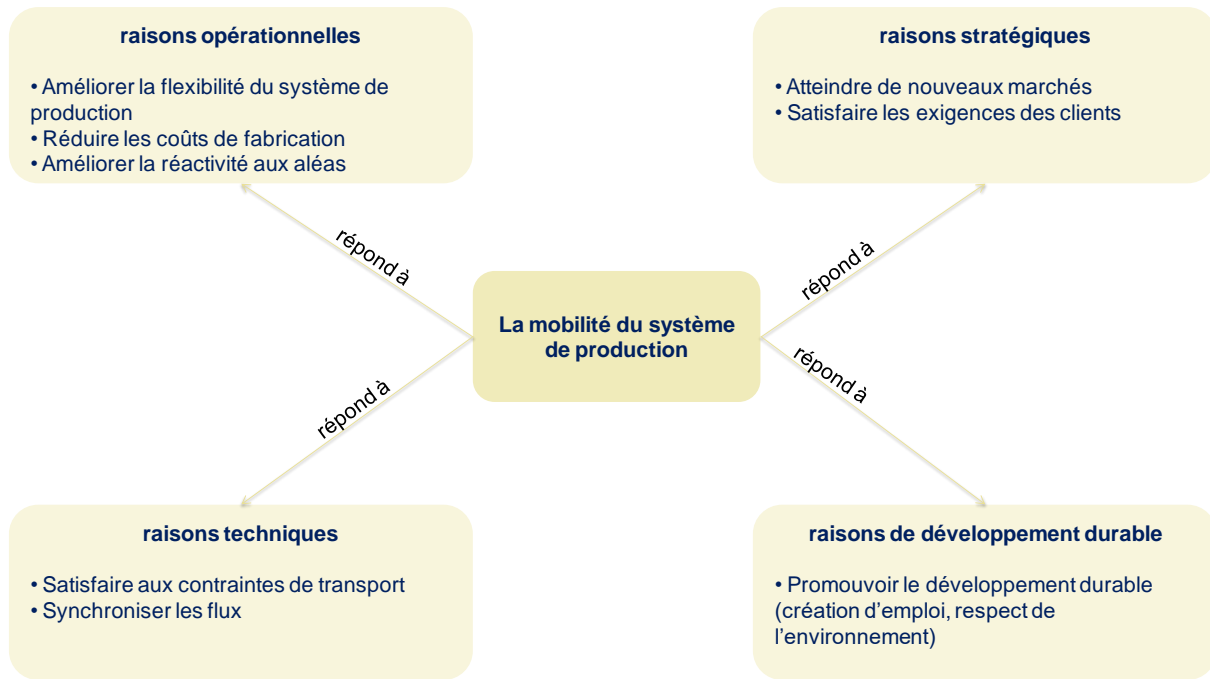


Figure 3-5 Les différents cas justifiant l'utilisation du concept de mobilité

Le concept de mobilité peut être ainsi justifiable dans les différents cas susmentionnés (figure 3-5). Toutefois, la mobilité apporte certaines différences par rapport aux systèmes de production sédentaires. Le paragraphe suivant a pour objectif de discuter certaines particularités liées à la mobilité.

### 3.3.3 LES EXIGENCES DE LA MOBILITE POUR UN SITE DE PRODUCTION

Le concept de mobilité présente certaines spécificités qui appellent à une adaptation des méthodes d'analyse des systèmes de production. Dans ce chapitre, on se positionne dans le contexte où le SPM doit être adapté pour le cas d'un seul site de production. Dans ce cadre, les spécificités de la mobilité (pour un seul site) concernent le besoin d'intégration de nouvelles phases de vie opérationnelles du SPM : la considération de la mobilité des modules, la gestion de la maintenance sur site, le besoin d'une structure organisationnelle adaptable, l'intégration des contraintes de disponibilité de l'énergie sur site, l'adaptation de la chaîne logistique amont du SPM et enfin le besoin d'une adaptation de la structure interne du SPM.

#### 3.3.3.1 LE CYCLE DE VIE DU SPM

Le cycle de vie d'un système est caractérisé par des phases de vie au cours desquelles le système se trouve dans différents stades (Fiorèse et Meinadier 2012):

- 6 Avant sa mise en service, le système doit être conceptualisé, développé, vérifié, produit.
- 7 A partir de sa mise en service, le système doit être déployé, exploité et maintenu en condition opérationnelle puis retiré du service (avec traitement de fin de vie : démantèlement, recyclage).

Au cours de son exploitation (ou la phase d'opérations pour reprendre le terme utilisé par GERAM), le SPM est d'abord mis en service sur son site d'utilisation, avant d'être exploité pour la production. Tout au long de cette phase, des opérations de maintenance et de configuration sont réalisées pour adapter son comportement de façon à répondre au mieux aux performances attendues. A l'encontre des systèmes de production sédentaires, le besoin de mobilité du système fait appel à d'autres phases opérationnelles (Figure 3-6-II) :

- *Phase de transport (a)*: le SPM est conditionné et acheminé jusqu'à son site d'implantation
- *Phase de montage sur site (b)*: Le SPM, arrivé sur site sous forme de modules et composants indépendants, est alors intégré monté. Au préalable, des opérations de préparation du site sont réalisées. Une fois l'usine montée, les différentes opérations de vérification et de mise en service sont effectuées.
- *Phase de production sur site (c)* : l'usine est utilisée pour produire. Des opérations de maintenance sont nécessaires pour maintenir les performances du système.
- *Phase de diagnostic et contrôle (d)* : à la fin de la phase de production, tous les modules sont diagnostiqués pour s'assurer que l'usine mobile sera opérationnelle pour la prochaine campagne de production. Les composants nécessitant une maintenance lourde ou un remplacement sont identifiés. Des commandes de remplacement sont lancées à cette phase.
- *Phase de démontage (e)* : l'usine est démontée. Les différents modules et composants sont conditionnés et préparés pour la phase de transport.
- *Phase de transport (f)* : Le système de production démonté et mis en configuration de transport, deux scénarios sont possibles en fonction de la stratégie commerciale de l'entreprise:
  - 1 : Une autre commande est passée et un nouveau site est identifié. Le SPM est acheminé vers ce nouveau site et le cycle, reprend la phase **(b)**.
  - 2 : Le carnet de commande n'est pas rempli, et aucun nouveau site n'est encore identifié. Alors le SPM est acheminé vers sa base de stockage qui correspond à la phase **(g)**. En fonction des négociations avec le gestionnaire (client, institution...) du site où le système vient d'être mobilisé, la phase de stockage du SPM peut être envisagé sur le premier site dans l'attente d'une nouvelle commande.
- *Phase de stockage (g)* : Lors des phases d'inexploitation du SPM, ses modules doivent être stockés en attendant une nouvelle commande. Le stockage peut avoir lieu sur le site stationnaire, ou sur le dernier site d'exploitation pour rester au plus proche de son marché. Durant cette phase des opérations de maintenance lourde (entretien ou remplacement de machines, reconfiguration de modules) peuvent être conduites. D'autre part, des contraintes réglementaires (*Décret n°77-1043 1977*) recommandent des opérations de contrôle périodiques pour assurer la sécurité des conteneurs maritimes.

L'identification des phases de vie est importante car l'évaluation de la performance globale (coût, délai, etc.) du système en dépend.

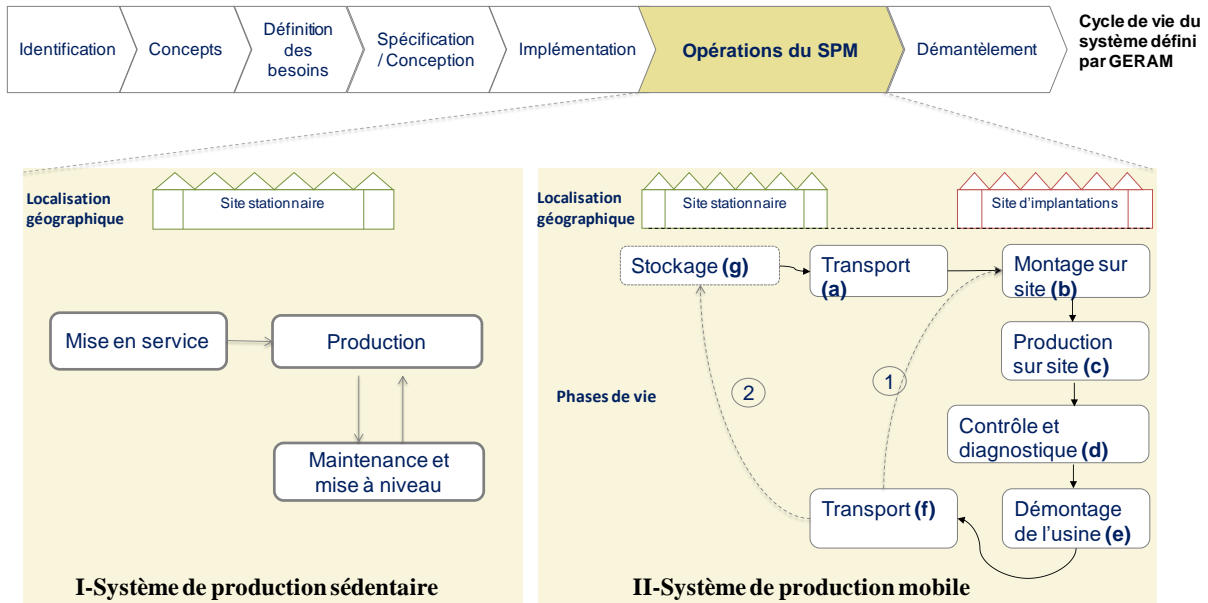


Figure 3-6 Les phases de vie du SPM

En marge de cette analyse, on note le besoin de représentation du système selon plusieurs points de vues. En l'occurrence, la figure 3-6 met en avant le besoin d'intégration d'une vue fonctionnelle pour analyser les phases de vie opérationnelles du SPM et une vue spatiale distinguant les différents types de localisations géographiques liées au concept de mobilité du système.

### 3.3.3.2 LA MOBILITE DES EQUIPEMENTS

La mobilité des modules du système de production signifie que chaque module doit être transportable et opérationnel sur site. Pour être transportable, la modularité est d'abord un facilitateur de la mobilité des composants. Ensuite, le poids et le volume de chaque module doivent être admissibles par les modes de transport. En outre, les modules doivent résister aux différentes contraintes de transport (choc mécanique, exigence d'étanchéité). Enfin, l'opérationnalité sur site des équipements : les équipements doivent s'adapter aux sources d'énergie disponibles sur site. Les équipements doivent être facilement intégrables et mis en service.

### 3.3.3.3 LA GESTION DE MAINTENANCE SUR SITE

Le maintien de la performance du système pendant la phase d'exploitation nécessite de mener une stratégie de production qui doit tenir compte de la durée de présence du système de production sur le site d'implantation pour minimiser le besoin d'arrêt du système. D'autre part pour mener des interventions sur le site la gestion de la chaîne d'approvisionnement des pièces de rechange doit s'adapter en fonction de la mobilité du système de production.

### 3.3.3.4 LES ASPECTS ORGANISATIONNELS ET DE FORMATION

La mobilité géographique du système de production conduit au besoin d'adaptation du niveau d'automatisation nécessaire à la qualification du personnel disponible sur site. Pour assurer

une indépendance du système de production vis-à-vis de la qualification des opérateurs site, le niveau d'automatisation du système de production doit être adapté. Un niveau d'automatisation accrue signifie une complexité accrue et nécessite une certaine expertise pour assurer le maintien en fonctionnement du système mobile. D'autre part, Fox rappelle le besoin d'un management intermédiaire local qualifié, qui fait le lien entre le personnel étranger et la population locale, et qui se charge d'appliquer les bonnes pratiques (Fox 2015). La mobilité du système signifie qu'une nouvelle équipe intervient sur le système pour chaque nouveau site d'implantation (Olsson, Hedelind, et Ahmed 2007) ; d'où le besoin d'assurer des formations pour les opérateurs pour l'utilisation du système de production.

### 3.3.3.5 L'APPROVISIONNEMENT EN ENERGIE

En fonction des caractéristiques de chaque site d'implantation, la question d'approvisionnement en énergie se pose à chaque fois. L'autonomie du SPM dépend de sa capacité d'être indépendant en approvisionnement de l'énergie nécessaire pour le fonctionnement de ses ressources (Erwin Rauch 2015). Le système d'approvisionnement d'énergie peut être basé sur des générateurs diesel et l'usine mobile peut utiliser aussi des panneaux solaires pour fournir de l'énergie nécessaire (Fox 2015). La question de consommation énergétique (en nature et quantité) peut être un facteur déterminant dans le choix des ressources constituant le SPM.

### 3.3.3.6 LA CONFIGURATION DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE

Le besoin de produire, économiquement, au plus près du marché final conduit à considérer des SPMs qui sont capables de se déployer rapidement sur chaque site de production temporaire. Les sites géographiques de production peuvent être de natures différentes. La conception du SPM doit tenir compte des caractéristiques propres à chaque site de production. La mobilité ne se limite pas uniquement au mouvement des ressources constituant le système de production. Elle concerne aussi la capacité d'assurer l'approvisionnement en composants et matières nécessaires pour être capable de produire sur chaque site d'implantation.

Le SPM n'est, en fait, qu'un nœud d'une chaîne logistique globale. Les fournisseurs et les clients ayant des localisations géographiques fixes, la mobilité du système de production engendre donc une reconfigurabilité de la chaîne logistique globale. Ainsi le besoin de mobilité du système de production déclenche un besoin d'adaptation ou de reconfiguration de la chaîne logistique pour chaque nouveau site (Nyhuis, Heinen, et Brieke 2007). Par ailleurs, en fonction de l'environnement de chaque site (coût de main d'œuvre, coût de fournisseur, éloignement par rapport aux fournisseurs, existence de fournisseurs locaux qualifiés), la question de sous-traiter certains composants ou produits ou de les réaliser en interne se pose. Cette décision a un impact sur l'organisation interne du système de production, mais détermine fortement la configuration de la chaîne logistique globale (choix des fournisseurs locaux, gestion des approvisionnements...). La décision de faire ou faire-faire est une décision complexe car au-delà du critère économique, d'autres critères doivent être prises en compte (McIvor, Humphreys, et McAleer 1997).

### 3.3.3.7 LA NECESSITE D'ADAPTATION A DES CHANGEMENTS FREQUENTS

Chaque nouvelle demande d'implantation est unique : nouveau site, produit qui peut être modifié, et volume à produire variable. Ces changements peuvent avoir une fréquence de quelques mois à quelques années.

La dépendance vis-à-vis du site de production a un impact sur la définition du système de production. En effet, le choix des ressources internes du système de production dépend en partie de l'environnement du site de production (disponibilité d'énergie, de ressources qualifié, températures de travail...). Le système de production doit s'adapter au changement de site de production.

Le produit fabriqué par le SPM et qui doit être installé localement peut dépendre des caractéristiques du site d'implantation. Pour chaque nouveau site de production, des modifications doivent être apportées au produit fabriqué. Les fonctionnalités du SPM doivent être changées pour s'adapter aux modifications sur les produits.

Enfin, la demande en terme de quantité de produit nécessite d'adapter la capacité de production du système de production. Le carnet de commande étant variable, un changement de capacité de production nécessite d'ajouter ou de supprimer des machines ou lignes de production (Putnik et al. 2013).

### 3.3.4 BILAN DES ASPECTS ET CONTRAINTES DE LA MOBILITE

La mobilité est définie selon deux niveaux : la mobilité des équipements et la mobilité du système de production. La mobilité du système de production impacte tous les aspects du système de production.

Le recours à des SPMs peut être justifié pour diverses raisons. D'un côté, des unités mobiles peuvent être mises en place dans le but d'accroître des performances opérationnelles, telles que l'amélioration de la flexibilité ou la réactivité d'un système de production, la synchronisation des flux en privilégiant une production en juste-à-temps ou la réduction des coûts de fabrication. D'un autre côté, la mobilité peut être un levier stratégique pour faciliter le positionnement sur de nouveaux marchés. En plus, l'utilisation de SPMs est un vecteur de développement durable en favorisant la création d'emploi local dans des régions en voie de développement.

Toutefois, la mobilité nécessite de prendre en compte des aspects supplémentaires. Certains aspects sont abordés dans la partie (§ 3.3.3). D'un point de vue cycle de vie, la mobilité nécessite la considération des phases de mobilisation, utilisation et démobilisation du système de production pour tout nouveau site d'implantation. A ce titre, le processus de conception des équipements utilisés doit tenir compte du déplacement fréquent et des contraintes liées aux différentes phases de transport, mais aussi à l'adaptation au contexte du site de production. L'aptitude de reconfigurabilité du SPM est une caractéristique nécessaire pour adapter la structure du système face aux différents changements : changement de site, modification des produits, carnet de commande variable. Cette aptitude d'adaptation dépasse le cadre du

système de production et concerne toute la configuration (externe) de la chaîne logistique amont.

Le concept de mobilité est le plus souvent analysé d'un point de vue interne au système de production et se limitant aux aspects techniques (mobilité des machines, d'équipement, etc.). Bien que la sensibilisation à la prise en compte d'aspects humains liés à la disponibilité de la qualification sur site ait été évoquée (Stillström et Jackson 2007; Fox 2015), cette sensibilisation reste au stade du constat et aucune démarche d'analyse n'est formalisée.

En somme, les aspects liés à la mobilité peuvent être définis selon deux niveaux : la mobilité d'un module de production et la mobilité du système de production.

**Table 1 Synthèse des aspects important dans la mobilité évoqués dans littérature**

	<b>Aspects de mobilité évoqués</b>	<b>Cité par</b>
<b>Mobilité d'un module de production</b>	Niveau d'automatisation des process	
	Poids et volume des composants (machines, moyens de manutention)	(Rösiö 2013)
	Robustesse (maintien de la qualité au cours de plusieurs déplacements)	
<b>Mobilité d'un système de production</b>	Distance géographique et organisationnelle	(Stillström et Jackson 2007)
	Niveau d'interaction entre le site de contrôle et le site de déploiement du SPM	
	Qualité des infrastructures existantes sur site	(Fox 2015)
	Disponibilité de la qualification	(Fox 2015)

Au cours de la conception d'un SPM, un choix doit être effectué entre plusieurs architectures possibles du système de production. Cette décision doit se baser sur plusieurs critères. Le critère de mobilité est un critère important. De ce fait, la définition et la quantification d'un indice de mobilité pour un système de production est nécessaire. La partie qui suit a pour objectif de proposer une démarche d'évaluation d'un indice de mobilité.

### 3.4 LA CARACTERISATION DE LA MOBILITE DU SPM

Dans l'objectif de proposer une démarche de définition, quantification et interprétation d'un indice de mobilité, on passera d'abord en revue les travaux qui ont abordé l'évaluation de la mobilité, cette analyse sera élargie à d'autres travaux qui se sont intéressés à la mise en place

d'indicateurs liés à la caractérisation de systèmes de production. Ensuite nous exposerons notre démarche pour aboutir à la mise en place d'un indice pour évaluer la mobilité d'un système de production.

### 3.4.1 LA MESURE DE LA MOBILITE

Dans le contexte de la mobilité opérationnelle définie dans (§ 3.3.1.1), (Gupta et Buzacott 1989) considèrent seulement le temps de transition entre produits pour évaluer la facilité de changement entre un mix de produits. (Nigel Slack 1987) évoque l'utilisation du temps et du coût du fait de leur interdépendance. (Upton 1995) prend en compte l'effort de transition et intègre aussi l'aptitude de subir des pénalités de transition. Ces pénalités de transition ne concernent pas les coûts nécessaires pour acquérir ou développer une gamme de flexibilité (Koste 1999). Elles peuvent inclure en l'occurrence le temps et le coût de perte de production, la planification des efforts (temps manageriel) nécessaires pour effectuer la transition, ou les rebuts ou retouches qui sont dus à la transition. L'ensemble des pénalités de transition peuvent être converties en une forme agrégée en temps et coût (Koste 1999).

D'autre part, dans un contexte de mobilité stratégique, Miltenburg et Shi (2005) lient la mobilité à deux aspects : (1) l'aptitude de produire sur une large zone géographique et (2) la notion de spécialisation. Pour le premier aspect, une large implantation régionale et mondiale d'une entreprise représente un haut niveau de mobilité. Quant au deuxième aspect lié à la spécialisation, Miltenburg note que le degré de spécialisation d'une entreprise peut négativement impacter l'aptitude de mobilité d'une entreprise. En effet, plus l'entreprise fait appel à des installations industriels, des processus et des personnels spécialisés, plus son aptitude de mobilité est difficile (Miltenburg 2005 p.179). Enfin, dans le contexte des réseaux de production internationaux, une entreprise peut être amené à rendre mobile des produits, processus, personnels et des installations.

Afin de qualifier la mobilité des modules et composants du système de production, Rösiö qualifie la mobilité d'un équipement en analysant (Rösiö 2013) :

- le niveau d'automatisation du module : moins le module est automatisé plus il est mobile
- le poids du module : plus le module est léger plus il est mobile
- le maintien de qualité : plus le module est instable, moins il est mobile.

Pour qualifier la mobilité d'un système de production, (Erwin Rauch 2015) considère trois aspects : (1) La mobilité de machines ou composants singuliers dans le système de fabrication, caractérisé par exemples par des machines sur des roues ; (2) la transportabilité du système de production entier jusqu'au site d'implantation, caractérisé par une unité de production dans des containers (20ft ou 40ft) et, (3) la mobilité du système de production sur le site d'implantation.

Dans la perspective de proposer une démarche d'évaluation de l'indice de mobilité, nous élargissons notre champ d'analyse à d'autres travaux qui se sont intéressés à la définition de

mesures quantifiables pour des paramètres structuraux des systèmes de production. Le paragraphe suivant a pour objectif de présenter quelques un de ces indicateurs.

### 3.4.2 DES INDICATEURS SIMILAIRES A L'INDICE DE MOBILITE

Partant du constat que l'indice de mobilité n'a pas été formellement identifié dans la littérature, cette partie vise à passer en revue des indicateurs similaires à l'indice de mobilité, et qui nous permettront de construire notre apport. Le choix des indicateurs qui seront présentés par la suite, est basé sur deux critères:

- *Similitude de construction* : nous focalisons sur des indices identifiés pour des systèmes de production et qui s'intéressent à l'évaluation de caractéristique des systèmes de production, en tenant compte de tous les aspects du système de production.
- *Similitude d'utilisation*: nous nous intéressons aux indices qui permettent de comparer plusieurs configurations du système de production dans le but d'alimenter un modèle d'aide à la décision pour le choix d'une ou plusieurs configurations.

#### 3.4.2.1 INDICATEUR DE FACILITE DE RECONFIGURABILITE (RSI<sup>16</sup>)

L'indicateur RSI (Reconfiguration Smoothness Indicator) est proposé dans les travaux de Youssef et ElMaraghy (2006) sur les systèmes de fabrication reconfigurables. Il reflète la facilité de transformer le système de production d'une configuration à une autre. La définition de l'indicateur tient compte de 3 composantes qui représentent les différents niveaux de reconfiguration: la facilité de reconfiguration liée au marché (TRS<sup>17</sup>), la facilité de reconfiguration liée au système (SRS<sup>18</sup>) et la facilité de reconfiguration liée à la machine (MRS<sup>19</sup>).

- TRS reflète le coût, délai et l'effort requis pour accomplir des activités au niveau du marché. Ces activités incluent le marketing, les appels d'offres, activités financières qui sont relation avec: achat/location de nouvelles machines,
- SRS concerne les activités: (1) d'ajout ou suppression des machines/stations ou une phases complète du système, (2) de relocalisation de machines/stations ou stages complets d'un localisation à une autre dans le système et, (3) d'augmenter/diminuer le nombre des moyens de manutentions entre les phases qui en en fonction du nombre de machines /stations dans chaque phase.
- MRS concerne les activités d'ajout suppression de modules de machines et d'ajout / suppression d'un regroupement (cluster) d'opérations.

La facilité de reconfiguration est définie comme la pondération de ces 3 critères (cf. formule (9)) :

<sup>16</sup> Reconfiguration Smoothness Indicator

<sup>17</sup> Market-level Reconfiguration Smoothness

<sup>18</sup> System-level Reconfiguration Smoothness

<sup>19</sup> Machine-level Reconfiguration Smoothness



$$RS = \alpha TRS + \beta SRS + \gamma MRS \quad (9)$$

( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) reflétant l'importance donnée par le décideur aux poids de chacun des 3 critères (TRS, SRS, MRS), avec

$$\alpha + \beta + \gamma = 1 \quad (10)$$

Cet indicateur permet de faire le lien entre des caractéristiques liées à la définition du système (TRS et SRS), et des considérations de l'environnement extérieur du système (MRS). Cependant, il ne présente qu'une vue partielle du système qui ne tient compte que des aspects techniques et n'intègre pas toutes les composantes du système de production (humain, énergie, etc). En outre la construction de l'indicateur sous-entend un effet de compensation entre les aspects internes et externes du système de production.

#### 3.4.2.2 INDICE DE COMPLEXITE OPERATIONNELLE<sup>20</sup>

La complexité dans le domaine de la fabrication est définie selon 3 niveaux (ElMaraghy and Urbanic 2004) : la complexité des produits, la complexité des processus et la complexité opérationnelle. La complexité opérationnelle affecte l'usage du système et est en fonction du produit, des tâches liées au processus et de la logistique de production. Elle augmente avec (ElMaraghy and Urbanic 2004) : (1) le nombre et la diversité des éléments à fabriquer, assembler et tester (2) le nombre, type et l'effort requis par les tâches pour produire les éléments. La complexité opérationnelle est liée à la notion d'effort à produire. L'effort est soit physique ou cognitif. Cet effort tient compte aussi de l'effet de l'environnement direct du travail (température, humidité...) (ElMaraghy and Urbanic 2004).

L'indice de complexité opérationnelle tel que défini par (ElMaraghy and Urbanic 2004) est intéressant car il permet de tenir compte de l'interaction des ressources humaines avec les produits et les processus. Cependant, cette interaction se résume à la qualification d'un effort qui reste basé sur le nombre d'opérations à réaliser et ne tient pas compte du niveau de qualification des ressources humaines.

### 3.4.3 BILAN DES CONSIDERATIONS DANS L'EVALUATION DE LA MOBILITE

Le tableau 3-2 présente une synthèse des aspects cités dans la littérature qui contribuent à l'évaluation de la mobilité. On remarque les critères de mobilité différent selon le contexte d'utilisation.

<sup>20</sup> Operational complexity index

Tableau 3-2 synthèse des aspects d'évaluation de la mobilité évoqués dans la littérature

Critères de l'évaluation de la mobilité		Périmètre d'application	Portée de la mobilité	Nature d'évaluation
(Nigel Slack 1987) (Koste 1999)	Temps de transition Coût	Flexibilité opérationnelle	Modules techniques	Qualitative
(Miltenburg 2005)	Couverture géographique Spécialisation	Stratégique Stratégique	Modules techniques	Qualitative Qualitative
(Rösiö 2013)	Niveau d'automatisation Poids et volume du module Robustesse (Maintien de qualité)	Mobilité d'un module	Modules techniques	Qualitative Qualitative
(Erwin Rauch 2015)	La mobilité de machine ou composant La transportabilité du système de production Le mouvement du système sur site	Mobilité du système de production	Modules techniques	Qualitative Qualitative

Cette analyse met en lumière certaines limitations :

- l'absence d'une **démarche objective** basée sur des **critères quantifiables** pour évaluer la mobilité d'un système de production. En effet dans les références que nous avons pu consulter et qui sont citées, les critères d'évaluation de la mobilité n'ont pas été exploités pour la quantification d'une mesure objective de la mobilité.
- la mobilité lié est limitée à la définition **d'un module**, quoique dans le cas de (Rauch 2015) l'aspect usine est évoqué, l'usine reste perçue comme un ensemble de ressources qui sont combinées dans un conteneur, ce qui peut être considéré comme un module indépendant.
- L'absence d'une démarche pour exprimer **la mobilité d'un système** de production en se basant sur la mobilité de chacun de ses composants.
- Les critères présentés ne considèrent pas une **vue holistique du système** de production dans la mesure où les grandeurs mesurées sont liées à des machines et au système technique. Ils excluent par exemple le système humain.
- La mobilité du système de production n'est pas liée aux caractéristiques du site d'implantation (par exemple : infrastructure existante, disponibilité de qualification...).
- Enfin, la mobilité est souvent vue comme la transportabilité et l'opérationnalité sur site est omise.

### 3.5 PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION DU SPM

Le processus de conception d'un système de production s'appuie sur quatre macro phases : initialisation, conception préliminaire, conception architecturale et conception détaillée. Chacune de ces quatre phases se composant d'activités de choix, d'évaluation et de décision. La prise en compte des spécificités de la mobilité se construit à travers chacune des phases du processus de conception du SPM. Au regard des particularités d'un SPM présentées dans le chapitre précédent, cette partie a pour objectif de dresser deux problématiques : (1) identifier les critères pour l'évaluation de la mobilité d'un SPM et (2) identifier où et comment la mobilité doit être prise en compte dans le processus de conception du SPM.

En effet l'analyse du processus de conception d'un SPM a permis de distinguer quatre types de mobilités : *la mobilité fonctionnelle, la mobilité des procédés, la mobilité du systèmes et la mobilité des modules*. Ces types désignent la façon dont la mobilité se présente à travers chaque phase du processus de conception (figure 3-7). Les sections qui suivent présentent chacun de ces types de mobilités.

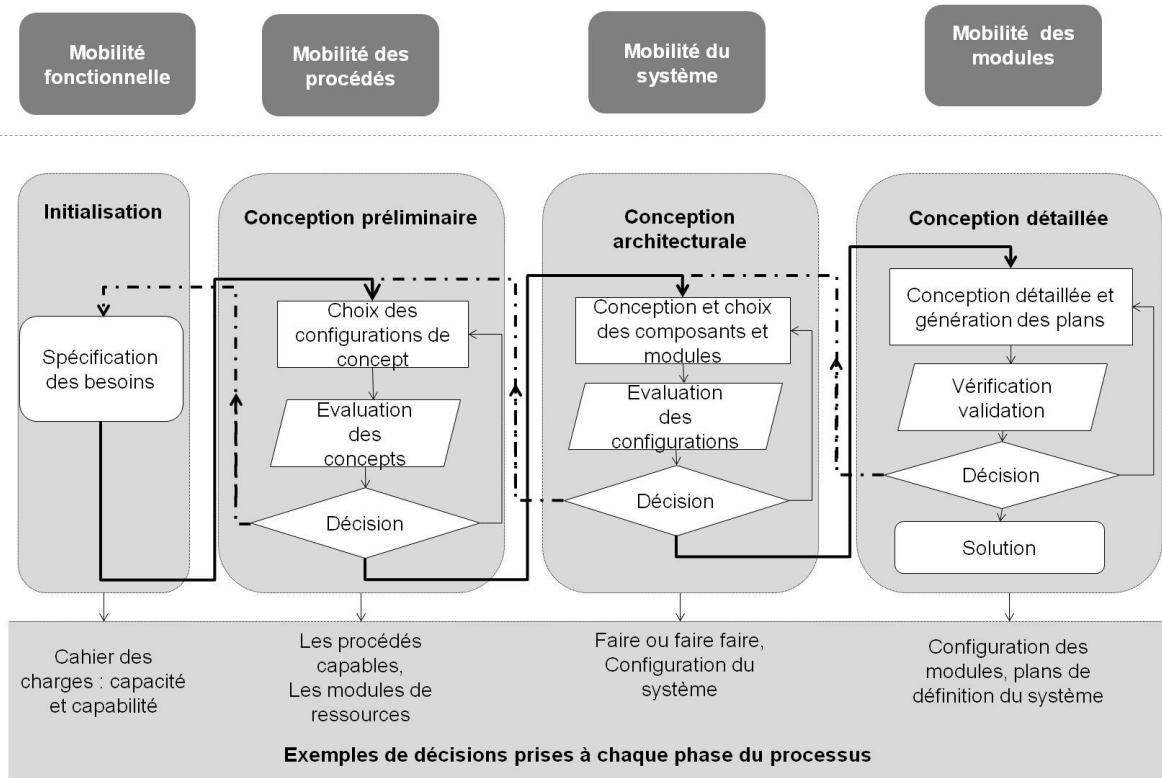


Figure 3-7 Positionnement des différents types de mobilité du système dans le processus de conception du SPM

### 3.5.1 PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LA PHASE D'INITIALISATION

La phase d'initialisation conduit à la définition du cahier des charges fonctionnel (CdCF) servant de base pour la suite de la conception et qui traduit les fonctions que le système doit assurer.

La prise en compte de la mobilité au cours de la phase d'initialisation se traduit par l'identification et la considération des fonctions et contraintes induites spécifiquement par la mobilité du système. En plus des fonctions d'un système de production (production de produits et services, respect des cadences, coût, etc.), la mobilité du système de production fait appel à d'autres considérations (figure 3-8):

- L'analyse stratégique de l'environnement qui doit être conduite au début de chaque site de production (cf. 4.2)
- L'identification des phases de vie du SPM (cf. §1.3.1 du chapitre II)

*La mobilité fonctionnelle se traduit par l'identification des fonctions et contraintes induites spécifiquement par la mobilité du système*

- Adaptation au niveau de qualification de la main d'œuvre locale pour chaque site de production (Fox 2015).
- Prise en compte des contraintes de maintenance sur le site de production (cf. § 3.3.3.3).
- Adaptation aux contraintes d'approvisionnement en énergie sur le site de production (cf. § 3.3.3.5)
- Prise en compte des contraintes de logistique des moyens de production et des produits (cf. § 3.3.3.6)
- Prise en compte du besoin de reconfigurabilité (cf. § 3.3.3.7).

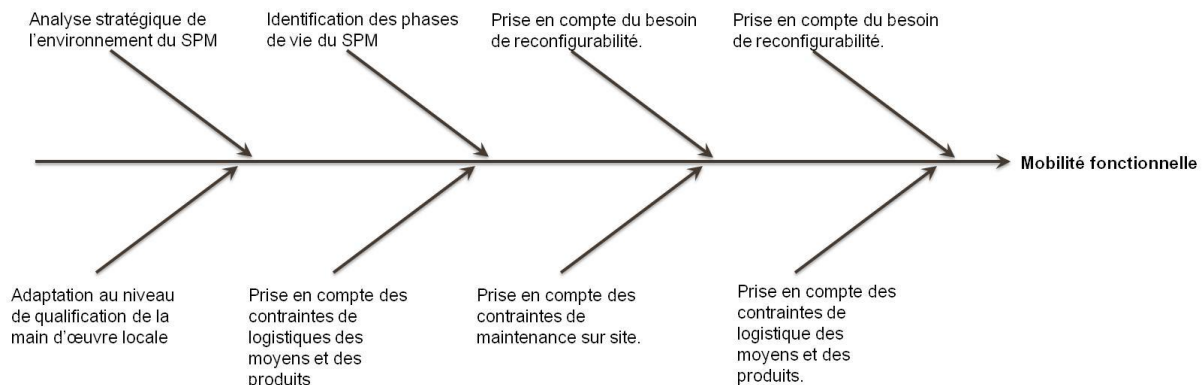


Figure 3-8 Identification des éléments intervenant dans la définition de la mobilité fonctionnelle

### 3.5.2 PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LA PHASE PRELIMINAIRE

La phase de conception préliminaire conduit à la définition de l'ensemble des ressources et procédés capables d'assurer les fonctionnalités du système de production. Pendant la phase de sélection des procédés capables<sup>21</sup>, l'un des critères de choix utilisés est le critère de mobilité. Etant un critère de choix, la mobilité des procédés doit être mesurable. A ce stade de conception, les ressources sont encore des concepts de procédés. Ces ressources n'étant pas encore structurellement définies, l'évaluation de la mobilité se base sur des critères qualitatifs. On propose trois attributs afin de qualifier la mobilité d'un procédé : la transportabilité, le besoin en énergie et le besoin en qualification. L'évaluation de la mobilité permet de choisir uniquement les procédés mobiles.

- **La transportabilité d'un procédé** renvoie à la facilité de déplacement d'un procédé sur un site de production. Elle peut être qualifiée en tenant compte de la localisation géographique du site de production et des modes de transport envisagés.

- **Le besoin en énergie** est qualifié en terme de nature d'énergie (i.e. les différentes sources nécessaires : électriques, hydraulique etc.) et en terme de quantité.

- L'utilisation d'une technologie ou d'un procédé exige un **niveau de qualification** donné. Les procédés qui font appel à un niveau de qualification élevé sont moins mobiles dans la mesure où en fonction du site de production il peut être difficile de trouver les opérateurs qualifiés pour les faire fonctionner.

***La mobilité des procédés se base sur l'évaluation qualitative de 3 critères : la transportabilité d'un procédé, le besoin en énergie et le besoin en compétence.***

La satisfaction de ces trois critères est nécessaire pour qu'un procédé soit considéré comme mobile. Nous proposons de qualifier cette mobilité de *mobilité des procédés*. Cette évaluation est conduite par des experts du métier. Seuls les procédés mobiles sont retenus. Le tableau 3-3 montre un exemple d'évaluation de 3 procédés qui ont été utilisés dans le cas industriel étudié. Au regard des trois critères d'évaluation de la mobilité des procédés, seul le procédé de rivetage satisfait les critères de mobilité. Pour les autres procédés, les machines utilisées pour le procédé de soudage peuvent être déplacées sur site mais le soudage nécessite une expertise pointue et ce procédé est énergivore. La transportabilité des baignoires de galvanisation est difficile et il s'agit ici encore d'un procédé qui nécessite une expertise particulière ainsi qu'une consommation d'énergie importante.

A la fin de la phase préliminaire, les procédés capables constituant le SPM sont déterminés et les ressources (machines, équipements...) sont choisies.

<sup>21</sup> Le terme de *procédé capable* renvoie l'aptitude d'un procédé (par exemple, soudage, pliage, etc;) à être mobile et à être intégré dans un SPM.

Tableau 3-3 Exemple d'évaluation de la mobilité des procédés pendant la phase de conception préliminaire

Procédé	Transportabilité	Satisfaction du besoin en énergie	Satisfaction du besoin en qualification	Mobilité
Soudage	Oui	Non	Non	Non
Rivetage	Oui	Oui	Oui	Oui
Galvanisation	Non	Non	Non	Non
.....				

### 3.5.3 PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LA PHASE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

La phase de conception architecturale s'intéresse à la détermination de l'architecture du système (i.e. configuration physique). L'analyse de la mobilité pendant la phase de conception architecturale concerne le système de production défini par tous ses composants. Ces composants peuvent être classifiés en deux catégories (figure 3-9) : les équipements techniques et les modules humains.

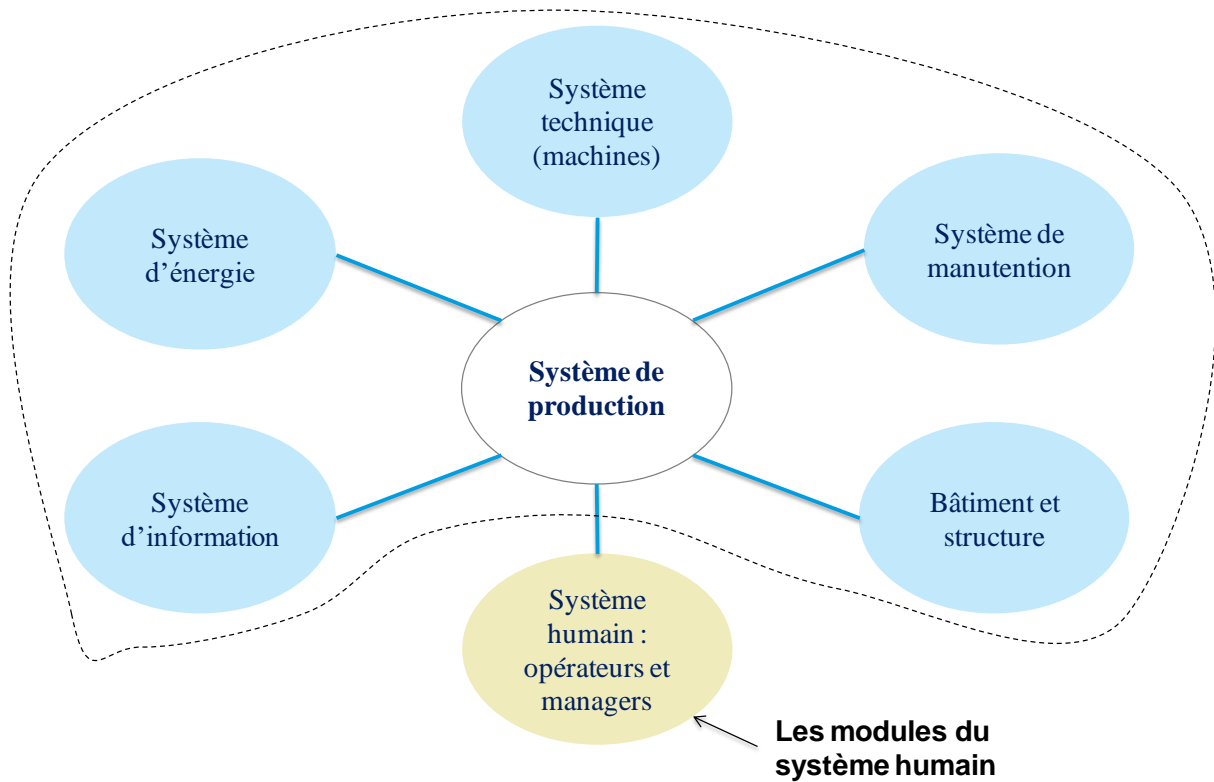


Figure 3-9 Les composants du SPM sont classifiés en modules techniques et modules du système humain.

L'évaluation de la mobilité des équipements techniques et des modules humains utilise des approches différentes faisant intervenir des critères différents. Il est nécessaire donc d'évaluer chaque catégorie et ensuite d'agréger ces résultats pour donner une appréciation unique de la mobilité du système de production total. Cette appréciation peut être exprimée par une valeur quantitative entre 0 et 1 qui traduit un indice de satisfaction. La démarche d'évaluation de l'indice de mobilité *de système* est donnée dans la figure 3-10.

L'approche d'évaluation proposée consiste en 3 étapes :

- étape (E1) : définition et évaluation de la mobilité des modules techniques du SPM
- étape (E2) : définition et évaluation de la mobilité des composants du système humain
- étape (E3) : évaluation de l'indice de mobilité du système de production en se basant sur les résultats des étapes E1 et E2. Une fonction d'agrégation sera définie et utilisée.

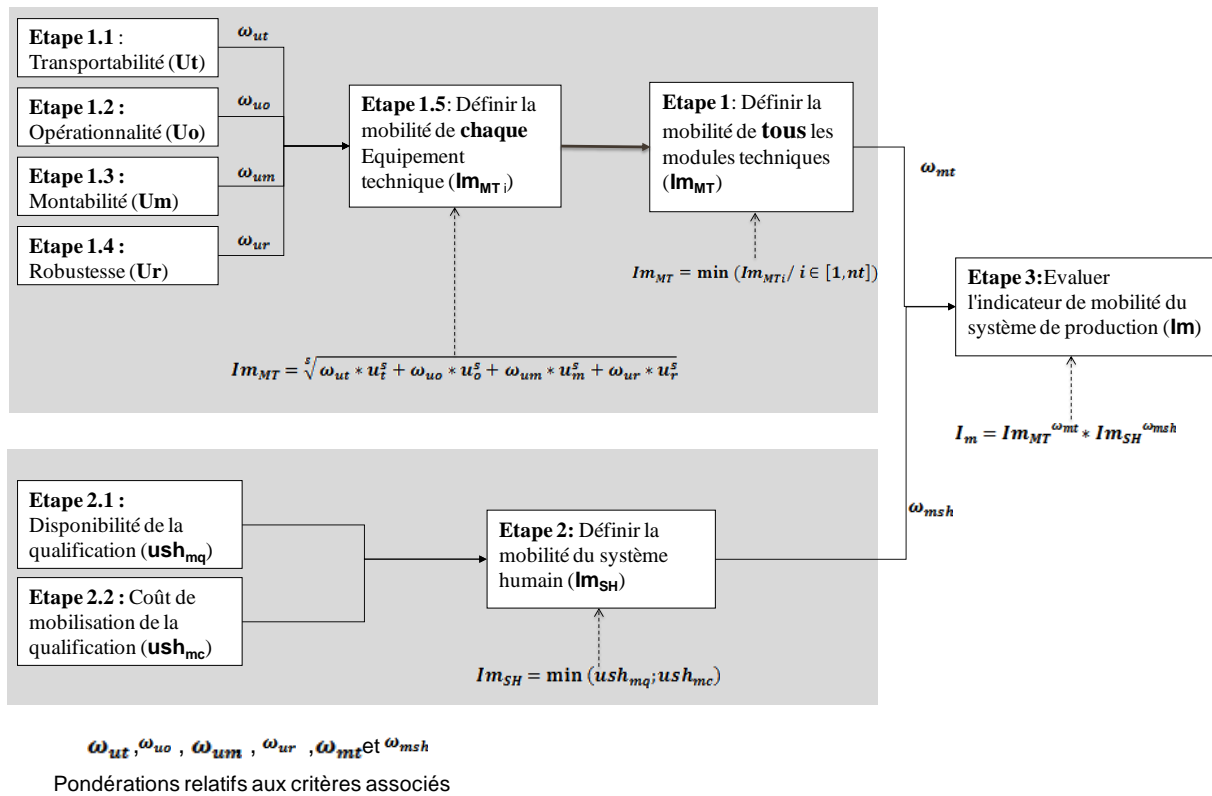


Figure 3-10 Démarche d'évaluation de l'indice de mobilité de système pendant la phase de conception architecturale

La construction des indices est basée sur une analyse multicritères. Deux notions importantes sont utilisées : l'expression de la préférence et l'agrégation des critères. Une revue de ces outils a été proposée dans le chapitre précédent (cf. § 2.6).

Dans ce qui suit nous allons présenter notre démarche pour la construction des étapes 1, 2 et 3.

*La mobilité du système est évaluée par un indice quantitatif exprimé entre 0 et 1. Cette mobilité se base sur une analyse multicritères et tient compte aussi des aspects humains.*

### 3.5.3.1 LA MOBILITE DES MODULES TECHNIQUES (ÉTAPE 1)

Cette partie a pour objectif d'expliquer l'étape 1 de notre démarche d'évaluation de l'indice de mobilité de système. La mobilité des modules techniques est évaluée à partir de chaque équipement technique dans le système. Nous allons d'abord identifier les facteurs intervenant dans l'évaluation de la mobilité d'un équipement technique, ensuite nous allons faire le bilan de toutes les données nécessaires pour l'évaluation de cet indice et enfin nous allons présenter la fonction agrégation pour évaluer l'indice de mobilité des modules techniques.

#### 3.5.3.1.1 LES FACTEURS DE MOBILITE D'UN EQUIPEMENT TECHNIQUE (ÉTAPE 1.5)

La mobilité d'un module technique du SPM doit être satisfaite sur toutes ses phases de vie. Pour être mobile, un module technique doit être : transportable, montable sur site,



opérationnel sur site et démontable. La transportabilité du module technique est étudiée en fonction de son adéquation avec les modes de transport, en termes de poids et de volume admissibles. La facilité de montage et démontage sur site dépend de la disponibilité de ressources et le temps de montage et démontage. Quant à l'opérationnalité sur site, elle dépend d'un côté de la disponibilité des ressources sur site pour assurer la production et la maintenance du module techniques; et d'autre part, de la disponibilité de l'énergie nécessaire. De plus, le module technique doit être robuste au cours de plusieurs cycles de mobilité<sup>22</sup>, dont le nombre est exprimé dans le cahier de charge initial. Le module technique doit être capable de maintenir un niveau de performance acceptable. Une partie de ces facteurs a été abordée et évaluée qualitativement dans la mobilité des procédés. La phase de conception architecturale permet de fournir les données nécessaires pour évaluer quantitativement ces facteurs contribuant à la mobilité des modules. La figure 3-11 résume les facteurs intervenant dans la définition de la mobilité d'un module technique du système de production.

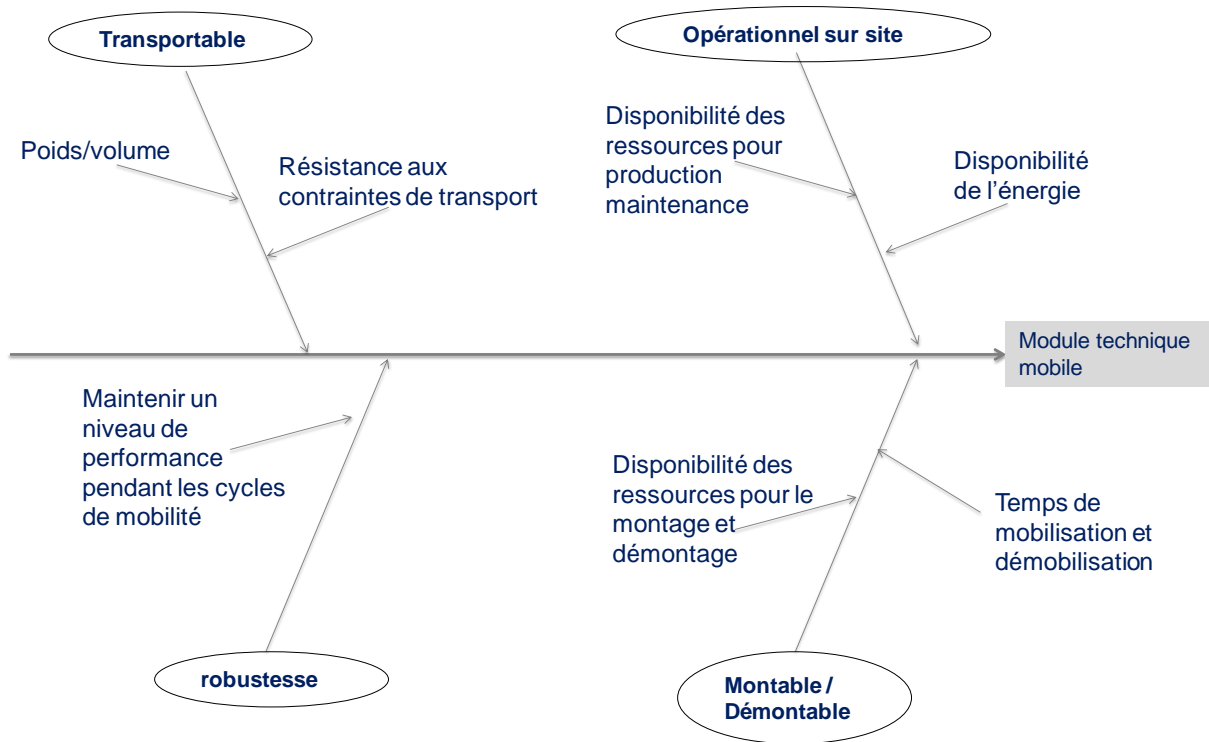


Figure 3-11 Les composantes de la mobilité d'un module technique

3.5.3.1.2 EXPRESSION DE L'INDICE DE MOBILITE D'UN MODULE TECHNIQUE (ÉTAPE 1.5)

L'indice de mobilité d'un module technique est alors agrégé à partir des critères définis dans la (figure 3-11). Un des paramètres importants dans le choix d'une fonction d'agrégation est la stratégie d'agrégation : Selon la situation de décision, faut-il plutôt considérer un effet compensatoire entre les différents facteurs ou plutôt une stratégie conservatrice ? Ce paramètre de stratégie d'agrégation doit être adaptable en fonction des situations de décision. L'opérateur GOWA (Li 2011) a l'avantage d'utiliser un paramètre (s: strategy trade-off) pour adapter la stratégie d'agrégation. En changeant la valeur du paramètre *s* on peut passer ainsi d'une

<sup>22</sup> Un cycle de mobilité d'un système de production est défini comme l'ensemble des phases nécessaires pour opérer sur un site, à savoir : Transport, montage sur site, production sur site et démontage.

stratégie conservatrice à une stratégie d'agrégation compensatoire. Ensuite les différents critères (transportabilité, montage sur site, opérationnalité et robustesse) n'ont pas la même importance dans la définition de la mobilité, il est nécessaire de procéder à une hiérarchisation de l'influence de chaque critère sur la mobilité du module technique. La hiérarchisation peut dépendre aussi de la nature du module technique (machines, moyen de manutention, etc).

L'expression de l'indice de mobilité d'un module technique est donnée par l'expression (11). Cette expression met en relation d'un côté une mesure quantifiable de la mobilité d'un module et d'un autre côté, une appréciation de la transportabilité du module, son opérationnalité sur le site de production, sa facilité de montage et démontage et sa robustesse. De cette façon, la mobilité d'un module est construite à partir de variables intrinsèque du module technique, qui peuvent être contrôlé pendant sa conception (dimensions, poids, etc) et, des caractéristiques du contexte du site de production (disponibilité des ressources, etc).

$$Im_{MTi} = \sqrt[s]{\omega_{ut} * u_{ti}^s + \omega_{uo} * u_{oi}^s + \omega_{um} * u_{mi}^s + \omega_{ur} * u_{ri}^s} \quad (11)$$

s : le paramètre d'adaptation de la stratégie d'agrégation.

$u_{ti}$ ,  $u_{oi}$ ,  $u_{mi}$ ,  $u_{ri}$  : désignent respectivement la valeur de satisfaction des critères de transportabilité, opérationnalité, montage/démontage sur site et la robustesse liés à un module technique  $i$ . Ces valeurs de satisfaction sont exprimés par des valeurs en 0 et 1 et sont détaillées dans les sections qui suivent.

$\omega_{ut}$ ,  $\omega_{uo}$ ,  $\omega_{um}$ ,  $\omega_{ur}$  : désignent respectivement les pondérations des critères de transportabilité, opérationnalité sur site, montage/démontage et robustesse, vis-à-vis de l'indice de mobilité d'un module technique.

Il est nécessaire de vérifier que (12) :

$$\omega_{ut} + \omega_{uo} + \omega_{um} + \omega_{ur} = 1 \quad (12)$$

Enfin la mobilité de tout le système technique  $Im_{MT}$  est donnée par la formule (13) :

$$Im_{MT} = \min(Im_{MTi} / i \in [1, nt]) \quad (13)$$

où l'indice  $nt$  est le nombre de module technique dans le système de production.

La formule (13) signifie que la mobilité des modules techniques du SPM dépend de la performance du maillon le plus faible i.e. du module dont l'indice de mobilité est le plus faible.

### 3.5.3.1.3 LES INFORMATIONS UTILISEES POUR L'EVALUATION DE $Im_{MT}$

Les informations nécessaires pour alimenter le modèle d'évaluation de l'indice de mobilité d'un module technique sont de deux natures :

- *données quantitatives* : peuvent être exprimées par des valeurs déterministes, comme le poids ou volume d'un module ou par un intervalle de valeurs possibles comme le cycle de mobilité admissibles pour un module technique.

- *données qualitatives* : sont des données non numériques ou qui ne peuvent pas être exprimés exactement car il manque des informations comme les informations relatives au site d'implantation telles que la disponibilité de l'énergie ou l'état de disponibilité des ressources nécessaires sur site. Une échelle sémantique est utilisée pour caractériser les données qualitatives.

L'ensemble des données nécessaires sont considérées selon 3 types, ces données sont relatives à :

- la *conception du module* : données techniques spécifiques à la conception du module technique et sur lesquelles on peut agir pendant son processus de développement.
- la *gestion du système de production* : informations liées au pilotage du SPM dans lequel le module technique s'intègre.
- les *caractéristiques du site de production* : tient compte des ressources nécessaires pour le montage et démontage du module technique sur site ainsi que ceux nécessaires pour assurer son opérationnalité sur site.

Le tableau 3-4 présente une synthèse des différentes données qui sont utilisées pour l'évaluation de l'indice de mobilité d'un module technique.

Tableau 3-4 Synthèse des données nécessaires pour l'évaluation de la mobilité d'un module technique

Catégorie	Données	Type de donnée
<i>Conception du composant</i>	Poids du composant	<u>Quantitative</u>
	Volume du composant	<u>Quantitative</u>
	Niveau de résistance aux contraintes de transport	Qualitative
	Temps de mobilisation / démobilisation	Qualitative
	Robustesse /Cycles de mobilité	<u>Quantitative</u>
<i>Pilotage du SPM</i>	Disponibilité de la qualification	Qualitative
	Nombre de cycles de l'usine mobile	<u>Quantitative</u>
<i>Caractéristiques du site de production</i>	Disponibilité de la ressource pour la production	Qualitative
	Disponibilité de la ressource pour la maintenance	Qualitative
	Disponibilité de l'énergie pour la production	Qualitative
	Ressource nécessaire pour montage démontage	Qualitative
	Compétence nécessaire pour montage démontage	Qualitative
	Coût de la compétence	Qualitative

Après avoir présenté les données nécessaires pour alimenter le modèle d'évaluation de l'indice de mobilité d'un module technique, nous allons présenter la démarche d'évaluation de chacun des 4 critères définissant l'indice de mobilité.

#### 3.5.3.1.4 DEFINITION DE L'INDICE DE TRANSPORTABILITE DU MODULE TECHNIQUE (ETAPE 1.1)

Ce critère mesure la transportabilité de l'équipement technique. L'aptitude de transportabilité nécessite de s'adapter aux contraintes des modes de transport conventionnels. Le moyen de transport normalisé et multimodale est le conteneur ISO. On part du principe que ce moyen sera privilégié pour le transport des équipements techniques. Parmi tous les types de conteneurs universels, le 20' (EVP) et le 40' sont les plus utilisés. Le container impose deux limitations: limitation de poids et de volume. D'un autre côté, durant la phase de transport, l'équipement transporté subit des chocs dus au mouvement du moyen de transport ou aux activités de transfert entre deux modes de transport<sup>23</sup>. De plus l'équipement est exposé aux contraintes météorologiques (pluie, etc), et la poussière. Ce qui nécessite une certaine étanchéité et résistance à ces contraintes.

Le critère de transportabilité que nous proposons tient compte de ces contraintes : limitation du poids, du volume et résistance aux contraintes de transport. Ce critère est exprimé par une valeur adimensionnée entre 0 et 1. Dans le cas où l'un des critères, poids, volume ou résistance aux contraintes de transport, n'est pas satisfait le critère de transportabilité ne peut être satisfait. D'où le besoin d'une fonction avec une stratégie d'agrégation conservatrice. On choisit la fonction d'agrégation par le minimum. La valeur de l'indice de transportabilité est donnée par la formule (14) :

$$ut(x) = \min(ut_p(x), ut_v, ut_r(x)) \quad (14)$$

avec  $t_p(x)$ ,  $ut_v(x)$ ,  $ut_r(x)$  désignent respectivement les valeurs de satisfaction des indices de poids, volume et résistance aux contraintes de transport pour un module technique  $x$ .

- **$ut_p(x)$  : Valeur de satisfaction de l'indice poids du module technique**

La valeur de satisfaction de l'indice de poids de l'équipement technique tient compte du poids limite du moyen de transport (conteneur iso par exemple) ainsi que la valeur du poids admissible. La valeur admissible est la valeur qui permet d'assurer une marge de sécurité sur le poids. Tant que le poids du module technique est en dessous de la valeur admissible le critère de transportabilité est satisfait ( $ut_p(x) = 1$ ), plus le poids du module s'approche de la valeur du poids limite moins que le critère de transportabilité est satisfait ( $ut_p(x)$  s'approche de 0). La valeur de  $ut_p(p)$  peut être modélisée par la fonction représentée sur la figure 3-12 et dont l'expression est donnée par la formule (15).

<sup>23</sup> La valeur de ces chocs peut aller jusqu'à 5 fois l'action de la pesanteur

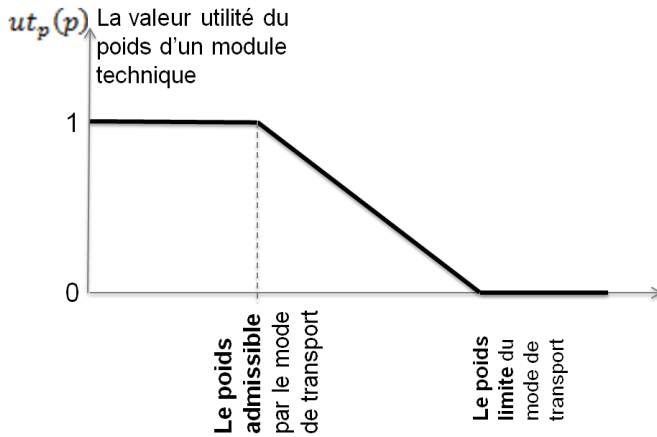


Figure 3-12 Fonction exprimant la valeur de satisfaction du indice de poids

$$ut_p(p) = \begin{cases} 1 & \text{si } p \leq p_{adm} \\ \frac{(p_{limite} - p)}{p_{limite} * (1 - \alpha)} & \text{si } p_{adm} \leq p \leq p_{limite} \\ 0 & \text{si } p > p_{limite} \end{cases} \quad (15)$$

où  $p$ : le poids de l'équipement technique exprimé en tonnes,  $p_{limite}$  le poids maximal exprimé en tonnes, et  $\alpha = \frac{p_{adm}}{p_{limite}}$  coefficient ( entre 0 et 1 ) qui tient compte la marge de sécurité souhaitée sur le poids.

▪  **$ut_v(x)$  : Valeur de satisfaction du indice volume du module technique**

La valeur de satisfaction de l'indice de volume de l'équipement technique est exprimée de la même façon que pour la valeur de satisfaction de l'indice de poids. La valeur de  $ut_v(v)$  est donnée par la fonction représentée sur la figure 3-13 et dont l'expression est donnée par la formule (16).

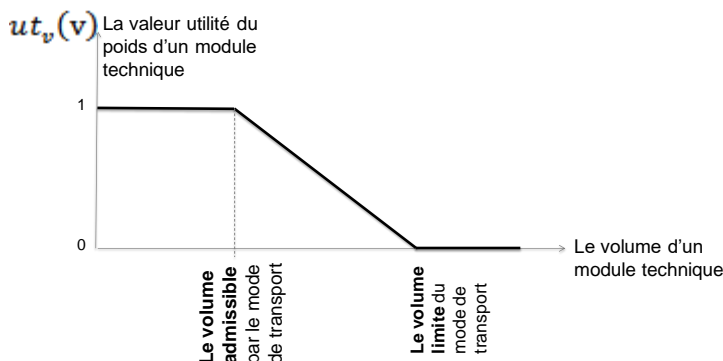


Figure 3-13 Fonction exprimant la valeur de satisfaction de l'indice de volume

$$ut_v(v) = \begin{cases} 1 & \text{si } v \leq v_{adm} \\ \frac{(v_{limite} - v)}{v_{limite} * (1 - \beta)} & \text{si } v_{adm} \leq v \leq v_{limite} \\ 0 & \text{si } v > v_{limite} \end{cases} \quad (16)$$

où  $v$  est le volume de l'équipement technique exprimé en  $m^3$ ,  $v_{limite}$  le volume maximale exprimé en  $m^3$ , et  $\beta = \frac{v_{adm}}{v_{limite}}$  est le coefficient (entre 0 et 1) qui tient compte la marge de sécurité souhaitée sur le volume du module technique.

▪  **$ut_r(x)$ : Valeur de satisfaction de l'indice de résistance aux contraintes de transport**

Pendant la phase de transport, un module technique doit résister à plusieurs contraintes physiques et climatiques. L'appréciation du niveau de la résistance est plus difficile à exprimer. On propose une grille (tableau 3-5) pour qualifier le niveau de résistance de l'équipement technique par rapport aux contraintes de transport  $ut_r(x)$ . En pratique, le choix d'un niveau de résistance peut être préconisé par le concepteur ou le fournisseur de l'équipement technique en tenant compte de son environnement d'utilisation.

**Tableau 3-5 Grille du niveau de résistance de l'équipement par rapport aux contraintes de transport**

<i>Niveau de résistance aux contraintes de transport</i>					
	<b>TH (Très Haut)</b>	<b>H (Haut)</b>	<b>M (Moyen)</b>	<b>B (Bas)</b>	<b>TB (Très Bas)</b>
<i>Valeur <math>ut_r(x)</math></i>	1	0.8	0.5	0.3	0.1
<i>Interprétation de la valeur de <math>ut_r(x)</math></i>	Equipement très résistant			Equipement peu résistant	

### 3.5.3.1.5 DEFINITION DE L'INDICE DE MONTABILITE / DEMONTABILITE (ETAPE 1.3)

Cet indice évalue la facilité avec laquelle le module technique peut être monté et démonté sur le site de production. Dans une logique de mobilité récurrente, où le système de production sera déployé sur plusieurs sites de production, le module technique doit s'apprêter à ces opérations. Cet indice se focalise sur la phase de mise en service sur le site. On identifie deux facteurs qui peuvent impacter la phase de mise en service du module technique : les ressources nécessaires et le temps de montage / démontage de l'équipement technique.

Les ressources nécessaires pour le montage et démontage porte sur deux aspects : (1) les ressources matérielles telles que les grues, engins spéciaux, etc et, (2) les compétences nécessaires pour mettre en service le module technique. L'impact de ces facteurs sur la mobilité dépend d'abord de l'infrastructure disponible et accessible sur le site et de la rareté de la ressource (matérielle ou humaine).

La valeur de satisfaction de l'indice de montabilité et démontabilité est défini à partir de 3 attributs : la disponibilité des ressources matérielles, la disponibilité de la compétence nécessaire et le temps de mobilisation/démobilisation. Dans le cas où l'un de ces attributs n'est pas satisfait, l'indice de mobilisation ne peut être satisfait. Ceci explique le recours à une stratégie d'agrégation conservatrice en utilisant l'opérateur d'agrégation par le minimum. La valeur de satisfaction de l'indice de mobilisation est donnée par la formule (17).

$$um(x) = \min(um_{rm}(x), um_{rh}(x), um_t(x)) \tag{17}$$

où  $um_{rm}(x), um_{rh}(x), um_t(x)$  désignent respectivement la satisfaction des attributs de disponibilité des ressources matérielles, de compétences et la satisfaction du temps de mobilisation.

La quantification des trois attributs de mobilisation est réalisée selon les grilles sémantiques présentées ci-après.

- **Satisfaction de l'attribut de disponibilité des ressources matérielles pour le montage et démontage**

L'attribut de disponibilité des ressources matérielles est un attribut contextuel qui dépend de chaque site de production. Le coût requis pour accéder à la ressource nécessaire doit être pris en compte. Le tableau 3-6 présente une grille pour évaluer la satisfaction de l'attribut  $um_{rm}(x)$ .

Tableau 3-6 Grille pour le niveau de disponibilité de la ressource matérielle

Niveau de disponibilité de la ressource matérielle	TH	H	M	B	TB
Valeur $um_{rm}(x)$	1	0.8	0.5	0.3	0.1
Interprétation de la valeur de $um_{rm}(x)$	Ressource disponible et accessible (pas cher)			Ressource rare et difficilement accessible (très cher)	

- **Satisfaction de l'attribut de disponibilité des compétences nécessaires pour le montage et démontage**

Un bilan des compétences nécessaires pour la mobilisation et démontage d'un module technique ainsi que leurs disponibilités soit en interne soit localement sur le site de production est nécessaire. La satisfaction de l'attribut  $um_{rh}(x)$  dépend du niveau d'adéquation entre le besoin et la disponibilité des compétences humaines nécessaires (tableau 3-7).

Tableau 3-7 Grille pour le niveau de disponibilité de la ressource humaine

Niveau de disponibilité de compétence nécessaire		TH	H	M	B	TB
Valeur de $um_{rh}(x)$		1	0.8	0.5	0.3	0.1
Interprétation de la valeur de $um_{rh}(x)$		Compétence disponible et accessible sur site		Compétence disponible en interne et nécessite d'être acheminée sur site	compétence rare et difficilement accessible sur site et non disponible en interne	

- **Le temps de mobilisation/démobilisation**

Le temps de mobilisation/démobilisation de l'équipement technique est estimé qualitativement en utilisant la grille donnée sur tableau 3-8.

Tableau 3-8 Grille pour la satisfaction du temps de mobilisation de l'équipement technique

Temps nécessaire pour la mobilisation / démobilitation de l'équipement technique		TH	H	M	B	TB
Valeur de $um_t(x)$		1	0.8	0.5	0.3	0.1
Interprétation de la valeur de $um_t(x)$		Temps de mobilisation important		Temps de mobilisation moyen	Temps de mobilisation réduit	

### 3.5.3.1.6 DEFINITION DE L'INDICE D'OPERATIONNALITE SUR SITE

L'opérationnalité d'un module technique fait référence à la facilité de mener l'activité de production sur le site de destination. On identifie trois facteurs qui contribuent à cette facilité: (1) la disponibilité des ressources matérielles ou humaines pour assurer la phase d'utilisation de l'équipement technique, (2) La disponibilité des ressources matérielles ou humaines pour assurer la phase de maintenance de l'équipement technique et, (3) la disponibilité (en nature et en quantité) de l'énergie requise par l'équipement technique. Les trois facteurs étant indispensables, la valeur de satisfaction de l'indice d'opérationnalité sur site est définie par la formule (18).



$$u_o(x) = \min(u_{o_{Qp}}(x), u_{o_{Qm}}(x), u_{o_E}(x)) \quad (18)$$

où  $u_{o_{Qp}}(x), u_{o_{Qm}}(x), u_{o_E}(x)$  désignent respectivement la satisfaction des attributs de disponibilité des ressources pour la phase d'utilisation, la phase de maintenance et la disponibilité de l'énergie nécessaire.

▪ **La disponibilité des ressources pour assurer la phase d'utilisation**

L'utilisation d'un équipement technique mobile sur le site de destination nécessite la disponibilité de ressources matérielles et humaines pour assurer la fonction de production. L'attribut  $u_{o_{Qp}}(x)$  mesure la disponibilité de ces ressources tenant compte du contexte du site de destination. Cet attribut est évalué qualitativement en utilisant la grille (tableau 3-9).

Tableau 3-9 Grille d'évaluation de la disponibilité des ressources pour la phase d'utilisation du module technique mobile

<i>Niveau de disponibilité des ressources matérielles et humaine pour la phase d'utilisation</i>	<b>TH</b>	<b>H</b>	<b>M</b>	<b>B</b>	<b>TB</b>
<i>Valeur de <math>u_{o_{Qp}}(x)</math></i>	1	0.8	0.5	0.3	0.1
<i>Interprétation de la valeur de <math>u_{o_{Qp}}(x)</math></i>	Ressources matérielles ou humaine disponibles et accessibles sur site	Ressources matérielles ou humaines disponibles en interne et nécessite d'être acheminées sur site	Ressources matérielles ou humaines disponibles en interne et nécessite d'être acheminées sur site	Ressources matérielles ou humaines rares et difficilement accessibles sur site et non disponibles en interne	Ressources matérielles ou humaines rares et difficilement accessibles sur site et non disponibles en interne

▪ **La disponibilité des ressources pour assurer la phase de maintenance du module technique mobile**

En suivant la même définition que pour la phase d'utilisation, la disponibilité des ressources pour la phase de maintenance est donnée par la grille d'évaluation (tableau 3-10). La définition de cet indice suit le même raisonnement que pour la phase d'utilisation. Toutefois, la facilité d'approvisionnement des pièces de rechange est à prendre en considération.

Tableau 3-10 Grille pour la disponibilité des ressources pour la phase de maintenance

Niveau de disponibilité des ressources matérielles et humaine pour la phase de maintenance	TH	H	M	B	TB
Valeur de $u_{O_{qm}}(x)$	1	0.8	0.5	0.3	0.1
Interprétation de la valeur de $u_{O_{qm}}(x)$	Ressources matérielles ou humaine disponibles et accessibles sur site	Ressources matérielles ou humaines disponibles en interne et nécessite d'être acheminées sur site	Ressources matérielles ou humaines disponibles en interne et nécessite d'être acheminées sur site	Ressources matérielles ou humaines rares et difficilement accessibles sur site et non disponibles en interne	Ressources matérielles ou humaines rares et difficilement accessibles sur site et non disponibles en interne

▪ **La disponibilité de l'énergie**

Pour des équipements techniques qui doivent être opérationnels dans des environnements désertiques, la facilité d'approvisionnement en énergie nécessaire peut s'avérer un facteur critique impactant l'opérationnalité de ce module. L'attribut  $u_{O_E}(x)$  a pour but d'estimer la satisfaction de l'indice de disponibilité de l'énergie vis-à-vis de l'infrastructure disponible sur le site de destination. La valeur de satisfaction de l'indice  $u_{O_E}(x)$  est donnée par la grille ci-après (tableau 3-11).

Tableau 3-11 Grille pour la disponibilité de l'énergie nécessaire pendant la phase de production

Niveau de disponibilité de l'énergie nécessaire	TH	H	M	B	TB
Valeur de $u_{O_E}(x)$	1	0.7	0.5	0.25	0.05
Interprétation de la valeur de $u_{O_E}(x)$	énergie disponible en quantité suffisante à coût faible	énergie disponible en quantité suffisante à coût cher	énergie disponible en quantité insuffisante à coût faible	énergie disponible en quantité insuffisante à coût cher	l'énergie nécessaire est rare (Quantité d'énergie insuffisante)

3.5.3.1.7 DEFINITION DE L'INDICE DE ROBUSTESSE D'UN MODULE TECHNIQUE MOBILE (ETAPE 1.4)

La robustesse du module technique mobile désigne l'aptitude de l'équipement technique à garantir un niveau de qualité acceptable après plusieurs cycles de montage, utilisation et de démontage. On suppose que le concepteur ou fournisseur de l'équipement technique mobile est en mesure de préconiser une fourchette de nombres de cycles de montage et démontage de l'équipement technique mobile. On évalue la valeur de satisfaction de l'indice par une fonction de désirabilité de Harrington (Harrington 1965) dans le cas d'un problème de minimisation. Le nombre de cycles de mobilité de l'équipement technique est comparé par rapport à la fourchette préconisée par le constructeur de l'équipement. Plus le nombre de cycles de mobilité réels du module technique est inférieur à la valeur maximale préconisée, mieux l'indice de robustesse est satisfait et plus la valeur de satisfaction de cet indice est proche de 1. La valeur de satisfaction de l'indice de robustesse d'un module technique mobile est donnée par la fonction représentée sur la figure 3-14. L'expression de la fonction de satisfaction est donnée par les formules (19).

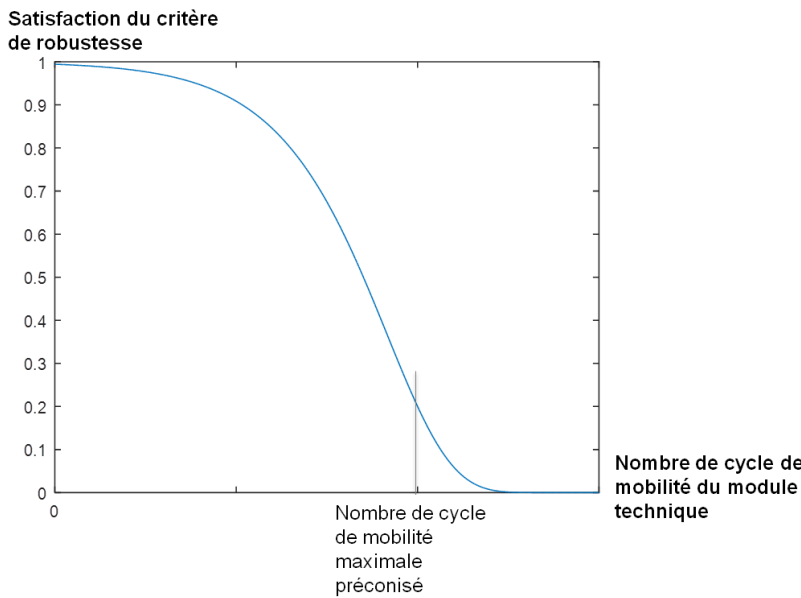


Figure 3-14 fonction exprimant la valeur de satisfaction de l'indice de robustesse d'un module technique mobile

$$u_r(x) = \exp(-\exp(\alpha + \beta * x)) \tag{19}$$

où x exprime le nombre de cycles de mobilité réels que le module technique doit effectuer.

$$\text{avec } \begin{cases} \beta = \frac{\ln(\frac{\ln(d_{AC})}{\ln(d_{SL})})}{AC-SL} \\ \alpha = \ln(-\ln(d_{SL})) - \beta * SL \end{cases} \tag{20}$$

où les paramètres SL, AC, d<sub>SL</sub> et d<sub>AC</sub> sont donnés dans le tableau 3-12

Tableau 3-12 Les paramètres de la fonction de satisfaction de l'indice de robustesse

Paramètre	Valeur	signification
$SL$	1	Le nombre de cycle de mobilité minimale. On fixe cette valeur à 1. Un module technique doit être mobile au moins une seule fois
$AC$	10	Le nombre de cycle de mobilité maximale préconisé
$di(SL)$	0.99	La valeur de satisfaction du nombre minimal de cycle de mobilité (valeur figée)
$di(AC)$	0.2	La valeur de satisfaction du nombre maximal de cycle de mobilité (valeur figée)

Pour estimer la satisfaction de l'indice de robustesse du module technique mobile, il suffit de préciser la valeur du nombre de cycle de mobilité maximal préconisé.

L'évaluation des indices de transportabilité, montabilité, opérationnalité et robustesse permet de quantifier la mobilité de chaque module technique du SPM en utilisant la formule (11). L'indice de mobilité de tout le système technique est donné avec la formule (13). Pour compléter l'analyse de la mobilité du SPM, il faut analyser la mobilité de ses composants humains, c'est l'objectif du paragraphe suivant.

### 3.5.3.2 LA MOBILITE DU SYSTEME HUMAIN (ÉTAPE 2)

Le système humain intervient en apportant capacité flexible de travail pour mener des opérations simples ou complexes contribuant ainsi au fonctionnement du SPM. Ceci nécessite des compétences acquises ou à développer sur place au cours de la période de production. La mobilité du système humain peut être traduite par la mobilité d'une ou plusieurs compétences nécessaires pour le fonctionnement du système de production. Une analogie peut être faite avec le système technique pour lequel on maîtrise mieux la notion de mobilité. Pour un système technique, on parle de fonctionnalité et de capacité. Dans le cadre de cette analogie, le système humain peut être caractérisé par une compétence / qualification (fonctionnalité) et un nombre de personnes (capacité). La mobilité du système humain peut se résumer alors à la mobilité des compétences nécessaires en quantités suffisantes. Le nombre de personnes nécessaires a un impact sur le coût. L'indice de mobilité du système humain qu'on propose dépend de 2 attributs : la mobilité de la qualification du système humain (noté  $ush_{mq}$ ) et le cout de la mobilité de la qualification du système humain (noté  $ush_{mc}$ ).

Indépendamment des compétences, le système humain a d'autre dimensions telles que des caractéristiques contextuelles et régionales (la fiabilité, les habitudes de travail, etc.) participant directement ou indirectement à l'appréciation de sa mobilité. Toutefois ces dimensions contextuelles ne peuvent être cernées aisément. Nous nous limitons aux deux dimensions  $ush_{mq}$  et  $ush_{mc}$  pour l'appréciation de la l'indice de mobilité du système humain.

Ces deux attributs sont indispensables pour la mobilité du système humain. L'indice de mobilité du système humain (noté  $Im_{SH}$ ) que nous proposons est donné par la formule (21) :

$$Im_{SH} = \min(ush_{mq}; ush_{mc}) \tag{21}$$

où  $ush_{mq}$  désigne la satisfaction de l'indice de mobilité de la qualification et  $ush_{mc}$  reflète la satisfaction du coût de mobilisation de la qualification.

Par la suite nous allons présenter les démarches d'évaluation de chacun de ces deux derniers indices

3.5.3.2.1 EVALUATION DE L'INDICE DE LA MOBILITE DE LA QUALIFICATION REQUISE (ETAPE 2.1)

Un SPM nécessite l'intervention de plusieurs compétences. Chaque compétence a une importance dans le fonctionnement du SPM. La mobilité du système humain doit tenir compte du poids de chaque compétence dans le système humain. La définition du poids tient compte de deux dimensions:

- *L'impact de la compétence en terme de quantité* : Le ratio compétence  $i$  / nombre total de compétences
- *L'importance de la compétence* : par exemple Il serait plus facile de remplacer un opérateur qu'un manager qualifié.

Le deuxième point étant difficilement quantifiable, nous considérons uniquement l'impact de la compétence en terme de quantité. La mobilité de la qualification requise du système humain est donnée par la formule (22) :

$$ush_{mq} = \sum_i^{nc} \omega_i * mq_i \tag{22}$$

avec  $\omega_i = \frac{\text{nombre de compétence } i \text{ dans le système}}{\text{nombre de compétence totale dans le système}}$  (23)

$nc$  est le nombre de compétence totale dans le système humain

$mq_i$  désigne la disponibilité de la qualification  $i$  requise. On propose la grille de notation suivante (tableau 3-13) pour évaluer ce facteur.

**Tableau 3-13 Grille de notation de l'indice de disponibilité de la compétence**

Niveau de disponibilité de la compétence $i$	TH	H	M	B	TB
Valeur de $mq_i$	1	0.7	0.5	0.25	0
Interprétation de la valeur de $mq_i$	Qualification disponible sur site	Qualification disponible en		Qualification non disponible	

---

suffisante à coût faible	interne
-----------------------------	---------

---

### 3.5.3.2.2 EVALUATION DE L'INDICE DE COUT DE MOBILISATION DE LA COMPETENCE NECESSAIRE (ETAPE 2.2)

La valeur de satisfaction de l'indice de coût de mobilisation de la compétence nécessaire est donnée par la formule (24) :

$$ush_{mc} = \sum_i^{nc} \omega_i * mc_i \quad (24)$$

$$\text{avec } \omega_i = \frac{\text{nombre de compétence } i \text{ dans le système}}{\text{nombre de compétence totale dans le système}} \quad (25)$$

$nc$  est le nombre de compétence totale dans le système humain

$mc_i$  désigne le coût de mobilisation de la compétence  $i$ . On propose la grille de notation suivante pour évaluer ce facteur (tableau 3-14).

**Tableau 3-14 grille d'évaluation de l'indice de coût de mobilisation d'une compétence**

<i>Niveau de coût de mobilisation de la compétence <math>i</math></i>	<b>TH</b>	<b>H</b>	<b>M</b>	<b>B</b>	<b>TB</b>
<i>Valeur de <math>mc_i</math></i>	0.1	0.3	0.5	0.7	1
<i>Interprétation de la valeur de <math>mc_i</math></i>	Coût très important, donc valeur non satisfaisante			Coût de mobilisation satisfaisant	

### 3.5.3.2.3 FORMULATION DE L'INDICE DE MOBILITE DU SYSTEME HUMAIN (ETAPE 2)

La combinaison des deux critères  $ush_{mc}$  et  $ush_{mq}$  conduit à la formulation de la valeur de l'indice de mobilité du système humain, en utilisant la formule (21). Cette synthèse est dans le (tableau 3-15).

**Tableau 3-15 Grille d'évaluation de l'indice de mobilité du système humain**

		Qualification disponible sur site		Qualification disponible en interne		Qualification non disponible	
		<b>Critère de disponibilité de la qualification</b>					
		TH	H	M	B	TB	
<b>Critère de coût de mobilisation de la qualification</b>	TH	0,1	0,1	0,1	0,1	0	
	H	0,3	0,3	0,3	0,3	0	
	M	0,5	0,5	0,5	0,3	0	
	B	0,7	0,7	0,5	0,3	0	
	TB	1	0,7	0,5	0,3	0	

Coût très important, donc valeur non satisfaisante

Coût de mobilisation satisfaisant

TH: Très Haut  
H: Haut  
M: Moyen  
B : Bas  
TB : Très Bas

En utilisant les indices de mobilité des modules techniques et du système humain, le paragraphe suivant présente la démarche de construction de l'indice de mobilité du SPM.

### 3.5.3.3 EVALUATION DE LA MOBILITE DU SYSTEME DE PRODUCTION (ETAPE 3)

L'indice de mobilité du système de production ( $I_m$ ) est une agrégation des deux indices de mobilité des modules techniques ( $I_{MT}$ ) et du système humain ( $I_{SH}$ ). Pour que le système de production soit mobile, il est nécessaire que tous ses composants puissent être mobiles. Un défaut de mobilité d'un composant matériel ou humain nuit à la mobilité de tout le système de production. Par conséquent, la fonction d'agrégation se doit d'être conservatrice car on suppose qu'il n'y a pas lieu d'effet de compensation entre la mobilité de chaque composant.

D'un autre côté, la mobilité des composants du système de production n'ont pas la même influence. La mobilité de certains composants du système de production est plus critique et a un impact plus important sur la mobilité de tout le système. De ce fait, il est nécessaire de considérer différents ordres d'importance dans la fonction d'agrégation (pondérations dans la fonction d'agrégation).

Ainsi la fonction d'agrégation que nous proposons est le produit pondéré puisqu'il permet de satisfaire aux conditions que nous venons de détailler. L'expression de cette fonction est donnée par la formule (26).

$$I_{ma} = I_{m_{MT}}^{\omega_{mt}} * I_{m_{SH}}^{\omega_{msh}} \tag{26}$$

Le premier critère ( $I_{MT}$ ) est l'indice de mobilité du système technique (défini dans la formule (13)), et le deuxième opérateur  $Im_{SH}$  mesure la mobilité du système humain (défini dans la formule (21)).

$\omega_{mt}$  est la pondération de la mobilités des composants techniques

$\omega_{msh}$  est le poids de la mobilité dus système humain.

Il est nécessaire de vérifier que :

$$\omega_{mt} + \omega_{msh} = 1 \quad (27)$$

On prend  $\omega_{mt} = 0.6$  et  $\omega_{msh} = 0.4$

### 3.5.4 CONCLUSION SUR LA CONSIDERATION DE MOBILITE DANS LE PROCESSUS DE CONCEPTION

Nous nous sommes intéressés dans cette partie à la prise en compte de la mobilité dans le processus de conception du SPM. A travers une analyse des différentes phases du processus de conception nous avons identifiés quatre types de mobilités (figure 3-7) : la mobilité fonctionnelle, la mobilité des procédés, la mobilité du système et la mobilités des modules. Nous nous sommes spécifiquement focalisés sur les 3 premiers types de mobilité.

Dans les premières phases du processus de conception d'un SPM, l'évaluation de la mobilité considère des attributs qualitatifs et nécessite un jugement des experts. L'avancement dans le processus de conception permet d'affiner la description du système et fournit ainsi des informations qui permettent de proposer une mesure quantitative de la mobilité du système.

L'indice de mobilité du système sera particulièrement utile dans la phase d'évaluation et de choix des alternatives de conception du SPM. En plus de cet indice, l'activité de choix de la meilleure implantation du SPM fait appel à plusieurs autres critères. La partie qui suit a pour objectif de présenter un modèle de sélection des implantations du SPM.

## 3.6 CONCLUSION DU CHAPITRE 3

Le concept de mobilité des systèmes de production a été introduit dans ce chapitre. Nous avons constaté que ce concept n'a pas été formellement défini dans la littérature et que les définitions existantes semblent dépendre du contexte d'utilisation. Nous avons exposé notre propre vision pour la mobilité d'un SPM. En l'occurrence, la mobilité géographique du système de production impacte tous les aspects du système de production aussi bien techniques que humains.



La mobilité du système de production offre une facilité d'adaptation à un environnement de plus en plus dynamique. Toutefois, elle nécessite de prendre en compte des aspects supplémentaires (phases de vie, aspects organisationnels, gestion des ressources sur site, etc). La prise en compte des spécificités de la mobilité se construit à travers chacune des phases du processus de conception du SPM. Dans les premières phases, l'évaluation de la mobilité considère des attributs qualitatifs et nécessite un jugement des experts. L'avancement dans le processus de conception permet d'affiner la description du système et fournit ainsi des informations qui permettent de proposer une mesure quantitative de la mobilité du système. Cependant, nous avons constaté l'absence d'une démarche basée sur des critères quantifiables pour évaluer la mobilité d'un système de production. A ce titre nous avons formalisé un indice de mobilité du système de production. Cet indice tient compte d'un côté de toutes les phases de vie du système et d'un autre côté, d'une approche holistique englobant tous les composants du système. En addition, notre démarche d'évaluation de la mobilité tient compte de l'environnement extérieur, des décisions de pilotage du SP, de stratégie de l'entreprise et enfin des données techniques liées à la conception du système.

L'indice de mobilité peut être amélioré d'avantage pour d'un côté tenir compte du potentiel de mobilité : le système de production peut avoir une mobilité limitée en l'état, mais moyennant un effort cette mobilité peut être améliorée. L'objectif est de quantifier le potentiel, i.e. l'amélioration qui pourrait être apportée à la mobilité du système tout en donnant une idée sur l'effort nécessaire pour atteindre ce potentiel de mobilité. Ces efforts peuvent être exprimés en coût ou délai nécessaires par exemple. D'un autre côté une démarche d'interprétation de la valeur de mobilité peut être proposée pour mieux cerner l'indice de mobilité et l'intégrer comme un critère de décision dès la phase de conception du système.



---

Chapitre  
4

## 4 EXTENSION DU CADRE DE CONCEPTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION A LA MOBILITÉ

---

FORMALISATION DE LA DÉMARCHE DE CONCEPTION D'UN SYSTÈME DE PRODUCTION MOBILE - PREMIER SITE

## *Sommaire*

---

<b>4 EXTENSION DU CADRE DE CONCEPTION DES SYSTÈMES DE PRODUCTION A LA MOBILITÉ</b>	<b>123</b>
<hr style="border-top: 1px dotted black;"/>	
4.1 INTRODUCTION.....	125
4.2 ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DU SPM EN AMONT DE LA CONCEPTION .....	128
4.2.1 <i>Analyse de l'environnement direct ou micro économique du SPM</i> .....	129
4.2.2 <i>Analyse de l'environnement indirect ou macro-économique du SPM</i> .....	132
4.2.3 <i>Analyse des systèmes contributeurs</i> .....	134
4.3 CONFIGURATION GÉNÉRIQUE DU SPM .....	136
4.4 ANALYSE DE LA STRATÉGIE DE PRODUCTION DANS UN CONTEXTE DE MOBILITÉ.....	137
4.4.1 <i>Importance de l'analyse de la stratégie de production dans un contexte de mobilité</i> .....	138
4.4.2 <i>Intérêt de l'analyse de la stratégie de production pour la conception de système de production</i> .	139
4.4.3 <i>Faire ou faire faire : l'analyse de l'existant</i> .....	140
4.4.4 <i>Proposition d'un modèle d'aide à la décision adapté pour le contexte du SPM</i> .....	146
4.4.5 <i>Conclusion sur l'analyse de la stratégie de production</i> .....	177
4.5 LA CONCEPTION DE LA CONFIGURATION DU SPM .....	178
4.5.1 <i>La sélection des implantations de système de production dans la littérature</i> .....	180
4.5.2 <i>Démarche de conception de la configuration du SPM adaptée pour un site de production</i> .....	183
4.5.3 <i>Conclusion sur la conception des configurations du SPM</i> .....	210
4.6 CONCLUSION SUR LA L'APPROCHE GÉNÉRALE DE CONCEPTION DE SPM POUR UN SITE DE PRODUCTION	211

## 4.1 INTRODUCTION

Pour rappel la démarche de conception d'un système de production multi site se fait en 2 étapes itératives : une première définition de solution capable à partir des informations du premier site qui correspond aux données certaines du problème. Il s'en suivra des itérations pour intégrer la mobilité sur plusieurs sites successifs dans un second temps.

Ce chapitre s'intéresse à cette première étape de définition d'un SPS à partir des données du premier site à implante. En se basant sur les acquis des deux précédents chapitres, nous allons exposer notre apport pour la formalisation d'une démarche de conception de SPM (figure 4-1).

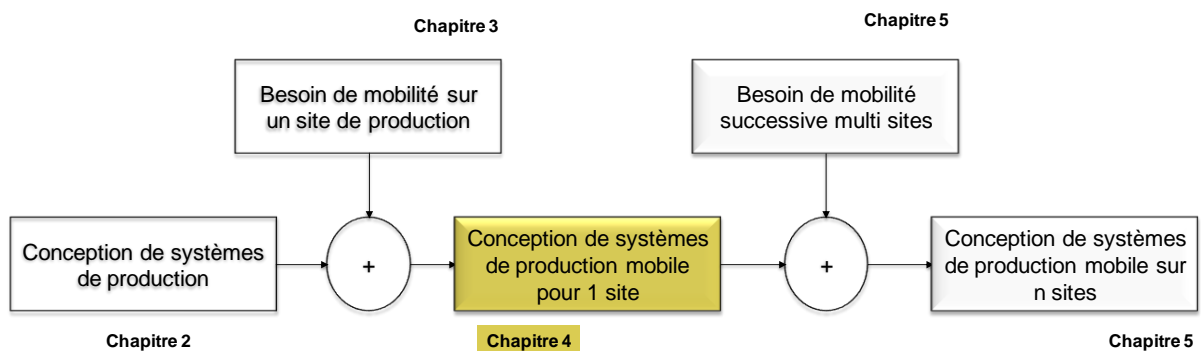


Figure 4-1 Positionnement de ce chapitre dans la démarche globale

La conception du SPM va partir des spécifications du cahier des charges correspondant à la demande d'un client sur un site de production identifié. Plusieurs points de vues sont prise en compte : une vue fonctionnelle, une vue informationnelle, une vue ressource et une vue organisationnelle. L'objectif de l'activité de conception du SPM sera de construire le système à partir et pour chacune de ces quatre vues.

Voici le déroulement des étapes clés du processus de conception qui commence par 1) un affinage du cahier des charge, 2) une recherche des limites de ce qui est à faire en interne ou faire sous traiter, puis 3) la proposition de solutions techniques pour la réalisation des opérations à mener.

1- L'activité de conception va se baser sur les exigences du cahier des charges (noté *CdC initial* sur la Figure 4-2) qui contient une description du produit à fabriquer (nomenclature) et les détails de la demande du client (volume de production, délais, exigences, etc.). Ce CDC initial va être enrichi d'informations et précisions obtenues après une analyse de l'environnement du SPM et du site de production. Cette première version enrichie du cahier des charges (noté *CdC\_1* sur la figure 4-2) permet d'imaginer une première configuration du SPM. Cette configuration du SPM, non optimale économiquement, représente une définition générique et capable, afin de répondre à la demande sur le site envisagé.

2- Cette configuration générique va être ensuite affinée par l'analyse de ce qu'il est pertinent de produire sur site ou ce qu'il est nécessaire d'externaliser. Cette analyse fait intervenir plusieurs critères et nécessite la mise en place d'une démarche d'évaluation et d'aide à la

décision. L'analyse du faire ou faire faire permet de statuer sur les fonctionnalités du SPM, i.e. les opérations que le SPM doit être capable de réaliser sur le site de production. La définition des fonctionnalités nécessaires du SPM vient enrichir la dernière version du cahier de charges de conception (noté *CdC* sur la Figure 4-2). Une fois le *CdC* de conception est finalisé, l'activité de conception de la configuration du SPM adéquate pour un site de production, peut être conduite.

3- Cette dernière activité va considérer en entrée le cahier des charges et les données techniques concernant toutes les ressources qui seront intégrées dans la configuration du SPM aussi bien que des hypothèses et informations de gestion de production internes à l'entreprise. Le choix de la configuration du SPM va se baser l'évaluation des critères classiques de coût, qualité et délais complétés d'autres critères spécifiques au concept de mobilité à savoir : l'indicateur de mobilité (qui a été introduit et formalisé dans le chapitre précédent) et l'indicateur d'intégrabilité visant à s'assurer que les configurations générées du SPM sont faisables.

Cette activité de conception nécessite l'utilisation de plusieurs techniques et méthodes d'évaluation telles que les techniques d'analyse multi critères et l'expression de la préférence du décideur/concepteur et comme toute activité de conception les connaissances métier demeurent indispensables.

La figure 4-2 synthétise la démarche de conception du SPM qui est revendiquée dans ce chapitre. Cette démarche sera détaillée est justifiée dans les parties qui suivent. Ce chapitre sera donc organisé en quatre parties.

- La première partie abordera l'analyse de l'environnement du SPM.
- La deuxième partie concernera la conception de la configuration générique du SPM.
- La troisième partie présentera un modèle d'aide à la décision qui est proposé pour l'analyse de la stratégie de production.
- La quatrième partie abordera la problématique de conception de la configuration adéquate du SPM adaptée pour un site de production.

Enfin, la dernière partie conclura ce chapitre.

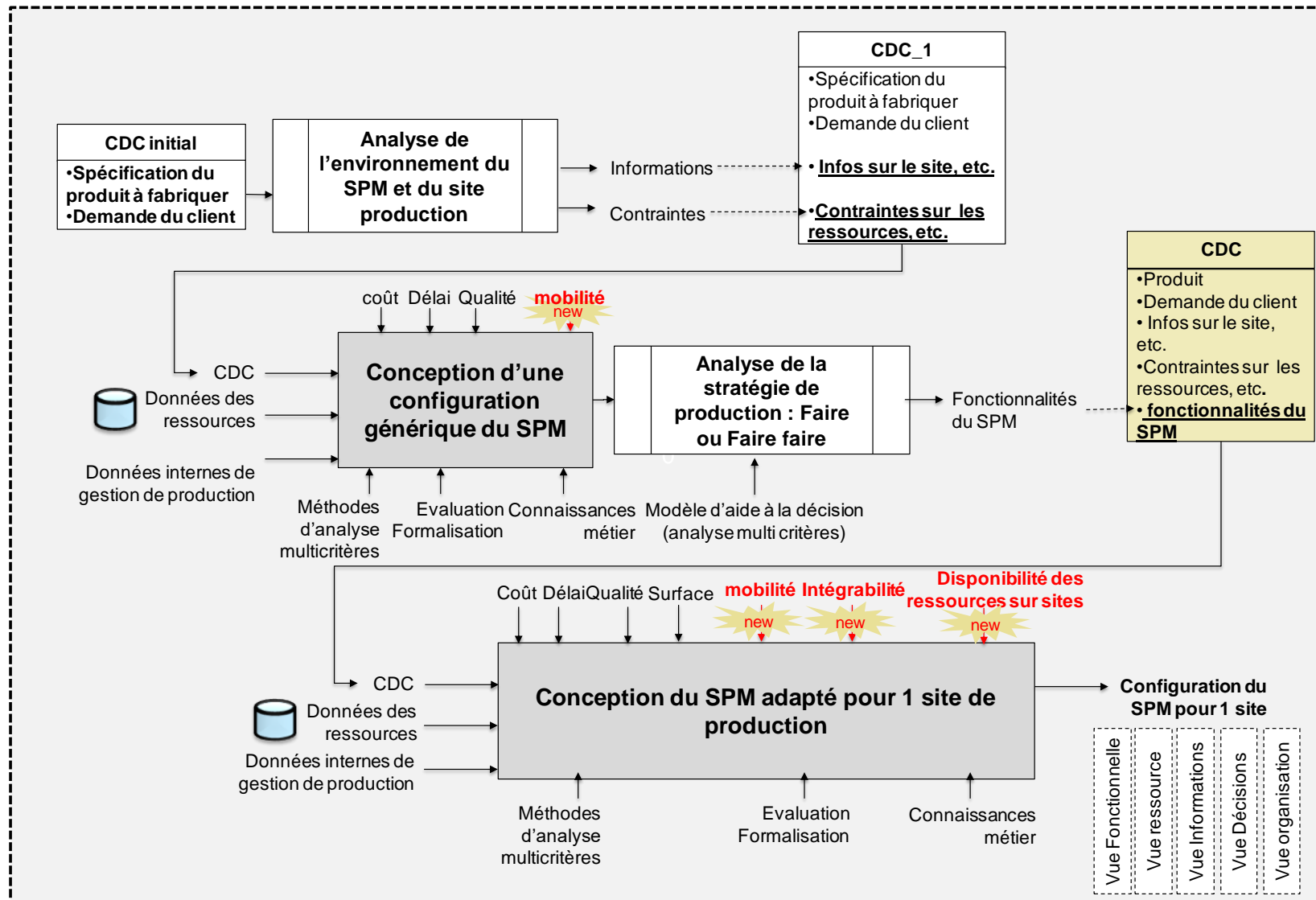


Figure 4-2 Démarche globale de conception d'un système de production mobile pour un site de production

## 4.2 ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DU SPM EN AMONT DE LA CONCEPTION

Le SPM est inclus dans un environnement avec lequel il interagit pour assurer sa finalité. L'environnement est défini comme tout ce qui est susceptible d'influencer ou d'être influencé par le système (Fiorèse and Meinadier, 2012). Comme le préconise l'ingénierie des systèmes, on peut distinguer deux types d'environnements pour un système : l'environnement direct et l'environnement indirect. Dans notre approche on assimile l'environnement direct au contexte micro-économique de l'entreprise, représentant l'environnement dans lequel l'entreprise opère et a une influence (même limitée). Quant à l'environnement indirect il correspond à l'environnement général ou macro économique dont les facteurs influencent l'entreprise sans qu'elle ait un contrôle direct sur eux. L'analyse de l'environnement du SPM considérée dans cette partie sera scindée en 3 parties : l'analyse de l'environnement direct du SPM, l'analyse de l'environnement indirect du SPM et l'analyse des systèmes contributeurs du SPM.

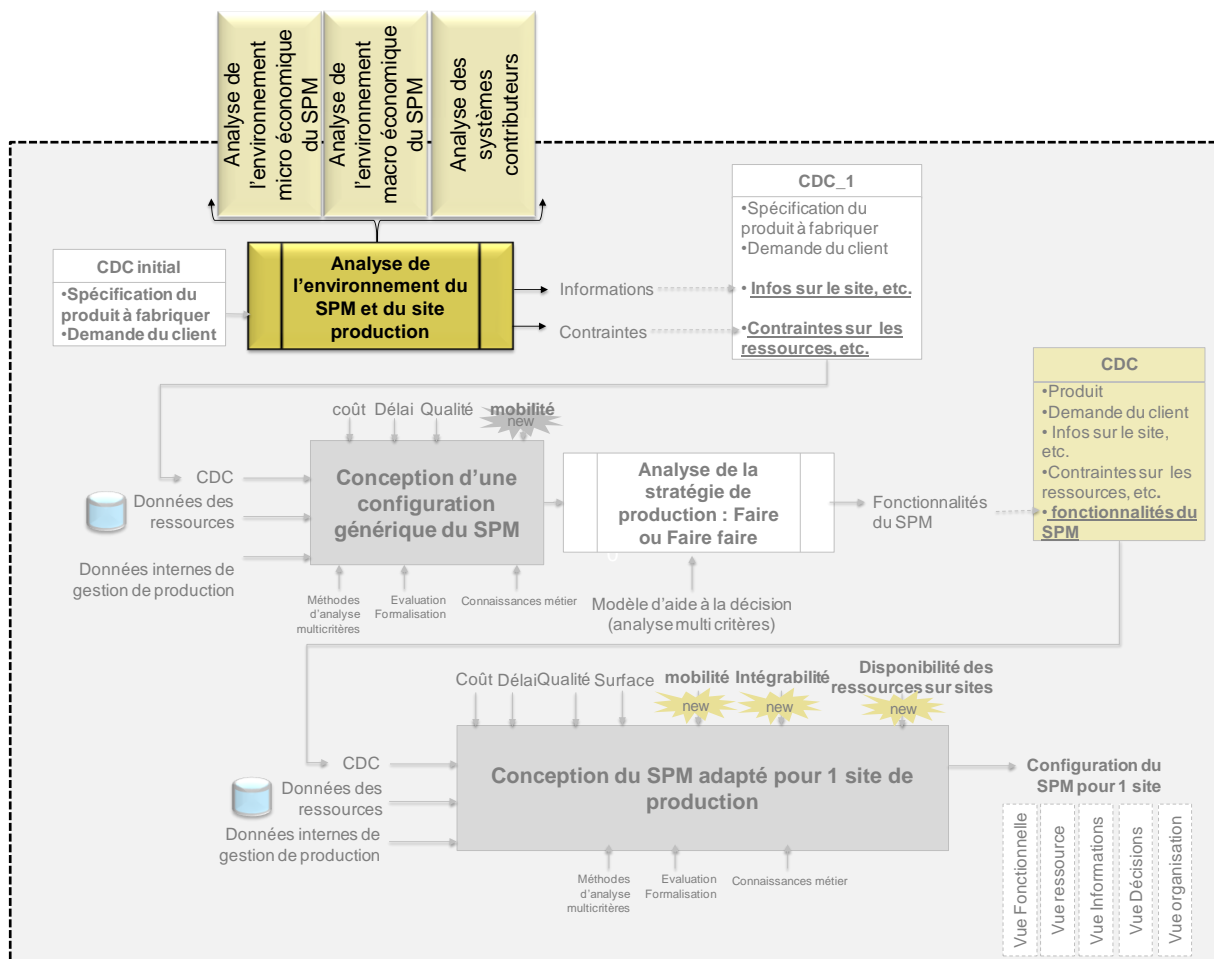


Figure 4-3 Les trois aspects de l'analyse de l'environnement du SPM et du site de production et leurs contributions dans la démarche proposée



### 4.2.1 ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DIRECT OU MICRO ECONOMIQUE DU SPM

Pour l'analyse de l'environnement micro économique, (Porter, 1980) considère que les conditions de concurrence au sein d'un secteur dépendent de 5 forces (figure 4-4). L'identification de ces cinq forces permet à l'entreprise d'avoir une vision d'ensemble des acteurs d'un secteur et d'anticiper leur impact potentiel sur la profitabilité des entreprises en présence (Thiéart and Xuereb, 2009).

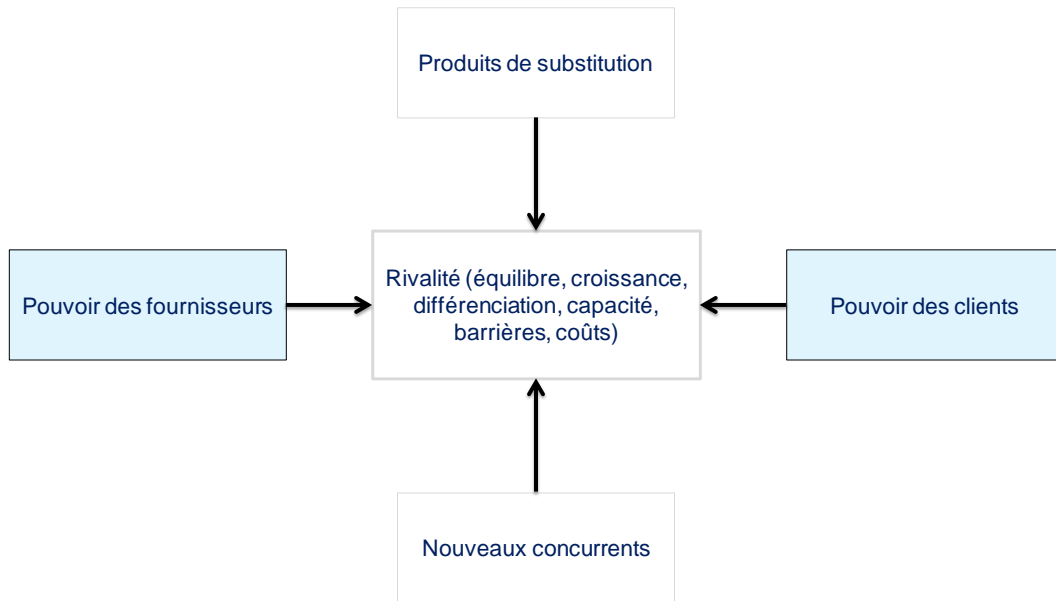


Figure 4-4 Les cinq forces influençant l'environnement micro-économique d'après (Porter, 1980)

La première menace est la rivalité entre **les concurrents présents** dans un secteur. Leur nature influe sur la stabilité de leurs positions sur le marché. Cette intensité concurrentielle dépend des facteurs suivants (Thiéart and Xuereb, 2009) : l'équilibre des forces entre les firmes sur le marché, le taux de croissance de l'industrie, car une croissance faible de l'industrie entraîne une lutte intense entre les firmes qui ne peuvent se développer qu'au détriment des autres; l'importance des coûts fixes, le niveau d'accroissement des capacités, la différenciation des produits et services et enfin l'existence de barrières à la sortie qui freinent le retrait du marché de certaines entreprises.

La deuxième menace qui exerce une influence sur l'intensité de concurrence dans un secteur est le risque d'entrée de nouveaux concurrents. **Les nouveaux entrants** apportent des capacités de production supplémentaires et la volonté de vendre leurs produits et services (Thiéart and Xuereb, 2009). Ce risque dépend de l'existence des barrières suivantes à l'entrée du secteur industriel (Thiéart and Xuereb, 2009) : existence une économie d'échelle, la difficulté de coût de changement de fournisseur, l'effet d'expérience, la facilité d'imitation de la technologie, la possession de ressources rares, l'aisance d'accès au réseau de distribution et le phénomène de réputation.

La troisième menace est présentée par **les produits de substitution** qui peut être proposés par des entreprises d'autres secteurs. Le niveau de cette menace dépend des facteurs suivants (Thiétart and Xuereb, 2009) : le risque d'obsolescence des produits, le niveau de coût de transfert, la puissance des entreprises à l'origine du substitut et la capacité de riposte des entreprises de l'industrie. La quatrième force à prendre en compte est le **pouvoir des clients**. En forçant les prix à la baisse et en exigeant une meilleure qualité de produits et services, les clients pèsent sur la nature de la concurrence dans un secteur (Thiétart and Xuereb, 2009). Le pouvoir des clients peut émaner de la concertation des clients, l'importance des achats dans le coût global des clients, la facilité pour le client de changer de fournisseur, ou si le nombre de fournisseurs est important (Thiétart and Xuereb, 2009).

Finalement la dernière menace que subissent les entreprises est le **pouvoir des fournisseurs**. La pression de fournisseurs puissants peut se manifester par des augmentations de prix ou par des modifications de la nature et de la qualité des produits et services fournis. Le pouvoir des fournisseurs peut dépendre de (Thiétart and Xuereb, 2009) : le niveau de concentration des fournisseurs, l'existence d'une offre différenciée, la difficulté de changement de fournisseur, le risque d'intégration verticale avale vers le client et le nombre des clients.

*Nous considérons que dans notre contexte pour chaque nouvelle commande le SPM intervient dans le cadre d'un projet à client unique et fournit un produit unique en grande quantité.* Le produit étant adapté en fonction de la demande du client, on peut faire l'hypothèse que la menace des produits de substitution peut être négligée. De même pour la menace des nouveaux concurrents, outre la concurrence pour l'accès au contrat de projet, l'impact de la rivalité des concurrents a un impact sur la définition des coûts. Or pendant la phase d'exploitation du SPM les effets de la concurrence peuvent être supposés négligeables.

Les fournisseurs du SPM sont de deux natures : des fournisseurs locaux et des fournisseurs mondiaux. Les fournisseurs locaux sont engagés uniquement pour la durée d'un cycle de production sur un site donné. Ces fournisseurs locaux peuvent être choisis sur la base de leur proximité du site de production. Les fournisseurs mondiaux peuvent être engagés par une relation durable sur SPM et assure l'approvisionnement du SPM sur plusieurs cycles de production. Dans l'objectif d'évaluer la performance d'un fournisseur, des informations liées à des aspects: économiques, qualité de service et capacité technique. Le tableau 4-1 expose des critères à prendre en compte, ils sont proposés à partir de l'analyse bibliographique et complétés par nos propositions spécifiques liées à la dimension de mobilité.

Tableau 4-1 informations nécessaires pour la caractérisation d'un fournisseur

Aspects	critère	Description	Références
économiques	<i>Localisation géographique</i>	Définit la localisation du fournisseur en vue d'évaluer la distance par rapport au site de production	(BENAMA et al., 2014)
	<i>Prix de vente</i>	Définit le prix de vente proposé par le fournisseur en vue d'estimer les coûts d'approvisionnements	(Ronan T. McIvor et Humphreys 2000)
	<i>Coût associé au temps perdu dû à des pièces rejetés</i>	Estime les coûts qui peuvent être associés au temps dû au rejet des pièces pour des raisons de non qualité.	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Coût de Visites du site des fournisseurs</i>	Estime les coûts qui peuvent être associés aux visites nécessaires du site des fournisseurs.	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Coût de validation des échantillons</i>	Estime les coûts supportés par l'entreprise pour la validation des produits du fournisseur	(McIvor and Humphreys, 2000)
Qualités de services	<i>Taux de service</i>	Renseigne sur la qualité du service du fournisseur. Ce taux peut être évalué en terme de nombre de commandes réceptionnées à temps par rapport au nombre de commandes totales.	(McIvor and Humphreys, 2000)
Capacité technique	<i>Capacité de production</i>	La capacité du fournisseur à respecter le plan de production prévu	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Support technique</i>	L'aptitude du fournisseur à fournir un support technique	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Capacité de conception</i>	Définit la capacité du fournisseur à mener des activités de conception	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Investissement en R&amp;D</i>	Renseigne sur la capacité d'innovation du fournisseur et sa stratégie de R&D	(McIvor and Humphreys, 2000)
	<i>Taux d'introduction de nouveaux produits</i>	Renseigne sur la réactivité du fournisseur par rapport à l'introduction de nouveaux produits.	(McIvor and Humphreys, 2000)

Les clients vont pouvoir fixer les prix ainsi que le choix du site sur lequel le système de production doit intervenir. Il est nécessaire de conduire une analyse de la demande du client pour déterminer, à partir d'une demande exprimée sur un horizon de temps donné, quelle sera la capacité nécessaire du système. La capacité traduit la cadence à laquelle le SPM doit produire pour répondre à la demande dans les délais nécessaires. Cette capacité peut être exprimée en terme de nombre de produits réalisés par jour, ou en terme de durée nécessaire

pour réaliser un produit. Elle s'exprime en nombre de produits par jours et se calcule comme suit :

$$\text{capacité} = \frac{Q}{D} = \frac{\text{quantité de produit à réaliser au total}}{\text{délai demandé par le client exprimé en jours ouverts}} \quad (28)$$

#### 4.2.2 ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT INDIRECT OU MACRO-ECONOMIQUE DU SPM

Au delà de ce qui interagit directement avec le système de production, l'analyse de l'environnement doit s'étendre à (Fiorèse and Meinadier, 2012) :

- ce qui est susceptible d'être indirectement impacté par l'existence du système (impacts sociaux, économiques, écologiques conséquences de son existence, de son dysfonctionnement, de ses rejets...),
- ce qui, dans l'environnement, risque de faire peser des menaces ou des limitations d'emploi ou de capacités, tant sur le système que sur les services qu'il rend (disponibilité de ressources, disponibilité de personnels qualifiés pour opérer le système...),
- ce qui impose des contraintes au système (législation, réglementation, organismes de défense de l'environnement, organisations représentatives des travailleurs, des utilisateurs directs et indirects...)

L'identification et la prise en compte des risques réciproques système-environnement sont nécessaires (Fiorèse and Meinadier, 2012). Cette analyse est utile aussi pour identifier quelles données et informations externes à l'entreprise sont nécessaires de collecter en vue de concevoir le système de production. L'étude de l'environnement indirect peut se baser sur des approches tel que PESTEL qui identifie six types de facteurs principaux caractérisant le macro environnement d'une entreprise. Ces facteurs peuvent être de nature :

- **Politique** : stabilité politique, commerce extérieur (règles de dédouanement), droit de la concurrence. etc.
- **Economique** : les cours de matière première, la politique monétaire, les niveaux de salaire, Infrastructure, etc.
- **Socioculturelle** : la qualité de la main d'œuvre, la disponibilité de qualification, le niveau de formation, l'attitude de loisir et de travail, syndicalisation, etc.
- **Technologique** : les dépenses en R&D, le niveau de maturation technologique, etc.
- **Ecologique** : lois sur la protection de l'environnement, retraitement des déchets, etc.
- **Légale** : Droits de l'homme, droit social, droit de travail, etc.

En plus des facteurs suscités, les facteurs géographiques liés au site d'implantation du système de production (tels que l'existence d'infrastructure, la localisation géographique ou les facteurs climatiques) peuvent avoir un impact sur les choix de conception du système de production. Ces facteurs géographiques doivent être identifiés et prises en compte.

Un système de production est souvent lié à un site de production sur lequel il est destiné pour produire. Les décisions de choix de la localisation de production est généralement dominées par les fonctions marketing et manufacturing (Dowlatshahi, 1996). Dans le contexte d'un système de production sédentaire, la prise en compte des spécifications du site de production se pose uniquement en début de la phase de conception du système. Le site de production étant unique, il est parfaitement identifié. Pour un SPM, le même système de production doit être amené à changer de site de production, la performance du système de production peut être impactée par les caractéristiques du site. Les choix de conception dépendent alors des caractéristiques du site de production.

L'identification des caractéristiques du site de production se pose à deux niveaux :

- les éléments qui impactent directement le SPM. On identifie alors 3 types d'interactions :
  1. Le site de production est client du SPM. Dans ce cas le SPM doit répondre à une demande exprimée par une quantité de produits, un délai de production, une qualité de produit à respecter et un coût objectif de production.
  2. Le site de production est fournisseur du SPM. Une partie des ressources humaines et énergétiques nécessaires pour le fonctionnement du SPM sont directement "fournies" par le site de production.
  3. Le SPM doit s'adapter à des contraintes du site de production comme la localisation géographique du site de production les contraintes climatique (températures, humidité, etc), ou les infrastructures existantes (réseau routier, etc.).
- les éléments qui agissent indirectement sur le SPM, mais sur lesquels le SPM ne peut agir. Ils concernent les éléments de l'environnement politique, économique, socioculturel, technologique, écologique et légal du site de production. Le tableau 4-2 présente quelques exemples de ces éléments.

Tableau 4-2 Classification des facteurs caractérisant l'environnement du site de production

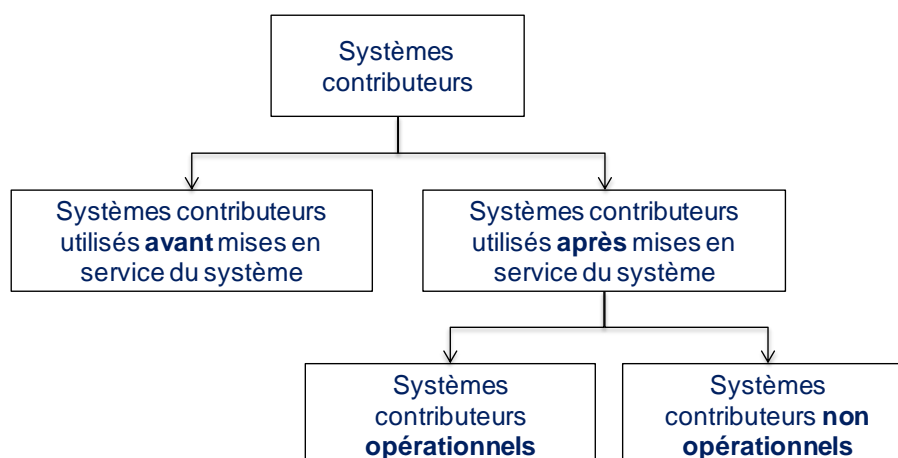
Contexte	Catégorie	Eléments
<b>Eléments impactant directement le SPM</b>	<i>Le site est client du SPM</i>	Volume de produits
		Délai
		Quantité Coût objectif de production Qualité des produits Etc.
<b>Eléments impactant indirectement le SPM</b>	<i>Le site est fournisseur du SPM</i>	Opérateurs locaux, compétences nécessaires Etc.
	<i>Le site impose des contraintes</i>	Localisation géographique, contraintes climatiques. Etc.
<b>Eléments impactant indirectement le SPM</b>	<i>Facteurs politiques</i>	Stabilité politique du pays Niveau de sécurité dans la région Etc.
	<i>Facteurs</i>	Coût de la matière première

<i>économiques</i>	Coût de dédouanement Coût de transport Evolution du marché Coût de l'électricité Etc.
<i>Facteurs socioculturels</i>	Développement durable Création d'emploi local Qualité de la main d'œuvre Formation Syndicalisation Etc.
<i>Facteurs technologiques</i>	Evolution de la technologie utilisée Disponibilité des ressources nécessaires pour l'exploitation et la maintenance du SPM. Etc.
<i>Facteurs Ecologiques</i>	Filière de Recyclage, gestion de déchets Développement durable Etc.
<i>Facteurs légaux et législatifs</i>	Code de travail Fiscalité Etc.

Au cours de son cycle de vie, le SPM a besoin de la contribution d'autres systèmes. Ces systèmes sont appelés systèmes contributeurs<sup>24</sup>. Le paragraphe suivant analyse les systèmes contributeurs nécessaires pour un SPM

### 4.2.3 ANALYSE DES SYSTEMES CONTRIBUTEURS

Les systèmes contributeurs doivent être opérationnels pendant les stades de vie du *SPM* où ils sont sollicités. Ces systèmes contributeurs peuvent être classifiés selon leurs phases d'intervention dans le cycle de vie du SPM (figure 4-5) : avant mise en service du SPM ou après mise en service du SPM. Fiorèse et Meinadier (2012) distinguent :



<sup>24</sup> terminologie utilisée en ingénierie des systèmes.

Figure 4-5 Classification des systèmes contributeurs

- les systèmes contributeurs utilisés avant la mise en service du système. Ces systèmes doivent être opérationnels avant la mise en service du SPM. on peut citer par exemple: systèmes de développement, de fabrication du SPM, etc,
- les systèmes contributeurs utilisés après la mise en service (figure 4-6), ils doivent être fonctionnels à chaque mise en service du SPM sur un nouveau site de production. Parmi ces systèmes on peut distinguer :
  - les systèmes contributeurs opérationnels, dits aussi systèmes de soutien opérationnel dans certains contextes : ce sont les systèmes contributeurs qui sont indispensables à l'accomplissement des missions principales du *SPM* en exploitation, après sa mise en service. Pendant la phase d'exploitation le *SPM* nécessite la contribution du :
    - système de logistique pour assurer l'acheminement sur site des équipements composant le *SPM*, ainsi que l'approvisionnement des matières premières,
    - système de montage et démontage du *SPM*. L'acheminement du SPM sur site se fait sous la forme de plusieurs modules. Le système de montage assure l'intégration et la mise en service du *SPM*, tandis que le système de démontage intervient à la fin de la production pour remettre le SPM en état de transport.
    - système de maintenance sur site qui assure le maintien des performances du *SPM* pendant la phase d'exploitation sur le site de production. Cela nécessite, le déploiement des stratégies de maintenance (préventive, curative,...), la disponibilité des ressources (matérielles et humaines) ainsi que l'approvisionnement, stockage et gestion des pièces de rechanges.
  - les systèmes contributeurs non opérationnels qui sont sollicités hors des situations d'emploi du SPM. On peut citer le système de stockage long entre deux commandes. La nécessité de la phase de stockage a été justifiée dans le paragraphe § 3.3.3.1 du chapitre précédent.

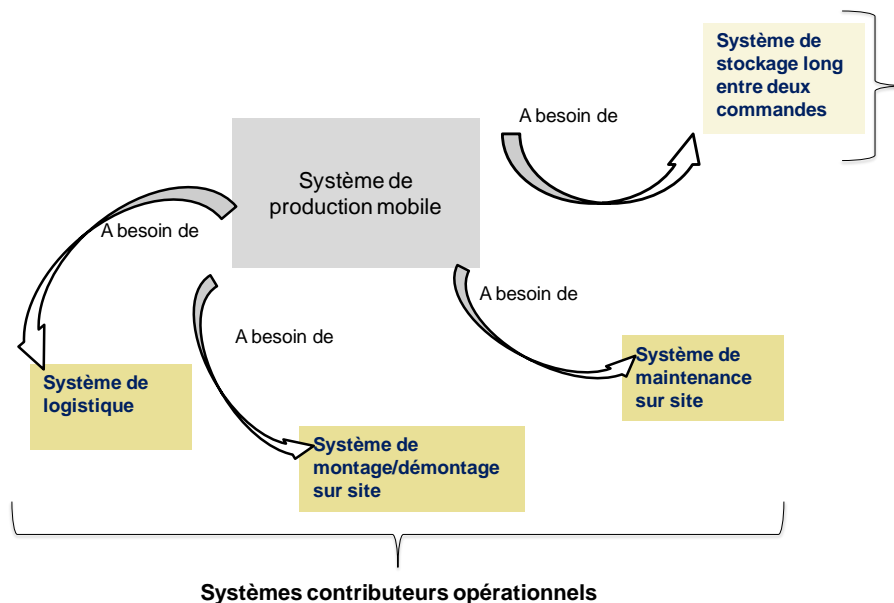


Figure 4-6 Pendant l'exploitation, le SPM a besoin de systèmes contributeurs

Les analyses de la demande du client, des fournisseurs du SPM, du site de production et des systèmes contributeurs permettent de caractériser l'environnement global du SPM vis-à-vis duquel le SPM doit être conçu. Ces analyses saisissent les informations nécessaires pour caractériser l'environnement du SPM et viennent ainsi enrichir la définition du cahier des charges (noté CdC\_1 sur la figure 4-2). Cette version du CdC est suffisante pour dresser une définition générique de la configuration du SPM nécessaire.

### 4.3 CONFIGURATION GÉNÉRIQUE DU SPM

L'analyse de l'environnement du SPM et du site de production permet d'enrichir le cahier des charges initial en spécifiant les informations (localisation, coûts horaires, etc) ainsi que les contraintes (disponibilité de ressources, infrastructures existantes, etc) liées au site de production. Le cahier de charges enrichi (noté CDC\_1 sur la figure 4-2) sert de base pour mener une première réflexion sur la conception d'une configuration du SPM. Cette conception part de l'hypothèse que pour produire le produit final ***il faut assurer toutes les opérations sur le site de production en tenant compte de la contrainte de mobilité des modules dans un second temps***. L'objectif de cette première réflexion sur la conception du SPM est de définir une première architecture (qui n'est pas obligatoirement la plus aboutie) du SPM. Cette première réflexion permet en l'occurrence de définir les concepts de procédés qui seront nécessaires pour produire le produit à fabriquer. Cette configuration permet de spécifier toutes les ressources qui seraient nécessaires pour produire en interne le produit à fabriquer. De plus, Cette première configuration permet aussi de renseigner également les premiers indicateurs de performance (coût, qualité, délai). Même si ces indicateurs ne sont pas fiables puisqu'ils ne tiennent pas compte de tous les aspects du SPM, ils permettent de donner d'évaluer qualitativement les orientations de conception (pour donner une première réponse sommaire à un client par exemple).

Cette configuration générique du SPM permet de fournir des données quantifiées sur les ressources nécessaires (coût investissement, performances techniques attendus, etc.). Ceci permet d'alimenter une analyse plus approfondie de la stratégie de production à adopter sur le site de production : que faut-il produire réellement en interne (faire) et qu'est-ce qu'il serait judicieux d'externaliser (faire faire).

A chaque site de production cette question se pose. Elle dépend de plusieurs critères techniques, économiques, stratégiques, etc, et est complexe à évaluer. Cette complexité est d'autant plus augmentée quand il s'agit d'un contexte de mobilité d'autres aspects s'imposent dans l'analyse. Face à cette complexité, il est nécessaire de mettre en place un modèle d'aide à la décision. Cela fait l'objet de la partie qui suit.



## 4.4 ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION DANS UN CONTEXTE DE MOBILITE

La conception de la configuration du SPM dépend de ce qu'il faut faire en interne ou externaliser. Cette analyse de la stratégie de production concerne tout composant/produit défini dans le cahier des charges. Le résultat de cette décision permet de déterminer les fonctionnalités du SPM, i.e. qu'est ce que le SPM doit être capable de faire en terme d'opérations nécessaires ou produits à fabriquer/assembler. La détermination des fonctionnalités du SPM, via l'analyse de la stratégie de production, vient compléter le cahier des charges de conception du SPM (cf. figure 4-7).

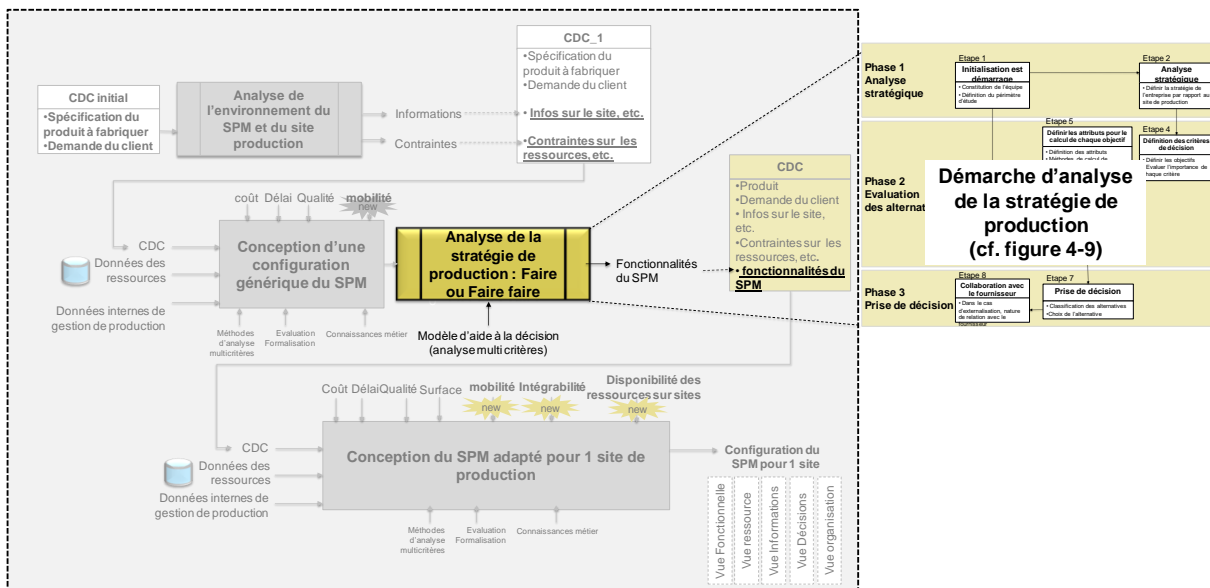


Figure 4-7 le positionnement de la démarche d'analyse de la stratégie de production dans l'approche globale de conception du SPM

Le choix de la stratégie de production détermine le degré d'intégration verticale de l'entreprise (Kleinhans et al., 1998; Padillo and Diaby, 1999). Connue aussi sous le nom de la problématique de "faire ou faire faire"<sup>25</sup> (Make or buy, M or B), elle peut être un facteur déterminant de la rentabilité de l'entreprise (McIvor and Humphreys, 2000). La stratégie de faire ou faire faire définit les frontières de l'entreprise ainsi que le type de relation à établir avec les fournisseurs, sous-traitants et clients, elle permet aussi de modifier ces frontières quand c'est nécessaire (Kleinhans et al., 1998). Étant une partie de la stratégie d'entreprise, la décision de faire ou faire faire détermine parmi les produits et activités de l'entreprise ceux qui seront réalisés en interne et ceux qui doivent être externalisés. Au sein d'une entreprise la problématique de faire ou faire faire concerne plusieurs fonctions structurantes de l'entreprises (Padillo and Diaby, 1999) : (1) organisation industrielle, (2) stratégie de l'entreprise ou du groupe, (3) gestion des achats ou des approvisionnements, (4) management des opérations stratégiques, (5) recherche opérationnelle et (6) comptabilité analytique ou management

<sup>25</sup> Dans ce manuscrit nous utiliserons indifféremment les termes de "stratégie de production", "décision de faire ou faire faire", "faire ou acheter" ou "faire en interne ou externaliser".

d'entreprise. Dans notre contexte on s'intéressera à la fonction de production qui relève de l'organisation industrielle de l'entreprise et qui utilise un concept de SPM.

Dans le contexte du SPM, la stratégie de production est remise en cause pour chaque nouveau site de production. Le but de cette partie est de proposer un modèle d'aide à la décision pour l'analyse de la stratégie de production dans un contexte d'un seul site de production identifié. Dans un premier temps nous allons présenter l'intérêt de cette analyse dans le processus de conception et la nécessité de la considérer dans un contexte de mobilité. Ensuite, à travers une étude de l'état de l'art, nous allons discuter des travaux qui se sont intéressés à cette question. Puis, nous exposerons les limites des modèles existant pour une application dans un contexte de mobilité. Enfin, nous proposerons un cadre d'aide à la décision répondant aux problématiques soulevées.

#### **4.4.1 IMPORTANCE DE L'ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION DANS UN CONTEXTE DE MOBILITE**

La stratégie de production est définie en tenant compte du contexte (économique, technique, etc.) du site de production ainsi que des caractéristiques des fournisseurs potentiels (localisation, coûts, aptitudes techniques, etc.). Dans un contexte de mobilité, la question de faire ou faire faire se pose pour chaque (nouveau) site de production. En changeant de contexte, plusieurs considérations évoluent remettant ainsi en cause la stratégie de production qui pouvait être optimale pour un site (ou une période de temps) précédent. Ces considérations peuvent être d'ordre :

- économique : le coût des matières premières, le coût de la main d'œuvre, les positions des fournisseurs et du nouveau site de production vont avoir un impact sur les coûts de revient des produits finaux et ainsi favoriser soit la stratégie de faire en interne ou externaliser certaines activités.
- technique : la disponibilité de mains d'œuvre qualifiée va favoriser soit l'externalisation ou le travail en interne. L'analyse de la capacité interne d'une entreprise doit prendre en compte les contraintes de mobilité des moyens de production.
- stratégique : des contraintes de création d'emploi local peuvent aussi influencer le choix de stratégie de production.

***Le changement de site de production (besoin de mobilité) remet en question les décisions de faire ou faire faire***

En s'intéressant aux liens entre la stratégie de production et le besoin de mobilité, on peut mettre en avant deux types de relations (figure 4-8) :

- *Le besoin de mobilité remet en question la stratégie de production.* Ce ci touche le changement de stratégies et la limite entre le faire et le faire faire. Mais, sur une stratégie identique, cela impacte aussi le choix de fournisseur.

- *L'optimisation de la stratégie de production va décider du type de mobilité.* L'analyse de la décision de faire ou faire faire va décider, pour une activité de production donnée, les opérations réalisées en interne ou externalisée. La décision de faire en interne nécessite de mobiliser des modules du SPM sur le site de production (*mobilité des moyens*). La décision d'acheter chez un fournisseur ou sous-traitant externe va nécessiter de transporter des produits ou composants (*mobilité des produits*).

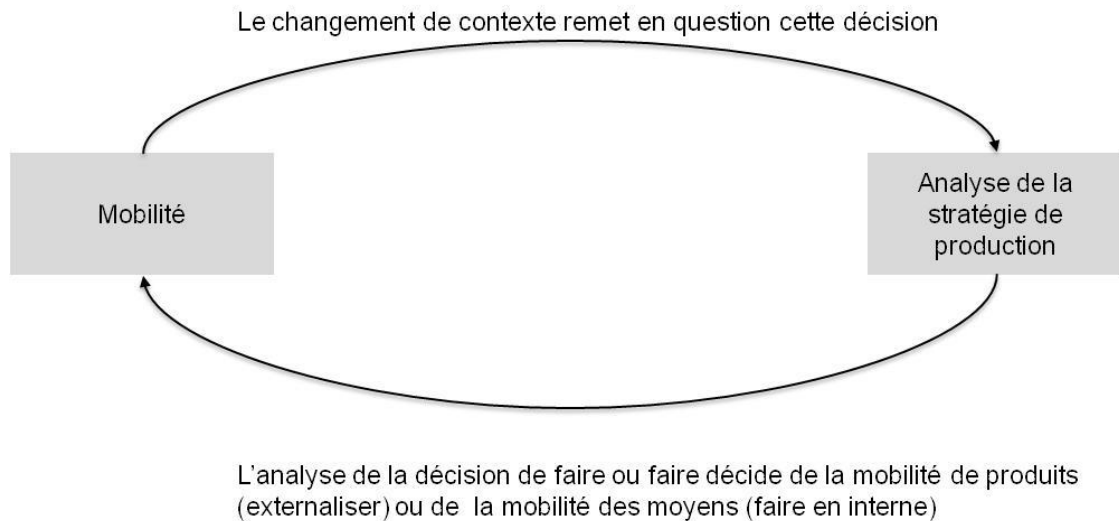


Figure 4-8 Liens entre mobilité et l'analyse de la stratégie de production

#### 4.4.2 INTERET DE L'ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION POUR LA CONCEPTION DE SYSTEME DE PRODUCTION

En amont du processus de conception, le cahier des charges (noté CDC\_1) va définir les fonctionnalités et les capacités nécessaires pour produire tous les produits et services de l'entreprise. Suite à la définition d'une configuration générique du SPM, l'analyse de la stratégie de production va affiner ce besoin en se concentrant particulièrement sur les fonctionnalités et capacités que l'entreprise doit réaliser en interne et que le SPM doit intégrer.

La décision de "faire ou faire faire" va en particulier influencer les questions telles que : déterminer la capacité et l'implantation des infrastructures de l'entreprise, ou développer de nouveaux produits (McIvor and Humphreys, 2000). A l'échelle du système de production, cette analyse (en interne quoi produire et en quelles quantités) permet de choisir les ressources techniques et humaines nécessaires (type et capacité). L'analyse de la stratégie de production sert pour le dimensionnement de la configuration adapté au contexte réel du site de production en question.

Cette problématique occupant une position centrale dans la définition de la stratégie de l'entreprise, a suscité beaucoup d'intérêt dans la communauté scientifique. Le paragraphe suivant propose une revue de la littérature sur ce sujet que nous enrichirons de nos apports liés à la contrainte de mobilité.

### 4.4.3 FAIRE OU FAIRE FAIRE : L'ANALYSE DE L'EXISTANT

A notre connaissance, aucun modèle n'a tenu compte de l'aspect de mobilité du système de production. Nous analyserons d'abord les modèles de décisions qui ont été proposés pour répondre à la question de faire ou faire faire dans le contexte des systèmes de production classiques. Puis nous aborderons la dimension multicritères du problème.

#### 4.4.3.1 LES MODELES D'ANALYSE DE LA DECISION "FAIRE OU FAIRE FAIRE"

Les modèles d'analyse de la décision de faire ou faire faire peuvent être classés selon deux courants de pensée (Van de Water and Van Peet, 2006) : d'une part, des modèles descriptifs qui cherchent à répondre à la question "*pourquoi externaliser?*" et d'autre part, des modèles prescriptifs se présentant comme une approche de conception fournissant des outils structurés pour l'aide à la décision.

1. Les modèles descriptifs adoptent trois approches (Van de Water and Van Peet, 2006) :

- une approche visant à réduire les coûts de transaction en se basant sur la théorie des coûts de transaction (Williamson, 1981). Selon ce type d'approche les activités considérées comme stratégiques ne doivent pas être externalisées,
- une approche visant à externaliser les activités, même stratégiques, qui ne contribuent pas à l'atteinte d'un avantage compétitif pour l'entreprise. Ce type d'approche fait appelle à une vue ressource de l'entreprise (Wernerfelt, 1984),
- une approche qui vise à créer des partenariats avec d'autres entreprises pour accéder à un savoir ou des outils stratégiques que l'entreprise ne possèdent pas à la base. Dans cette approche même des activités stratégiques de l'entreprise peuvent être externalisées en vue de réaliser des profits mutuels pour toutes les parties concernées. Cette approche utilise une vue relationnelle de l'entreprise (Dyer and Singh, 1998).

2. Les modèles prescriptifs fournissent une démarche structurée, qui peuvent en même temps utiliser une ou plusieurs des approches descriptives susmentionnées (Van de Water and Van Peet, 2006). Nous nous intéressons à ce type d'approches prescriptives pour la construction du modèle de décision.

Probert (1996) aborde la question de faire ou faire faire en adoptant un point de vue technologique. Il considère l'état de la technologie comme un point de départ pour l'analyse de la décision d'externalisation. Le modèle proposé par Probert s'appuie sur l'évaluation des processus technologiques d'une part en terme d'importance de la technologie pour l'entreprise ainsi que son influence sur les facteurs clés de succès de l'entreprise et d'autre part, en terme de l'avantage concurrentiel avec lequel la dite technologie est déployée (Van de Water and Van Peet, 2006). Selon Probert, si une technologie est importante et contribue à conserver un avantage concurrentiel de l'entreprise, elle doit être maintenue en interne. En revanche, les technologies qui possèdent un intérêt limité du point de vue concurrentiel, peuvent être externalisées. Probert (1996) a proposé un processus de décision composé de quatre étapes. La première phase est une évaluation préliminaire qui consiste à collecter les données sur l'entreprise et son environnement (concurrents et fournisseurs). Ensuite la phase d'analyse

interne et externe consiste à identifier les familles de produits, les technologies utilisées, les modèles de coûts servant pour l'évaluation des processus technologiques et l'évaluation de l'importance et de la compétitivité des technologies utilisées. La troisième phase permet d'évaluer les options stratégiques identifiées dans la phase précédente en utilisant des modèles financiers pour l'aide à la décision. Enfin la dernière phase permet le choix de la stratégie optimale ainsi que l'évaluation des implications de ce choix.

Contrairement au point de vue technologique, McIvor et al. (1997, 2000) adresse la question de faire ou faire faire d'un point de vue ressources en distinguant les activités stratégiques et non-stratégiques. Un processus en quatre étapes permet de tenir compte des priorités de l'entreprise. La première phase permet l'identification et la priorisation des activités stratégiques et non stratégiques de l'entreprise. Les trois étapes suivantes analysent les compétences stratégiques, les capacités internes et externes et les coûts totaux d'acquisition internes et externes. Selon van de Water and van Peet (2006), le modèle de Mc Ivor reste un modèle conceptuel n'offrant pas d'application opérationnelle. Un autre modèle développé par (Platts et al., 2002) est construit explicitement sur des facteurs de l'environnement extérieure de l'entreprise (tels que le besoin de réduire les coûts, besoin de réductions du temps de mise sur le marché, etc) qui déclenchent le besoin d'adresser la question de faire ou faire faire. Le cadre de décision proposé par Platts et al. (2002) se base sur un processus en 3 phases intégrant notamment l'aspect organisationnel lié à ce processus. Une première phase de préparation au cours de laquelle l'équipe de projet est constituée et les familles de produits à considérer sont spécifiées. Ensuite une phase de collection de données dont l'objectif est de prioriser les facteurs d'évaluation considérés dans le modèle et d'évaluer les performances des alternatives internes (faire) et externes (faire faire). Enfin une phase d'analyse des résultats qui combinent les résultats de pondérations et d'évaluation sont combinés pour former une seule figure et ainsi aider au choix de la stratégie adéquate. Les trois processus présentés jusqu'à maintenant se focalisent sur des aspects internes à l'entreprise.

Van de Water et Van Peet (2006) étendent l'analyse au delà des considérations internes à l'entreprise en intégrant d'un côté les positionnements stratégiques de l'entreprise utilisé pour définir les objectifs prioritaires de l'entreprises et d'un autre côté la nature de collaboration avec les fournisseurs. Le modèle de Van de Water et Van Peet met en avant trois phases de décision. La première phase permet de déterminer le positionnement stratégique de l'entreprise en se basant sur la typologie de (Treacy and Wiersema, 1997) (excellence opérationnelle, leadership de produits ou intimité avec le client). L'identification de l'orientation stratégique permet de définir quels objectifs de performance (économique, fiabilité, flexibilité, qualité ou réactivité) sont-ils prioritaires. Chaque objectif de performance regroupe plusieurs critères : *par exemple l'objectif de qualité incorpore la qualité des produits, la qualité des processus, la qualité des fournisseurs, la qualité du service et la qualité des informations*. La deuxième phase consiste à déterminer les activités de l'entreprise qui vont être considérées comme stratégique. La définition des activités stratégiques se base sur l'identification des fonctions de l'entreprise qui ont le plus d'impact sur les objectifs de performances considérés comme prioritaires dans la phase précédente. Enfin une troisième phase consiste à déterminer les types de relation avec les fournisseurs.

Tous les auteurs (McIvor et al., 1997; Padillo and Diaby, 1999; Platts et al., 2002; Probert, 1997; Van de Water and Van Peet, 2006) s'accordent pour dire que ***le problème d'analyse de la décision de faire ou faire faire dépasse la seule considération économique basée sur les coûts de transaction et doit tenir compte de plusieurs autres considérations***. Dans le but de fonder l'analyse de cette décision sur des considérations plus objectives, plusieurs démarches d'analyses multicritères ont été proposées. Le paragraphe suivant a double objectifs : d'un côté, analyser les critères de décisions considérés dans les modèles d'aide à la décision qui ont été proposés dans la littérature et d'un autre côté, examiner les méthodes d'analyse multicritères qui ont été utilisées.

#### 4.4.3.2 L'ANALYSE MULTICRITERES DANS LA PROBLEMATIQUE DE FAIRE OU FAIRE FAIRE

La décision de faire ou faire faire a été souvent conduite d'un point de vue financier par le biais de l'économie des coûts de transaction (transaction cost economics), en se questionnant si une autre alternative (fournisseur externe) peut fournir les mêmes produits ou services moins chers que ce qu'il est possible d'obtenir en interne. Cette vision ne représente qu'une vision limitée du problème de faire faire ou faire faire qui, de part son intérêt stratégique, nécessite de tenir compte de plusieurs considérations. McIvor and Humphreys, (2000) résumant ces autres considérations en trois questions :

- L'entreprise devrait-il maintenir et construire sa propre capacité sur une technologie particulière ou devrait-elle se tourner vers les meilleurs fournisseurs sur le marché?
- La capacité interne technique de conception et industrialisation est-elle à la hauteur de ce que pourraient proposer des fournisseurs externes ?
- Les clients reconnaîtront ou apprécieront la différence dans les produits finaux si l'entreprise choisirait d'externaliser certains de leurs composants?

Ces questionnements proposent d'intégrer l'analyse des capacités techniques de l'entreprise et ses fournisseurs potentiels. Mais aussi les retombées potentielles pour le client final. L'analyse de la capacité technique renvoie aux problèmes de satisfaction des quantités et qualités attendues.

L'analyse de la performance technique concerne aussi bien l'impact sur la qualité que sur les délais. Quand il s'agit du choix d'un fournisseur, les aspects liés à la qualité et délais sont considérés comme des critères primordiaux (Ho et al., 2010; Singh, 2014). Pour tenir compte de la performance technique, plusieurs critères ont été proposés (Platts et al., 2002; Van de Water and Van Peet, 2006) : la qualité, la fiabilité, la flexibilité, l'utilisation de la capacité, ou le temps de mise sur le marché (time to market).

D'autres travaux comme (McIvor et al., 1997) et (Padillo and Diaby, 1999) proposent de prendre en compte aussi des aspects organisationnels. L'évaluation de ces caractéristiques est conduite dans l'objectif d'établir une collaboration avec les fournisseurs. McIvor et al. (1997) propose que cette évaluation qualitative se base sur quatre aspects : culture organisationnelle, technologie, accomplissement des objectifs de vente et objectifs financiers. L'aspect

technologique en l'occurrence utilise six critères (McIvor et al., 1997) : capacités industrielles, support technique, capacité de conception, investissement en R&D, vitesses de développement et taux d'introduction de nouveau produit.

En ce qui concerne les retombées potentielles pour le client, Öncü et al. (2003) notent que lorsque les clients représentent des gouvernements et des instituts officiels les retombées socio-économiques sont considérées comme des enjeux importants intervenants dans la décision de faire ou faire faire. Ces enjeux socio-économiques peuvent être mesurés en termes de promotion de l'emploi local.

Chacune des alternatives (faire ou faire faire) comportent un niveau de prise de risque pour l'entreprise. Ce niveau de risque dépend de la nature des transactions en question, la relation de l'entreprise avec ses fournisseurs et la stabilité des fournisseurs (Padillo and Diaby, 1999). Padillo et Diaby identifient quatre facteurs de risques liés à la décision de faire ou faire faire. Les deux premiers concernent essentiellement le cas d'externalisation, tandis que les deux derniers s'appliquent aussi bien aux sources internes qu'externes. Ces quatre facteurs de risque sont (Padillo and Diaby, 1999) :

- *le risque d'appropriation* est en relation avec le comportement du fournisseur. Ce type de risque peut survenir selon deux façons : d'une part, lorsque le fournisseur possède des capacités qui sont d'une importance stratégique pour l'entreprise et contribue à l'atteinte d'un avantage compétitif pour l'entreprise, l'entreprise peut être sujette à un comportement opportuniste de la part du client. D'autre part, quand le fournisseur possède une spécialisation particulière et qu'il n'y a que peu d'alternatives pour l'entreprise, les coûts de transfert peuvent être important (Walker, 1988).
- *le risque de diffusion de technologie* considère la probabilité qu'une entreprise perd la confidentialité d'un savoir-faire en entrant dans une relation d'externalisation avec un fournisseur externe qui peut ensuite le transférer à un concurrent (Walker, 1988).
- *le risque de dégradation du produit à fabriquer* survient notamment lorsque le fournisseur se positionnent entre l'entreprise et son client final. Ce risque peut se manifester par une dégradation des attributs du produit ou une ignorance des besoins des clients (Walker, 1988).
- *le risque de rupture d'approvisionnement* est présent dans les deux scénarios (faire ou faire faire). Les raisons de ruptures ou de retard dans l'approvisionnement peuvent être dues à des grèves dans les usines du fournisseur, l'instabilité financière du fournisseur, des catastrophes naturelles, ou instabilité politique dans le pays du fournisseur.

Les facteurs de risques suscités concernent la relation entre l'entreprise et ses fournisseurs. Ils sont internes à la chaîne logistique. Wagner et Bode (2008) considèrent deux types de sources de risques qui proviennent de :

- *l'intérieur de la chaîne logistique*. Wargner et Bode identifient 3 classes : (1) côté client (2) côté fournisseur et (3) réglementaire, légale et bureaucratique
- *l'extérieur de la chaîne logistique* : comme les risques liés aux infrastructures et aux catastrophes.

Le tableau 4-3 synthétise les différents critères utilisés dans les modèles d'évaluation de la décision de faire ou faire faire. Le critère économique et la performance technique constituent une base de l'analyse de cette décision. Cependant, l'évaluation des risques n'a pas été souvent prise en compte.

**Tableau 4-3 revue des indicateurs de performance considérés dans la décision de faire ou faire faire**

	McIvor et al., 1997	Padillo and Diaby, 1999	Platts et al., 2002	Probert, 1997	van Water van Peet, 2006	de (Öncü et al., 2003)
<b>Coût</b>	X	X	X	X	X	X
Qualité			X		X	
Flexibilité			X		X	
Fiabilité					X	
<b>Performance technique</b>			X			
Utilisation de capacité			X			
Rapidité / Temps de mise sur le marché			X		X	
<b>Impact socioéconomique</b>						X
<b>Aspects managériaux</b>	X	X				
<b>Risque</b>		X				

Le besoin de prendre en compte plusieurs critères de différentes nécessite d'utiliser des méthodes d'évaluation multicritères. La plupart des modèles analysés utilisent des méthodes pour convertir le problème multicritères en problème monocritère. Deux types de méthodes ont été principalement utilisés :

- méthodes pour exprimer tous les critères dans la même unité, en monétarisant les critères qui ne sont pas financiers. Par exemple, le modèle probabiliste de Raunick et Fisher (1972) considère plusieurs facteurs : coût de produit, capacité, qualité, moral des employés, contrôle managérial, secrets commerciaux. Ces facteurs sont convertis en des séries de flux monétaire. La même démarche est aussi utilisée par exemple dans la méthode de calcul des coûts d'obtention de la qualité (Ferreboeuf, 2000), où les différents critères intervenants dans la définition de la qualité sont monétarisés. Cette méthode peut être difficilement applicable à cause du manque d'informations fiables et de la nature subjective des critères (Padillo and Diaby, 1999).
- méthodes basés sur des critères adimensionnés qui sont exprimés par des valeurs exprimées entre 0 et 1. Une valeur adimensionnée peut être obtenue par normalisation (par rapport au maximum par exemple) ou par l'utilisation de fonctions traduisant la notion de la préférence ou satisfaction du décideur. Ces fonctions font appel à l'utilisation de fonctions d'utilité (Neumann and Morgenstern, 1944) ou fonctions de



désirabilité (dites aussi de satisfaction) (Derringer and Suich, 1980; Harrington, 1965). Par la suite, ces valeurs adimensionnées sont agrégées en utilisant des fonctions d'agrégation (cf. § 2.6.3).

Dans la phase de décision, une des étapes importantes est la détermination de l'importance de chaque objectif (Padillo and Diaby, 1999). La méthode AHP a été largement utilisée dans les modèles d'analyse de la décision de faire ou faire faire (McIvor et al., 1997; Padillo and Diaby, 1999; Van de Water and Van Peet, 2006).

La prise de décision finale est proposée sur la base d'une valeur calculée soit par l'utilisation de la somme pondérée comme dans le cas de (McIvor et al., 1997; Platts et al., 2002) ou une fonction (composite programming) calculant les distances par rapport aux pires solutions obtenues (Padillo and Diaby, 1999).

A la lumière de cette analyse bibliographique, plusieurs constats peuvent être adressés :

- En ce qui concerne le périmètre d'étude, les modèles proposés s'intéressent à plusieurs fonctions de l'entreprise (gestion des ressources humaines, achat, logistique, production, etc). → **Nous nous focaliserons sur la fonction de production.**
- Les modèles d'aide à la décision analysés portent sur la question d'externaliser ou faire en interne. Le modèle proposé par (Van de Water and Van Peet, 2006) étend cette analyse en se questionnant sur la nature de la relation à établir avec le fournisseur. Cependant, la question d'évaluation et choix du fournisseur se pose d'abord. Cette question n'a été intégrée par aucun des modèles analysés. D'une autre part, chacune des décisions d'externaliser ou faire en interne présentent des avantages mais comportent aussi des risques. Les modèles analysés se limitent uniquement à l'évaluation des performances qui peuvent être atteintes par chacune des stratégies mais n'abordent pas l'estimation des risques qui peuvent y être associés. → **Nous proposons d'intégrer d'une part une évaluation des performances économiques, techniques et socio-économique et d'autre part, une évaluation des risques associés aux alternatives de faire ou faire faire.**
- Les modèles d'aide à la décision font intervenir plusieurs critères de différentes natures (coûts, capacité technique, flexibilité, etc.). Deux questions se posent particulièrement : la normalisation et la compensation. D'une part, pour être comparables ces critères doivent être exprimés dans la même base, d'où le besoin de normalisation. D'autre part, ces critères peuvent être antinomiques par nature. Cela signifie lorsqu'une alternative (faire ou faire faire) satisfait une performance (de coût par exemple), elle peut dégrader d'autres performances (qualité ou délai par exemple). La question de compensation entre critères se pose alors : est ce que le décideur accepte qu'une solution dont l'un des critères de performance est non satisfaisant soit compensé par un autre critère, ou exige-t-il que tous les critères doivent être satisfaits pour que l'alternative soit acceptable ? → **Dans notre cadre, on propose une démarche d'aide à la décision basée sur l'intégration de la préférence du décideur et l'utilisation de fonctions d'agrégation adaptables en fonction du contexte de la décision.**

#### 4.4.4 PROPOSITION D'UN MODELE D'AIDE A LA DECISION ADAPTE POUR LE CONTEXTE DU SPM

Notre modèle d'aide à la décision propose une réponse aux limitations soulevées dans la section précédente. Ce modèle d'aide à la décision est adapté pour le cas d'un SPM car :

- il intègre le concept de mobilité dans l'évaluation des coûts et de la capacité technique interne,
- il tient compte du contexte de l'entreprise en l'occurrence du site de production et de la localisation de fournisseurs potentiels,
- la question de faire ou acheter est récurrente pour chaque nouveau site de production, ce qui nécessite de tenir compte du contexte particulier du nouveau site mais en même temps de la stratégie que l'entreprise souhaite développer vis-à-vis de ce site (client).

Ce modèle d'aide à la décision permet de répondre à deux questions :

- *Question 1 : Pour un produit ou composant étudié, faut-il le faire en interne ou l'externaliser à un fournisseur externe ?*

La réponse à cette question par faire ou faire faire, servira pour la conception et le dimensionnement du SPM.

- *Question 2 : Dans le cas où la solution est de faire faire, quel partenaire/fournisseur choisir ?*

Les modèles existants dans la littérature ne se posent pas à priori la question de savoir si il est possible d'externaliser ou pas, car on part du principe qu'il est toujours possible de trouver un fournisseur externe. Par conséquent, dans un premier temps on prend la décision d'externaliser et ensuite on cherche un fournisseur. Dans le contexte ou le SPM change fréquemment de site production. On n'est pas sûr de trouver un fournisseur qualifié et qui permettra toujours de minimiser les coûts. Notre modèle permet de fournir une évaluation et une classification des fournisseurs potentiels. Le décideur peut ainsi, sur la base des résultats fournis, décider du fournisseur à choisir et de la nature de la relation à établir avec lui.

Par rapport aux approches proposées dans l'état de l'art, notre modèle d'analyse de la décision de faire ou faire faire propose d'apporter certaines contributions :

- Dans quelle mesure est-il possible d'intégrer d'un côté les liens entre la stratégie de l'entreprise et les objectifs de performance utilisés comme critères d'évaluation, et d'un autre côté, le contexte du site de production.
- Comment peut-on améliorer le modèle par une appréciation des risques liés à la décision de faire ou faire faire.

La construction du modèle d'aide à la décision de faire ou faire faire postulent certaines hypothèses :

- Notre modèle analyse un seul produit à la fois et qui est réalisé par un seul acteur (interne ou externe). On n'intègre pas le cas d'analyse de plusieurs produits à la fois où

plusieurs solutions peuvent être envisagées (M+B, B+B). Ce problème a été présenté comme un problème d'affectation de quantité (problème d'optimisation).

- La décision est prise par un seul décideur. Dans le cas où plusieurs décideurs sont concernés, le modèle peut être amélioré par l'utilisation par exemple des intégrales de Choquet. Cette piste n'a pas été abordée.
- Le client représente un institut public ou organisme d'intérêt public (concerné par la création d'emploi local), pour lequel la question du développement socioéconomique revêt d'une importance capitale.

Notre contribution s'est construite sur la base des travaux de (McIvor et al., 1997; Padillo and Diaby, 1999; Platts et al., 2002; Van de Water and Van Peet, 2006). Le processus d'analyse que nous proposons est constitué de trois macro-phases (figure 4-9) : phase d'analyse stratégique, phase d'évaluation des alternatives et une phase de prise de décision. Nous proposons de détailler chacune de ces phases dans les sections qui suivent.

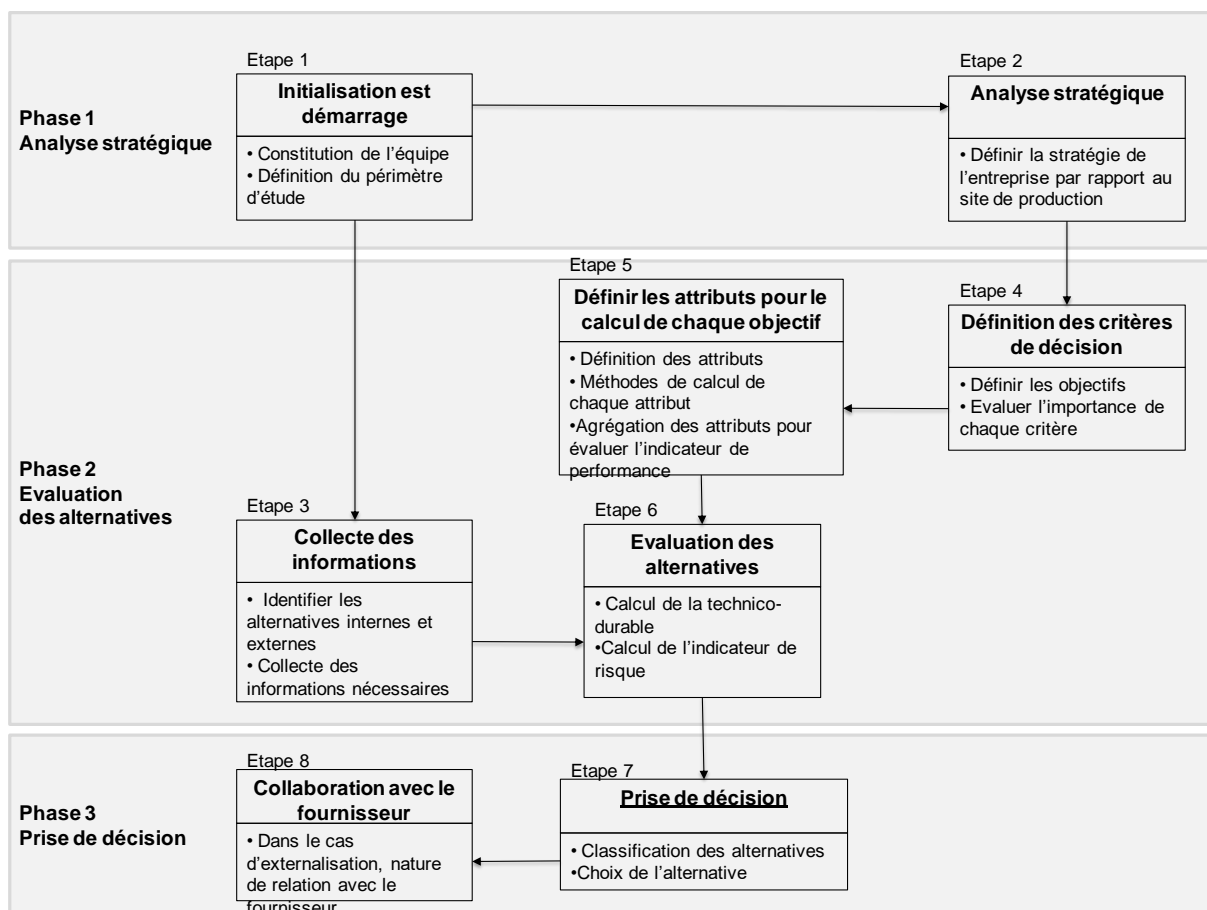


Figure 4-9 Processus d'analyse de la stratégie de production dans un contexte de mobilité

#### 4.4.4.1 PHASE D'ANALYSE STRATEGIQUE

La phase d'analyse stratégique (voir Figure 4-9 ci-dessus) est constituée de deux étapes : initialisation et démarrage (étape 1) et analyse de la stratégie de l'entreprise (étape 2).

##### ETAPE 1 : INITIALISATION ET DEMARRAGE

Le point de départ de l'analyse de la décision de faire ou acheter est l'identification et la constitution de l'équipe qui sera chargée de mener cette étude. Pour la formalisation de cette étape, nous nous basons sur les travaux de Moschuris (2008). Moschuris note que les principaux rôles des parties prenantes impliquées dans le processus de décision de faire ou faire faire sont le décideur et les conseillers (figure 4-10).

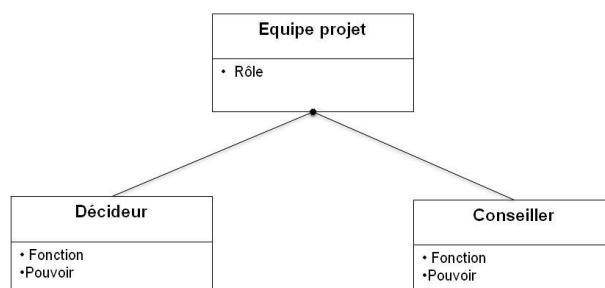


Figure 4-10 les rôles des acteurs intervenant dans l'analyse de la décision de faire ou faire faire

Le premier rôle a le pouvoir de prendre les décisions finales de faire ou faire faire. Le second a d'une part la mission d'initier le besoin d'analyse de la décision de faire ou faire et d'une autre part de collecter les informations nécessaires pour l'analyse de la suite du processus (Moschuris, 2008). Tout service ou département de l'entreprise contribuant ou affecté par la décision de faire ou faire faire doit avoir une part dans la prise de décision (Moschuris, 2008).

En ce qui concerne le rôle de conseiller, lorsque les fonctions techniques ou de production sont largement concernées dans le processus analysé, le degré d'implication des services financiers, d'achat, marketing et des ventes varie en fonction de variables contextuelles. Selon (Moschuris, 2008), les fonctions de ventes et de marketing sont largement impliquées comme conseillers lorsque la décision de faire ou faire faire concerne des produits ou services qui ont un impact potentiel sur la rentabilité de l'entreprise.

Toutefois le niveau d'implication de ces fonctions dans la prise de décision peut dépendre de plusieurs variables contextuelles. Des analyses statistiques ont montré que l'implication des parties prenantes dépend principalement de deux types de facteurs (Moschuris, 2008): des caractéristiques organisationnelles (taille de l'entreprise et la technologie) et des caractéristiques des produits ou services analysés (type, et l'incertitude commerciale).

A titre d'exemple, Moschuris (2008) note que l'implication du service des achats peut être faible dans le processus de décision de faire ou faire faire. Cette proposition peut être en contradiction avec d'autres études qui insistent sur le rôle majeur des services d'achats dans le processus de décision (Johnson et al., 2002).

Le deuxième objectif de l'étape *d'initialisation et démarrage* est la définition du composant ou produit concerné par la décision d'externalisation. Les attributs définissant le produit doivent être précisés. Nous reviendrons dans le paragraphe (§ 0) sur les informations qu'il convient de collecter sur le produit concerné.

#### ETAPE 2 : ANALYSE DE LA STRATEGIE DE BASE DE L'ENTREPRISE

La phase d'analyse stratégique a pour objectif d'analyser le positionnement stratégique de l'entreprise vis-à-vis du client, qui implique donc la nécessité d'opérer sur un nouveau site de production. L'adoption d'un positionnement stratégique défini va avoir un impact sur la priorisation des objectifs de performance de l'entreprise. Trois objectifs de performances sont retenues (cf. § 0) : i) la performance économique, ii) la performance technique et iii) la performance socio durable. Une entreprise qui opte pour stratégie de leadership par les coûts accordera une priorisation des trois objectifs de performance différente d'une autre entreprise qui choisirait une autre stratégie de différenciation.

Nous considérons l'analyse du positionnement stratégique de l'entreprise comme point de départ de notre démarche. Pour chaque nouveau site de production un questionnement se pose sur le positionnement stratégique de l'entreprise vis-à-vis de ce site. Treacy and Wiersema (1997) identifient trois disciplines de valeur qu'une entreprise peut choisir:

- *Excellence opérationnelle* : offrir au client des produits fiables et de qualité avec des coûts compétitifs.
- *Leadership de produit* : offrir au client des produits innovants avec des temps de mises sur le marché réduits.
- *Niveau d'intimité avec le client* : offrir au client des solutions totales, plus qu'offrir simplement un produit ou un service.

Une autre analyse suggérée par Porter (1980) propose une grille basée sur quatre typologies de positionnement stratégique :

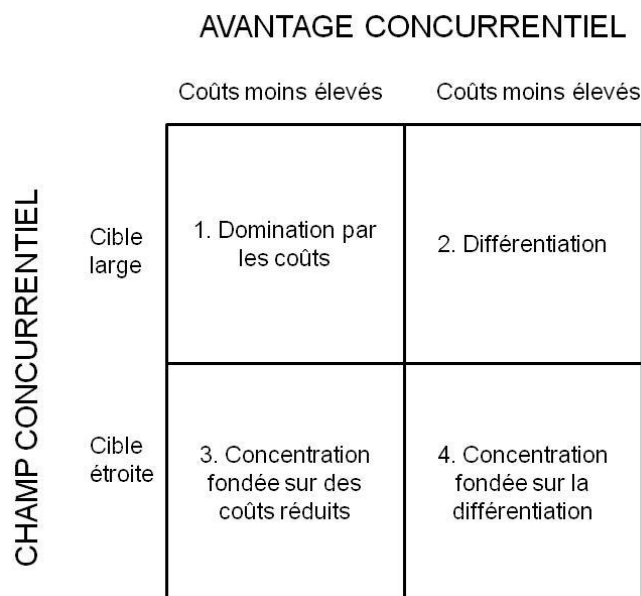


Figure 4-11 Les stratégies de base d'une entreprise selon Porter

Les descriptions ci-dessous sont basées sur les travaux de traduits (Porter, 1986) par Philippe Lavergne.

- 1 *Domination par les coûts* : une firme entreprend de devenir le producteur à bas coût. L'entreprise. En s'appuyant sur son avantage économique grâce par exemple à des

économies d'échelles, une technologie exclusive ou un accès préférentiel aux matières premières, l'entreprise cible un secteur large et sert de nombreux segments.

- 2 *Différentiation* : une firme cherche à se singulariser sur certaines dimensions fortement appréciées des clients et se met en position de seule satisfaire ces besoins. La logique de la stratégie de différenciation exige que les caractéristiques retenues pour se différencier soient uniques. Une firme doit vraiment être unique à quelque égard ou être perçue comme telle. Cette position unique est rémunérée par un surprix. La différenciation peut être fondée sur le produit lui-même, sur le système de distribution, sur l'approche marketing et sur toute une série d'autres facteurs. La stratégie de différenciation a un atout de plus que la stratégie de domination par les coûts : elle peut s'exercer sur plusieurs paramètres dans un secteur où les clients apprécient fortement plusieurs caractéristiques. Enfin la firme qui se différencie ne peut négliger ses coûts, parce que son surprix sera annulé si elle occupe une position nettement défavorable sur les coûts.

Les deux types suivant sont deux variantes de la stratégie de concentration où une entreprise va chercher à obtenir un avantage supérieur en optimisant sa stratégie pour une cible étroite. Pour que cette stratégie réussisse, il faut que la clientèle visée ait des besoins peu courants ou qu'il y ait un meilleur système de production et de distribution pour la servir (Porter, 1986). Une firme qui concentre son activité tire profit de la sous-optimisation à laquelle sont obligées les firmes concurrentes dont les cibles sont plus larges.

- 3 *Concentration fondée sur des coûts réduits* : consiste à chercher un avantage en ayant les coûts les plus bas dans le segment cible. Cette stratégie tire profit du comportement particulier de certains segments à l'égard des coûts.
- 4 *Concentration fondée sur la différenciation* : consiste à se différencier dans le segment cible. La firme exploite des besoins propres de segments donnés.

Cependant l'attrait structurel du segment pris pour cible est important. Si le segment ne diffère pas des autres segments, la stratégie de concentration échouera (Porter, 1986).

Van de Water and Van Peet (2006) souligne que la classification de Porter semble être plus adaptée d'un point de vue économique, nous choisissons d'adopter la typologie de Porter qui nous semble être aussi plus précise que la représentation de Treacy et Wiersema.

Une entreprise qui opte pour une stratégie de domination par les coûts accordera une priorité aux objectifs de performance différente d'une autre firme qui elle par exemple choisirait d'adopter une stratégie de différenciation. Cependant, comme le note (Treacy and Wiersema, 1997) le positionnement stratégique d'une entreprise doit en fait être une combinaison des différentes typologies pour assurer sa survie. Porter (1986) précise qu' « *Une firme qui domine le marché par les coûts ne peut négliger totalement la différenciation. Si son produit est perçu par les clients comme un produit comparable ou acceptable, la firme sera contrainte de diminuer ses prix à un niveau plus bien inférieur à ceux de ses concurrents pour conquérir des ventes. Cela peut annuler l'avantage par les coûts* ». En outre, une firme qui choisit la voie médiane en s'engageant simultanément dans toutes les stratégies de base et

n'en réalisant aucune, ne possède aucun avantage sur ses concurrents (Porter, 1986). Pour cela une priorisation des différentes positions stratégiques est nécessaire (Van de Water and Van Peet, 2006).

Dans le but de procéder à la classification des différentes stratégies de base, nous proposons d'utiliser<sup>26</sup> la méthode AHP (Saaty, 1990). Une matrice de jugement permet une comparaison par paire des positionnements stratégiques en utilisant une échelle de notation de 1 à 9 (figure 4-12).

	Domination par les coûts	Différentiation	Concentration fondée sur des coûts réduits	Concentration fondée sur la différenciation	
Domination par les coûts					1 : importance égale 2 : importance faible 3 : importance assez modérée 4 : importance assez forte 5 : importance assez forte 6 : importance forte 7 : importance très forte 8 : importance extrême 9 : importance capitale
Différentiation					
Concentration fondée sur des coûts réduits					
Concentration fondée sur la différenciation					

Figure 4-12 matrice de jugement et échelle de comparaison des quatre types de positionnement stratégique

Le calcul des priorités de chaque positionnement stratégique est obtenu par la méthode de la plus grande valeur propre (Saaty 1977) qui consiste en la normalisation du vecteur propre associé à la plus grande valeur propre  $\lambda_{max}$  de la matrice de jugement. La somme des priorités obtenues est naturellement égale à 1.

Le vecteur obtenu, qui sera noté  $VPS = [vps1, vps2, vps3, vps4]$ , est le vecteur désignant l'importance de chacun des positionnements stratégique, avec  $vps1, vps2, vps3$  et  $vps4$  désignent respectivement l'importance de la stratégie de domination par les coûts, différenciation, concentration fondée sur des coûts réduits et concentration fondée sur la différenciation. Chaque  $vps_i$  est exprimé par une valeur entre 0 et 1.

$$\text{Avec } \sum_{i=1}^4 vps_i = 1 \tag{29}$$

La phase d'analyse stratégique a permis de constituer l'équipe de projet, définir le produit ou composant à analyser et prioriser le positionnement stratégique de l'entreprise pour le nouveau site de production. La phase suivante va permettre de recenser les alternatives possibles de « faire ou acheter » et les évaluer en passant par la définition de critères de performance.

#### 4.4.4.2 PHASE D'EVALUATION DES ALTERNATIVES

Cette phase constitue le corps de notre modèle d'aide à la décision. Une première étape permet de collecter les informations alimentant le modèle d'évaluation. Ensuite nous définissons les critères de décision, les méthodes de construction et d'évaluation de ces

<sup>26</sup> Une autre méthode peut consister à noter directement chaque stratégie de base. Cette méthode peu formalisée nécessite l'implication d'experts.

critères sont présentées dans l'étape 5. L'étape 6 concerne l'évaluation des alternatives. L'étape 7 propose une classification des alternatives. L'étape 8 concerne la prise de décision. Enfin dans l'étape 9 nous aborderons les différents types de collaboration que l'entreprise peut mettre en place avec ses fournisseurs.

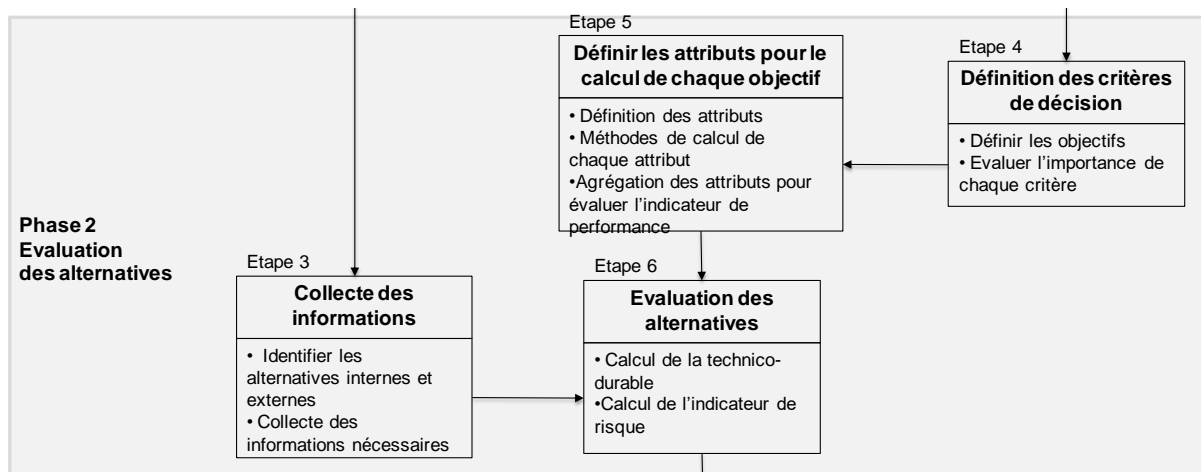


Figure 4-13 Processus d'analyse de la stratégie de production dans un contexte de mobilité déduit à l'évaluation des alternatives

#### ETAPE 3 : COLLECTE DES INFORMATIONS

En considérant la mobilité du système de production, on distingue deux types d'informations alimentant le modèle d'aide à la décision (figure 4-14) :

- *des données variables impactées par la mobilité* sont susceptibles de varier à chaque fois que le SPM change de site de production. Ces données sont soit directement ou indirectement dépendantes d'une ou plusieurs caractéristiques du site de production, soit dépendant de la mobilité d'un ou plusieurs modules du SPM, ou enfin dépendantes des préférences du décideur et d'une manière générale de la stratégie de l'entreprise.
- *données qui sont figées dans le modèle* : dans un objectif de simplification du modèle, ces données consistent en l'affectation des valeurs fixes à des paramètres. L'introduction de ces données nécessite d'abord de présenter les paramètres et leur utilité, nous allons les introduire au fur et à mesure de leur utilisation. Un récapitulatif des données que nous proposons de figer dans le modèle, sera donné en conclusion du modèle.



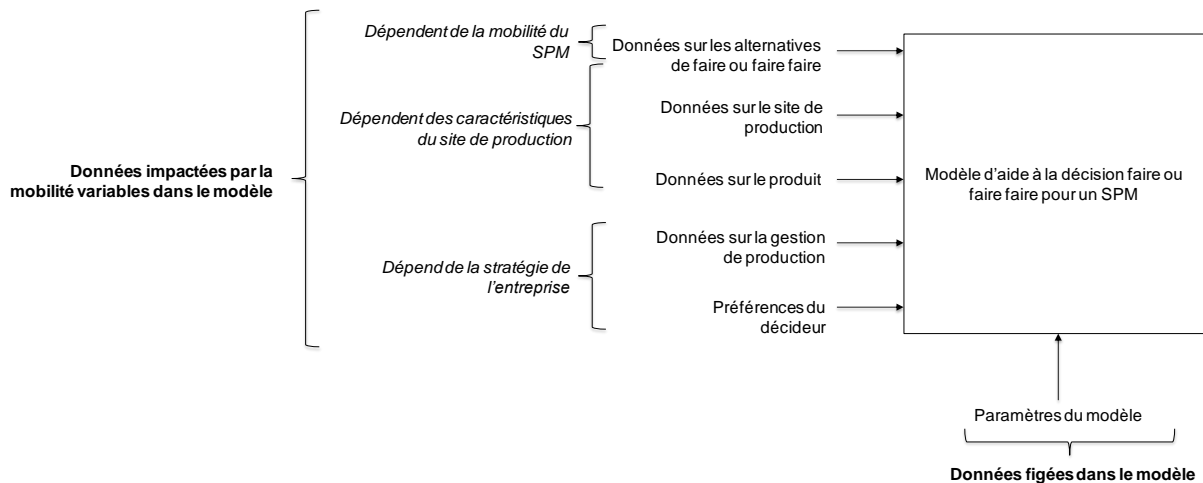


Figure 4-14 Les informations nécessaires pour alimenter le modèle d'aide à la décision "faire ou faire faire"

A présent nous proposons de présenter les données d'entrée du modèle.

▪ **Les données dépendant de la mobilité**

Deux alternatives de production sont possibles : faire en interne ou externaliser. La mobilité concerne notamment l'alternative de faire en interne. L'alternative de faire en interne se base sur l'utilisation d'un plusieurs modules du SPM. La mobilité de ces modules dépend de plusieurs paramètres contextuels (cf. §3.5.3.1 ). En ce qui concerne l'alternative de faire en externe, les données intervenant dans la définition des fournisseurs externes ont été discutées précédemment dans l'analyse de l'environnement externe du SPM (cf. tableau 4-1). Le tableau 4-4 présente un récapitulatif de ces informations. On distingue trois types d'informations : quantitatives, qualitatives et déterministes. Par donnée déterministe on sous-entend des données qu'on ne peut chiffrer mais qu'elles sont connues précisément (comme la localisation géographique par exemple). Les données qualitatives sont renseignées en utilisant une échelle sémantique à cinq niveaux : [Très important, Important, Moyen, Faible, Très faible]. Cette échelle sémantique sera adoptée pour l'évaluation de toutes les données d'entrée de nature qualitative.

La description des fournisseurs externes est complétée par la les informations nécessaires pour évaluer le niveau de risque associé à ce fournisseur (qui sont indiquées en italique dans le tableau 4-4).

Tableau 4-4 Récapitulatif des données d'entrées relatives à la définition des alternatives de production.

Information	Donnée d'entrée	Nature
	Localisation	Déterministe
<b>Fournisseur externe</b>	Prix unitaire, Taux de service, Capacités de fabrication	Quantitative
	Coûts <sup>27</sup> .	Qualitative

<sup>27</sup> Coûts associés au temps perdu dû à des pièces rejetés, coût des inexactitudes liées au travail administratif, Coût de validation des échantillons, Support technique, Capacités de conception, Investissement en R&D, Taux de développement, Taux d'introduction de nouveaux produits, *grèves dans le site du fournisseur, instabilité*

<b>Faire en interne</b>	Localisation des fournisseurs de matière première	Déterministe
	Prix unitaire d'achat de matière première Taux de service du fournisseur du module mobile	Quantitative
	Mobilité du process	Quantitative ou qualitative

En plus des données indiquées dans le tableau 4-4, l'évaluation de l'alternative "*faire en interne*" dépend aussi des paramètres de gestion de production, tels que les coûts des postes utilisés ou le taux de contrôle qualité, entre autres. Ces données faisant globalement partie de la stratégie tactique et opérationnelle de l'entreprise, nous choisissons de les considérer sous la famille des données dépendant de la stratégie de production.

En conclusion, la mobilité du SPM intervient directement dans la définition de l'alternative de faire en interne (vu que les modules de production utilisés sont mobiles) et indirectement, elle impacte les alternatives de faire en interne via la dépendance aux localisations géographiques (pour le calcul des coûts d'approvisionnements des produits, entre autres.). Le site de production est un concept important dans la définition de la mobilité, le paragraphe suivant présente les informations dépendantes du site de production et nécessaires pour l'alimentation du modèle d'aide à la décision.

#### ▪ Les données dépendant des caractéristiques du site de production

Les données nécessaires pour la définition d'un site de production ont été considérées selon 3 types (tableau 4-5) : (1) des données renseignant sur la demande de client en terme de localisation géographique du site, volume de produit et délai pour satisfaire la demande, (2) des données caractérisant le contexte socio-économique du site de production et (3) données nécessaires pour évaluer les risques associés au site de production.

Tableau 4-5 Données nécessaires pour la définition du site de production

Information	Donnée d'entrée	Nature
<b>Données sur le site de production</b>	<b>Demande</b> Localisation	Déterministe
	<b>Données socio-économiques</b> Volume de la demande, délai	Quantitative
	<b>Données socio-économiques</b> Frais de douane, coût de transport disponibilité de la qualification, disponibilité de l'énergie,	Quantitative Qualitative
	<b>Evaluation des risques</b> Risques liées à : l'environnement politique, l'environnement économique, l'environnement socioculturel, l'environnement technologique, l'environnement écologique, l'environnement légal.	Qualitative

*financière du fournisseur, instabilité politique dans le pays du fournisseur, fermetures imprévues en cas de catastrophes, comportement opportuniste du fournisseur sur les coûts d'achat, coût de transfert, risque de perte de confidentialité*

<b>Données sur le produit</b>	Quantité du composant dans le système final et masse du composant	Quantitatif
-------------------------------	---	-------------

En ce qui concerne le produit, on suppose qu'au stade de l'analyse de la décision de faire ou faire le produit est parfaitement défini. Ce qui laisse entendre que les données liées à la définition du produit peuvent être renseignées quantitativement.

▪ **Les données dépendant de la stratégie de l'entreprise**

Les données stratégiques pris en compte dans le modèle d'aide à la décision sont considérées selon deux types : (1) les préférences du décideur d'une part, en termes de priorisation des différents objectifs et critères de décision et d'autre part, en termes des valeurs seuil acceptables pour les coûts et les risques par exemple et, (2) des données relevant de la stratégie à un niveau tactique ou opérationnel qui correspondent par exemple aux décisions prises pour la gestion de production par un site donné. Ces données tiennent compte d'aspects internes à l'entreprise comme le taux de contrôle réception envisagé ou le coût horaire estimé de ces opérations de contrôle réception, mais aussi d'aspects externes à la chaîne d'approvisionnement du SPM, comme le nombre de fournisseurs de matière première.

Tableau 4-6 Données relatives à la stratégie de l'entreprise

Information	Donnée d'entrée	Nature
<b>Préférences du décideur</b>	Priorisation des positionnements stratégiques, priorisation des objectifs de performance,	quantitative
	Niveaux acceptables de coût et de risque	Quantitative
<b>Gestion de production</b>	Taux de contrôle réception, coût horaire pour les opérations de retouches, coût horaire pour les opérations de contrôle réception, le nombre de postes utilisés pour la production du composant analysé, le coût de ces postes et le coût de stockage de matière	Quantitatif
	Nombre de fournisseur de matière première qualifiés	qualitatif

ETAPE 4 : DEFINITION DES CRITERES DE DECISION

La décision de faire ou faire faire se base sur l'évaluation de deux objectifs : un objectif mesurant la performance des alternatives (faire ou faire faire) et un autre objectif renseignant sur la maîtrise des risques associés à l'utilisation de ces alternatives.

L'objectif de performance, qu'on propose de qualifier de performance technico-durable, tient compte de trois niveaux de performances : économique, technique et socioéconomique. Ces performances sont mesurées par des *indicateurs de performance*. Chaque indicateur de performance renseigne sur le niveau de satisfaction de la performance associée par une alternative donnée au regard de la stratégie de l'entreprise (et des préférences du décideur).

L'importance de ces trois niveaux de performance dépend directement de la stratégie de base choisie par l'entreprise (analysée en étape 2) : à titre d'exemple, si l'entreprise choisit une stratégie de domination par les coûts, elle accordera une grande importance à l'indicateur économique (figure 4-15). Ainsi chaque stratégie de base va résulter en un jeu de priorités des

trois indicateurs de performances. Toutefois, nous postulons que lorsque l'entreprise opte pour une stratégie de base, le jeu de priorité des indicateurs de performance est unique pour la stratégie choisie. Dans un souci de simplification du modèle, nous supposons que la contribution de chaque objectif dans la définition d'une stratégie de base est fixe. Ainsi, pour chaque stratégie de base un jeu de priorités des indicateurs de performance est défini.

Stratégie de base	Importance de			Jeu de priorités pour les indicateurs de performance
	indicateur économique	Indicateur technique	Indicateur socio-économique	
Domination par les coûts	60%	30%	10%	→
Concentration fondée sur la différenciation	30%	40%	30%	

Figure 4-15 exemple de définition d'un jeu de priorités des indicateurs de performance en fonction de la stratégie de base de l'entreprise

Pour la définition de ce jeu de priorités pour les indicateurs de performance, nous proposons d'utiliser la méthode AHP. Ainsi pour chacune des quatre stratégies de base, une matrice de jugement permet de comparer par paire les indicateurs de performance. Le calcul du vecteur propre de la matrice de jugement (associée à la plus grande valeur propre) donne le vecteur représentant le jeu de priorités des indicateurs de performances, correspondant à la stratégie de base associée. Pour les quatre stratégies de bases, on obtient une matrice (4x3) (cf. figure 4-16), représentant les priorités des indicateurs de performances au regard des stratégies de base de l'entreprise. Nous désignons cette matrice ( $MPIP^{28}$ ). On note que la somme des éléments de chaque colonne de cette matrice vaut 1.

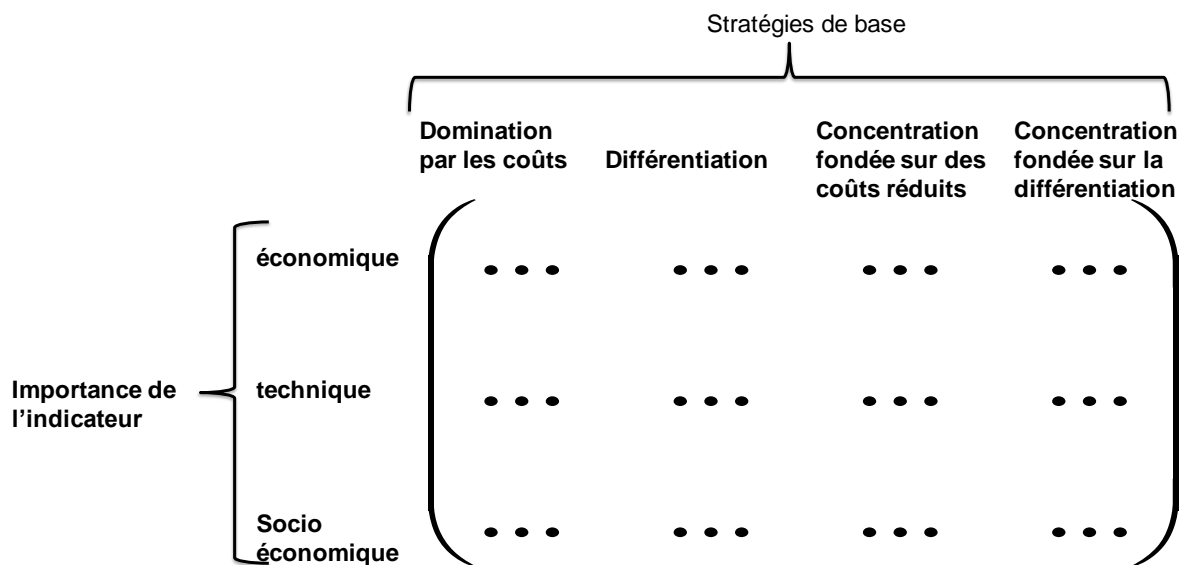


Figure 4-16 La matrice ( $MPIP$ ) définissant les jeux de priorités des indicateurs de performance.

Dans l'étape 2 de notre modèle d'aide à la décision, on est arrivé à la conclusion qu'une entreprise opérerait plutôt pour une combinaison de stratégies de base, ce qui signifie qu'une pondération sera associée à chaque stratégie de base pour désigner son importance.

<sup>28</sup> Matrice de priorisation des indicateurs de performance ( $MPIP$ )

L'importance de chaque indicateur dépend alors d'une part du poids de chaque stratégie de base (donné par le vecteur  $VPS^{29}$ ) et d'autre part de la contribution de chaque indicateur de performance dans la réalisation des stratégies de base (donnée par la matrice  $MPIP$ ).

Notons  $VPI^{30}=[vpi_1, vpi_2, vpi_3]$  le vecteur donnons respectivement la pondération des indicateurs économique, technique et socio-économique. Le vecteur  $VPI$  est donné par la formule (30) :

$$VPI=MPIP*VPS \tag{30}$$

Le vecteur  $VPI$  traduit donc le fait que la pondération de chaque indicateur de performance dépend indirectement du site de production. En effet, la matrice  $MPIP$  lie les indicateurs de performance aux stratégies de bases indépendamment des caractéristiques de site de production. Le vecteur  $VPS$  permet de faire le lien entre le site de production et la stratégie d'entreprise. En supposant  $MPIP$  invariable pour chaque nouveau site de production, il faut renseigner uniquement le vecteur  $VPS$ .

Après avoir introduit les indicateurs de performance et expliqué la priorisation de ces indicateurs, le paragraphe suivant présente les attributs permettant l'évaluation de chaque indicateur de performance.

ETAPE 5 : DEFINIR LES ATTRIBUTS DE CHAQUE INDICATEUR DE PERFORMANCE

Chacun des trois indicateurs de performance économique, technique et socioéconomique tient compte de plusieurs attributs pour l'évaluation du niveau de performance associé.

▪ **L'indicateur économique**

L'indicateur économique se base sur l'analyse des facteurs intervenant dans l'évaluation des coûts de revient de chacune des alternatives '*faire en interne*' ou '*externaliser*'. A un niveau global, on identifie trois attributs associée à l'évaluation des coûts (figure 4-17). Toutefois, Pour chacune des alternatives, la structure de coût de ces attributs chacune de ses alternatives ne fait pas intervenir les mêmes facteurs.

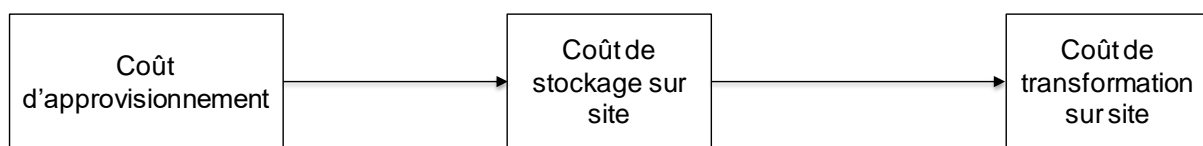


Figure 4-17 les trois attributs utilisés pour la construction de l'indicateur économique

Les coûts d'approvisionnement

Cet attribut évalue tous les coûts inhérents à l'activité d'approvisionnement des matières (dans le cas du '*faire en interne*') et composants (dans le cas de '*externaliser*') depuis le fournisseur jusqu'au site de production. Cet attribut tient compte des coûts d'achat chez le fournisseur, des coûts d'acheminement jusqu'au site de production et enfin des coûts de dédouanement. La

<sup>29</sup>  $VPS$  : Vecteur de Pondération des stratégies

<sup>30</sup>  $VPI$  : Vecteur de Pondération des Indicateurs

figure 4-18 présente les différents facteurs pris en compte dans l'évaluation des coûts d'approvisionnement. Globalement, la structure de cet attribut est similaire pour les alternatives de "faire en interne" ou "externaliser". En ce qui concerne les variables contextuelles, cet attribut dépend d'une part des fournisseurs choisis (localisation géographique et prix de vente) et des caractéristiques du site de production (localisation géographique, environnement économique (frais de dédouanement)) et d'autre part du mode de transport choisis.

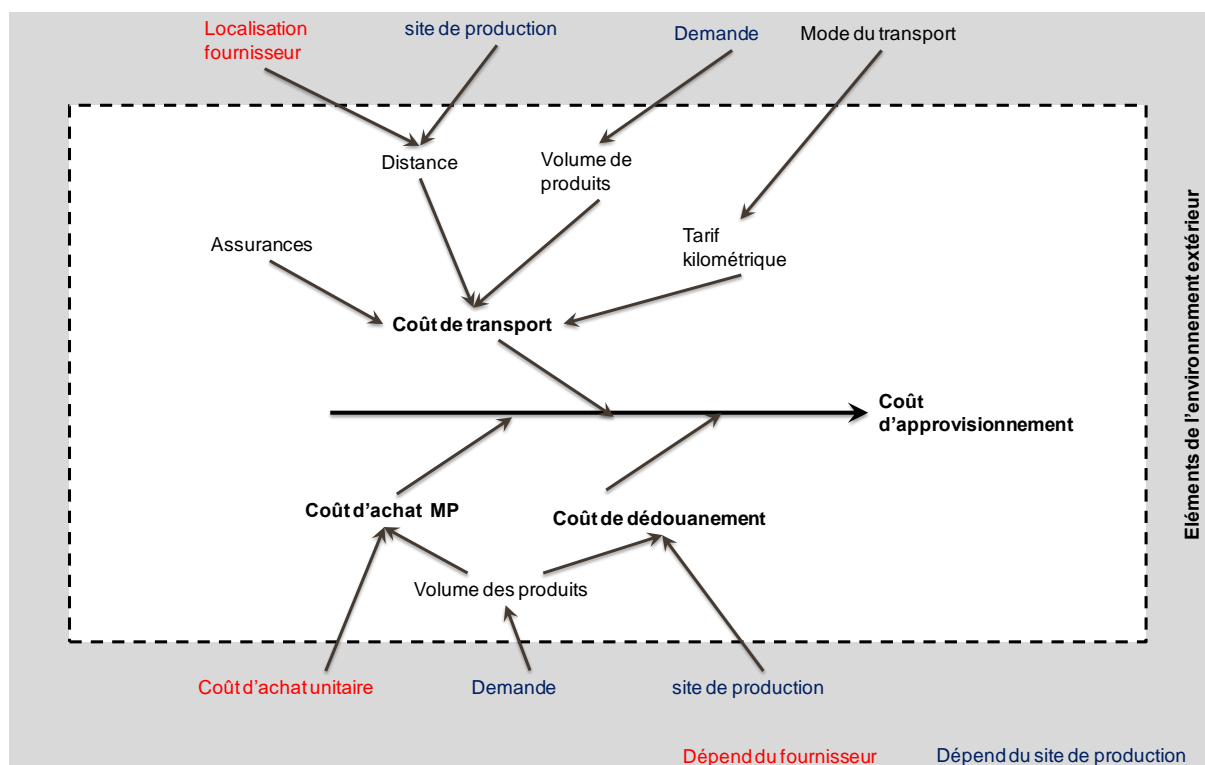


Figure 4-18 les facteurs intervenant dans la définition de l'attribut de coût d'approvisionnement

### Les coûts de stockage

Une fois les produits (matière première ou composants) sont acheminés sur le site de production, ils doivent être stockés dans l'attente de leur utilisation. Cette activité est génératrice des coûts et doit être considérée dans l'évaluation de l'indicateur économique.

Les coûts de stockage dépendent de la durée de stockage, de la valeur de la marchandise et des coûts fixes des moyens de stockages. Les coûts fixes des moyens de stockages représentent les coûts d'investissement dans les moyens utilisés dans l'activité de stockage (entrepôt, chariots, etc.), les coûts d'énergie; de main d'œuvre, etc. Ces coûts dépendent des caractéristiques du site de production.

Pendant la phase de développement du SPM, les coûts de stockage sont difficilement quantifiables faute de manque d'informations précises.

### Les coûts de transformation sur site

Cet attribut concerne tous les coûts liés aux activités effectuées sur le site de production, à valeur ajoutée sur le produit concerné par l'analyse de faire ou faire faire. Les alternatives 'faire en interne' ou 'externaliser' ne requièrent pas les mêmes opérations sur le site. Par conséquence, l'évaluation des coûts de transformation sur site est adaptée pour chaque cas (figure 4-19) :

- Le cas de "Faire en interne" requiert des opérations de fabrication. Les coûts de transformation tiennent compte des coûts d'investissements dans les moyens utilisés (machines et outils), les coûts liés au maintien de leur fonctionnement ainsi que les coûts de la main d'œuvre associés. De plus dans le contexte du SPM, les moyens de production doivent être mobilisés sur le site de production, les coûts de leur mobilisation (coût d'acheminement, dédouanement, mise en service, etc.) doivent être pris en compte.
- Dans le cas de "externaliser" les composants sont reçus prêts à être utilisés. Les opérations menées sur site concernent majoritairement des opérations de contrôle qualité ainsi que des opérations de retouches, si nécessaire. En addition, d'autres types de coût qui sont souvent sous-estimés peuvent avoir un impact fort dans le contexte de la mobilité, ces coûts indirects sont difficilement quantifiables. Parmi ces facteurs on va trouver : les coûts liés au temps perdu à cause du rejet des pièces (pour non qualité par exemple), les coûts associés à la validation des échantillons ainsi que d'autres facteurs qui sont mentionnées dans la (figure 4-19-B)

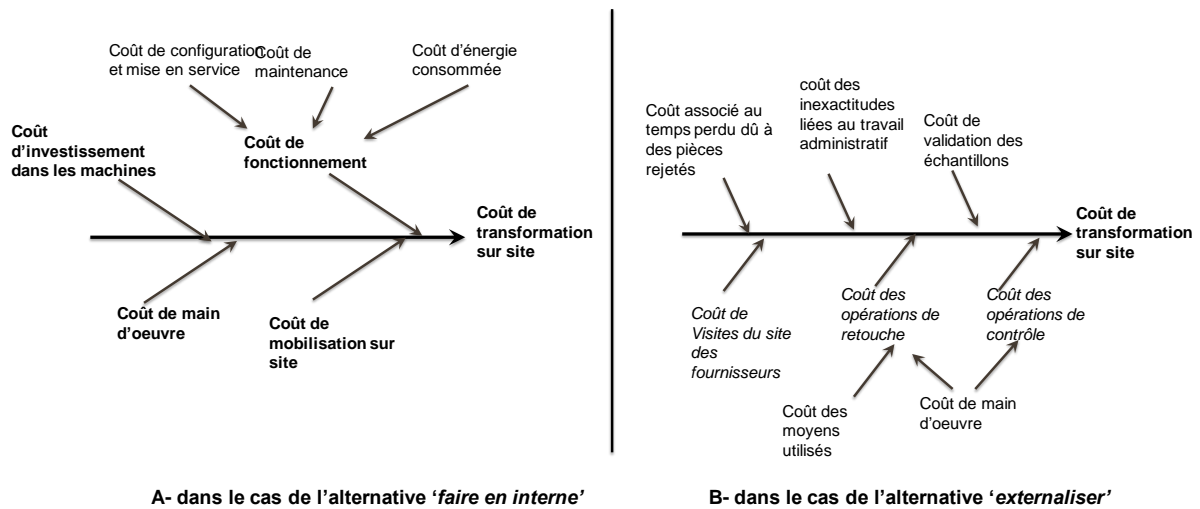


Figure 4-19 Identification des attributs considérés pour l'évaluation des coûts de transformation sur site selon le type de l'alternative

▪ **L'indicateur de performance technique**

L'indicateur de performance technique consiste à déterminer l'aptitude des alternatives "faire en interne " ou "externaliser" de respecter d'une part la qualité des produits requise et d'autre part d'être capable de satisfaire la demande en terme de volume de production. Par conséquence l'indicateur de performance technique dépend de deux attributs : l'attribut de faisabilité technique et l'attribut de capacité technique. Dans le but d'évaluer ces deux

attributs, une distinction doit être faite entre les alternatives de production interne et externes (figure 4-20).

#### Le cas de l'alternative faire en interne

L'attribut de *faisabilité technique interne* vise à s'assurer que l'entreprise possède le savoir-faire et les moyens (process) nécessaires pour garantir la fabrication du produit analysé sur le site de production. La *faisabilité technique interne* dépend d'abord de la *mobilité des modules* du système de production. En outre, des opérations manuelles sont utilisées dans le processus de fabrication, dans un objectif de réduction des coûts, le SPM fait appel à la main d'œuvre recrutée localement sur le site de production. Partant du principe que le SPM est utilisé pour produire sur le site de consommation final et qu'il doit changer de localisation pour chaque nouvelle commande, la *disponibilité de la qualification nécessaire* doit être vérifiée pour chaque nouveau site voir développée localement (ce qui augmentera le cout de main d'œuvre intégrant els couts de formation). Enfin, la *disponibilité et l'accès à l'énergie nécessaire* est une troisième condition nécessaire pour assurer la faisabilité technique interne. Ces deux dernières caractéristiques dépendent du site d'implantation.

L'attribut de *capacité technique interne* a pour objectif de vérifier si l'alternative "faire en interne" peut respecter la demande requise vis-à-vis de la quantité. En supposant que le système de production mobile a la capacité de production suffisante, l'autre condition nécessaire pour répondre à la demande est la capacité d'approvisionnement en matière première (MP). Nous considérons deux facteurs impactant la capacité d'approvisionnement sur le site de production : la *disponibilité de fournisseur de MP qualifiés* et leur *proximité du site de production*.

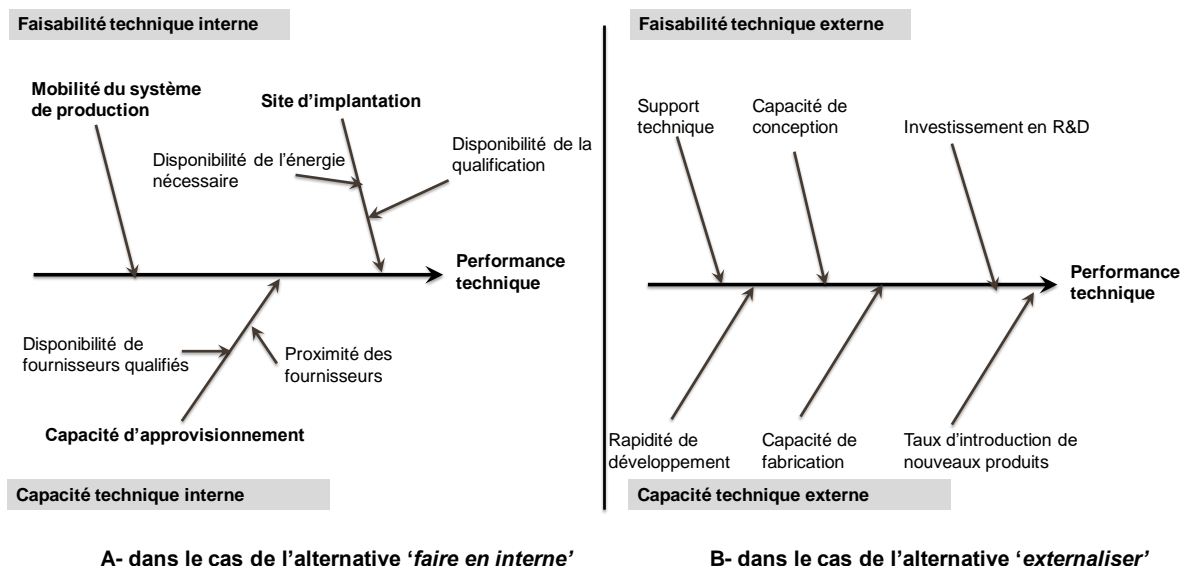


Figure 4-20 Identification des attributs considérés pour l'évaluation de la performance technique selon le type de l'alternative

#### Le cas de l'alternative "externaliser"



McIvor et Humphreys (2000) identifient six critères pour évaluer les capacités technologiques d'un fournisseur : support technique, capacité de conception, investissement en R&D, rapidité de développement, capacité de fabrication et taux d'introduction de nouveaux produits.

Dans notre analyse, nous considérons que : support technique, capacité de conception et investissement en R&D permettent de renseigner sur l'attribut de faisabilité externe. Alors que la rapidité de développement, capacité de fabrication et taux d'introduction de nouveaux produits renseignent sur la capacité technique externe.

#### ▪ **L'indicateur socioéconomique**

L'indicateur socioéconomique permet d'évaluer l'impact socioéconomique du choix de l'une ou l'autre des alternatives de production. Dans le cas où le client représente des gouvernements ou des instituts officiels les retombées socio-économiques sont considérées comme des enjeux importants intervenants dans la décision de faire ou faire faire. Ces enjeux socio-économiques peuvent être mesurés avec le nombre d'emploi créé localement. Cet objectif est lié directement au concept de mobilité qui consiste à s'appuyer sur des ressources humaines recrutées localement.

Dans notre analyse nous considérons que cet objectif est lié à la localisation géographique des installations de production. Si la production a lieu dans le même pays que le site de consommation<sup>31</sup> du client final, l'indicateur socioéconomique est satisfait. De ce fait, pour l'alternative de "*faire en interne*" cet objectif est toujours satisfait puisqu'elle consiste en l'utilisation d'un SPM. En ce qui concerne l'alternative de "*externaliser*", l'indicateur socioéconomique dépend de la comparaison de la localisation d'implantation du fournisseur et du site de production.

En plus de ces trois indicateurs (caractérisant le niveau de performances des alternatives de production), notre modèle intègre aussi un objectif de maîtrise des risques associés aux décisions de "*faire en interne*" ou "*externaliser*".

#### ▪ **L'objectif de maîtrise des risques**

Padillo et Diaby (1999) reconnaissent que les deux alternatives de production interne ou externes impliquent une prise de risque pour l'entreprise. L'évaluation du niveau de maîtrise de risque permet au décideur de baser sa décision sur la performance mais aussi le niveau de risque associé à chaque alternative.

En se basant sur l'analyse de la bibliographie nous avons pu établir plusieurs facteurs qui peuvent devenir des sources potentielles de risque dans les décisions de faire ou faire faire. Ces facteurs sont les risques de : *rupture d'approvisionnement, diffusion de la technologie dégradation du produit ou le risque d'appropriation* (cf. §4.4.3.2). L'évaluation de ces

---

<sup>31</sup> Le terme de "site de consommation" est utilisé dans le même sens que le terme de "site de production". Ces deux termes désignent la localisation géographique sur laquelle le produit à fabriquer est produit par le SPM et est installé ou mis à disposition du client final.

facteurs de risques se base sur l'appréciation de certains attributs qui sont indiqués sur la figure 4-21.

La mobilité du système de production implique les caractéristiques du site de production changent à chaque nouvelle commande. Par conséquent les facteurs de risques liés au changement de site d'implantation doivent être intégrés dans le modèle d'évaluation de la stratégie de production. Pour l'évaluation des facteurs de risques liés au site de production, nous basons notre démarche sur une macroanalyse de l'environnement du site de production, en prenant en compte les risques liés à l'environnement : politique, économique, socioculturel, technologique, légal et environnemental.

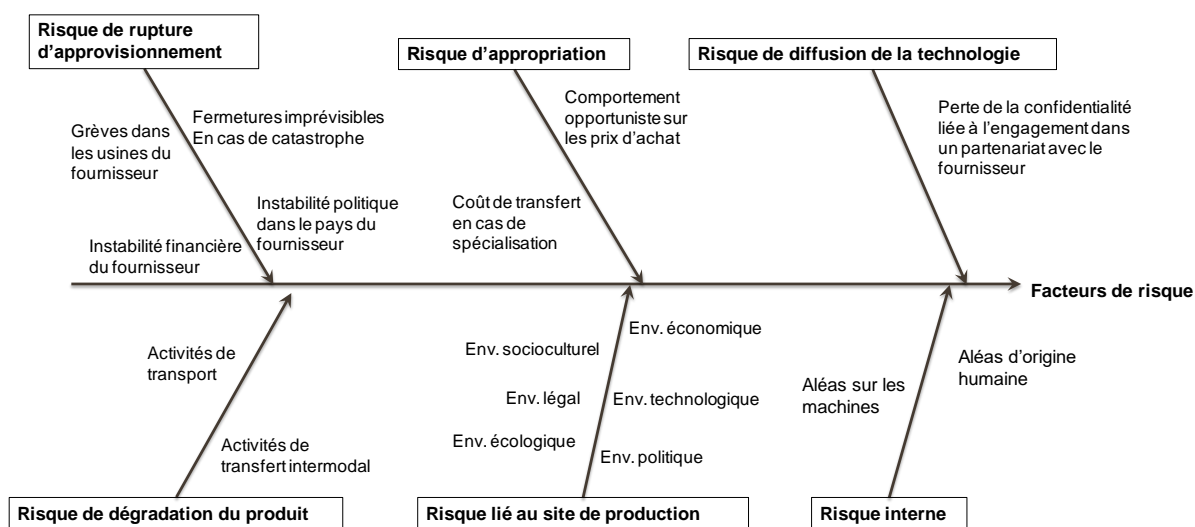


Figure 4-21 Identification des facteurs de risque potentiels à intégrer dans la décision de faire ou faire faire

En outre, chacune des alternatives de "faire en interne" ou "externaliser" requiert la réalisation de quelques opérations additionnelles sur le site de production (comme on l'a mentionné en évoquant les coûts de transformation sur site). Ces opérations réalisées en interne nécessitent l'intervention de ressources humaines et des machines. Les aléas conduisant au dysfonctionnement de ces ressources doit être pris en compte dans les deux scénarios de production.

L'étape 5 a pour objectif de définir les attributs qui interviennent dans la définition des indicateurs de performances utilisés dans l'analyse de la décision de faire ou faire faire. L'étape suivante présente les démarches d'évaluation des différents indicateurs de performance sur la base des attributs définis précédemment.

#### ETAPE 6 : EVALUATION DES ALTERNATIVES

Dans ce paragraphe nous allons présenter la démarche d'évaluation de l'objectif *technico durable* et l'objectif de *maîtrise des risques*. Chacun de ses deux objectifs traduit le niveau de satisfaction des alternatives de "faire ou faire faire" d'un point de vue performance et d'un point de vue risque. La structure du modèle d'évaluation est basée sur la méthode OIA<sup>32</sup>. La

<sup>32</sup> OIA désigne Observation, Interprétation, Agrégation. Cette méthode a été formalisée dans le cadre des travaux de Collignan.

méthode OIA fournit un formalisme pour lier l'évaluation des alternatives d'un côté (l'étape d'observation) et d'un autre côté formaliser les préférences du décideur via l'étape d'interprétation. L'utilisation de la méthode OIA est structurée trois étapes :

- *une étape d'observation* : pendant cette étape on évalue les alternatives sur la base des attributs précédemment introduits.
- *une étape d'interprétation* : via l'utilisation des fonctions de satisfaction, les attributs évalués dans l'étape d'observation sont regroupés par famille et ensuite interprétés en exprimant leurs niveaux de satisfaction des exigences du décideur.
- *une étape d'agrégation* : Pour faciliter la prise de décision les différents indicateurs interprétés sont agrégés en deux objectifs. Ces deux objectifs traduisent le niveau de satisfaction de la performance technico-durable et la maîtrise des risques.

#### ▪ **Evaluation de l'objectif technico durable**

Pour chacune des alternatives de production analysées, l'évaluation de l'objectif technico-durable (noté *OTD*) se base sur l'agrégation des indicateurs économique (noté *IC*), technique (*IT*) et socioéconomique (*IS*). Ces trois indicateurs sont de différentes natures. Afin de les agréger en indicateur unique (*OTD*), il est nécessaire de les normaliser pour qu'il soit exprimés dans la même bases. On choisit de les exprimés par des entités adimensionnées entre 0 et 1, qui traduisent le niveau de satisfaction du décideur (c'est l'objectif de l'étape d'interprétation dans le modèle).

L'agrégation de ces trois indicateurs tient compte aussi des préférences du décideur. Ces préférences se déclinent selon deux aspects : l'importance de chaque indicateur de performance et la stratégie d'agrégation.

Le premier aspect, lié à la priorisation des indicateurs de performance, a été abordé dans l'analyse de la stratégie de l'entreprise (cf. § 4.4.4.1). Les pondérations traduisant l'importance des trois indicateurs de performance sont données par le vecteur *VPI* obtenu par la formule (30). En ce qui concerne, la stratégie d'agrégation, elle aborde la question de la compensation entre les indicateurs de performance. La stratégie d'agrégation permet de tenir compte de l'attitude du décideur : est-ce que le décideur accepte (stratégie de compromis) ou non (stratégie conservatrice) que les indicateurs de performance se compensent entre eux ? Nous considérons que le choix de la stratégie d'agrégation est un paramètre du modèle que le décideur peut fixer selon ses préférences et selon le contexte de la décision. Pour cette raison nous optons pour l'opérateur GOWA<sup>33</sup> (Yager, 2004) qui offre une stratégie d'agrégation adaptable. La valeur de satisfaction de l'objectif technico-durable (*OTD*) d'une alternative de production (*A<sub>j</sub>*) est donnée par la formule (2).

$$OTD(A_j) = \sqrt[5]{vpi_1 * IPC^s + vpi_2 * IPT^s + vpi_3 * IPS^s} \quad (31)$$

Où  $vpi_1, vpi_2, vpi_3$  sont les composantes du vecteur traduisant respectivement les priorités des indicateurs économique, technique et socioéconomique.

<sup>33</sup> appelé aussi le continuum d'agrégation

Le paramètre  $s$  permet de fixer la stratégie d'agrégation. Selon la valeur du paramètre  $s$ , on peut passer d'une stratégie compensatoire à une stratégie conservatrice (cf. Annexe 3 §11.2.2).

Enfin l'objectif *OTD* sera exprimé par une valeur adimensionnée comprise entre 0 et 1. La valeur 0 signifie que cet objectif n'est pas satisfait, la valeur 1 signifie que l'objectif *OTD* est totalement satisfait. Par la suite nous nous intéressons à l'obtention des valeurs *IPC*, *IPT* et *IPS*.

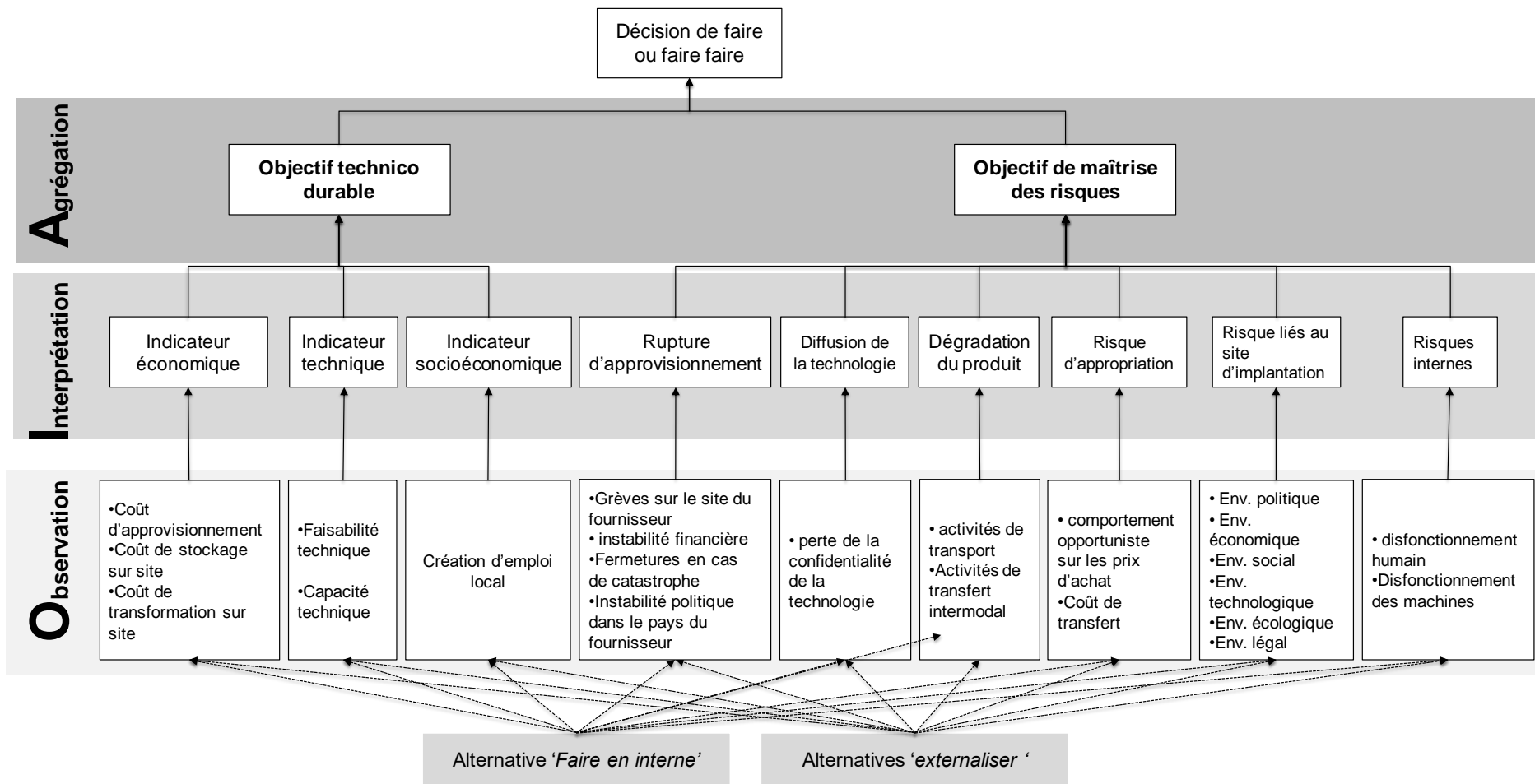


Figure 4-22 structure du modèle d'évaluation de la décision de faire ou faire faire



▪ **Obtention de la valeur de satisfaction de l'indicateur de performance économique (IPC)**

L'évaluation de la valeur de satisfaction de l'indicateur de performance économique pour chaque alternative de production suit deux étapes :

- d'abord, le coût de revient du produit analysé est calculé, ce qui correspond à l'étape d'observation.
- Ensuite, l'étape d'interprétation consiste à comparer le coût observé de chaque alternative de production au regard de la satisfaction du coût objectif exprimé par le décideur.

Etape d'observation du coût de chaque alternative

En se basant sur la définition des attributs de l'indicateur économique (cf. § Etape 5), le coût de revient unitaire pour peut être donnée par la formule (32).

$$\begin{aligned} \text{coût de revient (€)} & \qquad \qquad \qquad (32) \\ = & \frac{\text{coût d'approvisionnement} + \text{coût de stockage sur site} + \text{coût de transformati}}{\text{volume total de produit}} \end{aligned}$$

Les attributs *coûts d'approvisionnement* et *coût de stockage* sont calculés d'une façon similaire dans les deux scénarios ("*faire en interne*" ou "*externaliser*"). En ce qui concerne l'attribut *coût de transformation* une distinction doit être faite entre les alternatives "*faire en interne*" et "*externaliser*". Le détail d'évaluation de chacun de ces attributs est donné en annexe 3 (cf. § 11.2.3)

Etape d'interprétation de l'indicateur de coût de chaque alternative

A cette étape il s'agit de mesurer le niveau de satisfaction de chaque alternative d'un point de vue économique. Le décideur un intervalle de coût acceptable. Si une alternative propose un coût de revient inférieur au seuil inférieur de coût alors elle est satisfaisante. Tandis que c'est le coût de revient obtenu pour une alternative est supérieur à ce seuil de coût alors est considérée comme étant non satisfaisante. Pour lier l'évaluation économiques des alternatives de production au niveau de satisfaction du décideur, nous proposons d'utiliser la fonction de désirabilité de (Harrington, 1965). Cette fonction de désirabilité est adaptée pour les problématiques industrielles et celles liées aux activités de production en particulier.

Le paramétrage de la fonction de désirabilité nécessite de renseigner quatre paramètres (cf. tableau 4-7).

Tableau 4-7 les valeurs de paramétrage de la courbe de désirabilité de l'indicateur économique

Paramètre	AC	SL	$d_{AC}$	$d_{SL}$
<b>description</b>	<i>Accurate Constraint</i> : valeur au-delà de laquelle le décideur est insatisfait. Représente la borne inférieure de l'intervalle de coût exprimé par le décideur	<i>Soft Limit</i> : représente la valeur en dessous de laquelle	désirabilité de AC : indique le niveau de désirabilité associé à AC	désirabilité de SL : indique le niveau de désirabilité associé à SL

L'expression de la satisfaction de l'indicateur de performance économique (IPC) d'une alternative  $j$  est donnée par l'expression (33)

$$IPC(C_j) = \exp(-\exp(\alpha + \beta * C_j)) \quad (33)$$

où  $C_j$  représente le coût de revient calculer pour une alternative  $j$ .  $\alpha$  et  $\beta$  sont des paramètres obtenues à partir des paramètres présentés dans le (tableau 4-7).

$$\begin{cases} \beta = \frac{\ln(\frac{\ln(d_{AC})}{\ln(d_{SL})})}{AC-SL} \\ \alpha = \ln(-\ln(d_{SL})) - \beta * SL \end{cases} \quad (34)$$

A titre d'exemple, en affectant les valeurs :  $SL : 4\text{€}$ ,  $AC : 10\text{€}$ ,  $d_{AC} : 0.2$  et  $d_{SL} : 0.9$ , les valeurs de satisfaction de l'indicateur économique peut être représenté par la courbe suivante (figure 4-23).

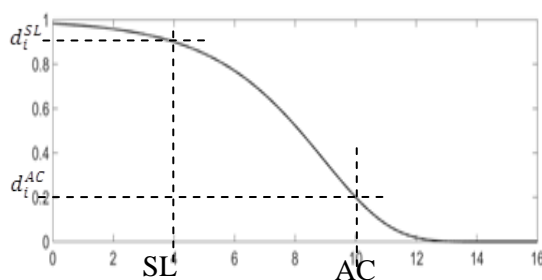


Figure 4-23 courbe traduisant le niveau de satisfaction de l'indicateur de performance économique (IPC)

On note que l'utilisation des fonctions de désirabilité présente un inconvénient : en adimensionnant par exemple l'indicateur économique on perd ainsi la mesure de la réalité (exprimée par exemple par des coûts). Cependant, le recours à l'utilisation des fonctions de désirabilité permet la capitalisation d'informations précieuses qui sont difficilement exprimables et quantifiables telles que la satisfaction du décideur. Ces fonctions permettent dans ce sens de générer de nouvelles informations utiles.

- **Obtention de la valeur de satisfaction de l'indicateur de performance technique (IPT)**



L'évaluation de l'indicateur technique fait la distinction entre les alternatives "*faire en interne*" et "*externaliser*".

Satisfaction de l'indicateur de performance technique pour le cas du "*faire en interne*"

La valeur de satisfaction de l'indicateur de performance technique pour une alternative  $A_j$  dans le cas du scénario "*faire en interne*" est basée sur l'expression (35)

$$IPT(A_j) = \sqrt[st]{\omega_{mp} * smp^{st} + \omega_{si} * ssi^{st} + \omega_{ca} * sca^{st}} \quad (35)$$

$smp$ ,  $ssi$  et  $sca$  représentent respectivement la valeur de satisfaction des attributs de mobilité du process, site d'implantation et capacité d'approvisionnement. Le calcul de ces attributs est détaillé par la suite.

$st$  représente le paramètre de la stratégie de compensation. On considère que les trois attributs de performance technique doivent être absolument satisfaits pour que l'indicateur de performance technique soit considéré comme satisfait. Si un de ces attributs fait défaut alors la performance technique globale ne peut être satisfaite. Alors le paramètre  $st$  doit traduire une stratégie d'agrégation conservatrice. On fixe alors la valeur de  $st=-20$ .

Les valeurs  $\omega_{mp}$ ,  $\omega_{si}$ ,  $\omega_{ca}$  représentent respectivement les valeurs de pondérations des attributs de mobilité de process, site d'implantation et capacité d'approvisionnement. Ces pondérations sont choisies en utilisant la méthode AHP. Dans notre analyse, on affectent à ces pondérations les valeurs :  $\omega_{mp} = 0.249$ ,  $\omega_{si} = 0.157$ ,  $\omega_{ca} = 0.594$ . On vérifie bien que leur somme vaut 1.

En se basant sur ces considérations La valeur de satisfaction de l'indicateur de performance technique pour une alternative  $A_j$  dans le cas du scénario "*faire en interne*" est basée sur l'expression (36)

$$IPT(A_j) = \sqrt[-20]{0.249 * smp^{-20} + 0.157 * ssi^{-20} + 0.594 * sca^{-20}} \quad (36)$$

La valeur de satisfaction de la mobilité du process ( $smp$ ) est liée au degré de mobilité des modules utilisés pour la production du produit analysé. Un indicateur de mobilité qui exprime ce degré de satisfaction est proposé dans le chapitre 2 (cf. § 3.5.3).

La valeur de satisfaction liée au site d'implantation ( $ssi$ ) dépend de la disponibilité de la qualification nécessaire (notée  $dqn$ ) et la disponibilité de l'énergie nécessaire (notée  $den$ ). Cette valeur de satisfaction est donnée par la formule (37).

$$ssi(A_j) = \sqrt[-100]{0.5 * dqn^{-100} + 0.5 * den^{-100}} \quad (37)$$

Les valeurs de  $dqn$  et  $den$  sont déterminées en utilisant des grilles notations et sont liées directement aux caractéristiques du site de production (tableau 4-8 et tableau 4-9). L'évaluation de ces deux caractéristiques figure parmi les données d'entrées du modèle à l'étape 3.

Tableau 4-8 Grille d'évaluation de la satisfaction de l'attribut de disponibilité de la qualification nécessaire sur site

<b>Evaluation qualitative</b>	<b>Interprétation de l'attribut de disponibilité de la qualification</b>	<b>Valeur de dqn</b>
<b>TI</b>	main d'œuvre qualifié disponible sans formation	1
<b>I</b>	main d'œuvre qualifié disponible avec courte formation	0,7
<b>M</b>	main d'œuvre non qualifié disponible avec courte formation	0,5
<b>F</b>	main d'œuvre non qualifié disponible avec longue formation	0,25
<b>TF</b>	main d'œuvre rare	0,1
	Main d'œuvre indisponible	0

Tableau 4-9 Grille d'évaluation de la satisfaction de l'attribut de disponibilité de l'énergie nécessaire sur site

<b>Evaluation qualitative</b>	<b>Interprétation de l'attribut de disponibilité de l'énergie</b>	<b>Valeur de den</b>
<b>TI</b>	énergie disponible en quantité suffisante à coût faible	1
<b>I</b>	énergie disponible en quantité suffisante à coût cher	0,7
<b>M</b>	énergie disponible en quantité insuffisante à coût faible	0,5
<b>F</b>	énergie disponible en quantité insuffisante à coût cher	0,25
<b>TF</b>	Sources d'énergie indisponible	0

Le troisième attribut intervenant dans la définition de la satisfaction de l'indicateur de performance technique pour l'alternative "*faire en interne*" est la capacité d'approvisionnement (*sca*). Cet attribut dépend de la disponibilité des fournisseurs qualifiés pour fournir le SPM en matière première nécessaire (*notée dfq*) et leur proximité du site de production (*noté psp*). L'expression de la valeur de satisfaction de la capacité d'approvisionnement est donnée par la formule (38).

$$sca(A_j) = \sqrt[100]{0.2 * dqn^{-100} + 0.8 * den^{-100}} \quad (38)$$

Pour assurer son approvisionnement l'entreprise peut fixer un seuil critique représentant le nombre de fournisseur minimal. Ce seuil critique permet à l'entreprise de ne pas être dépendante d'un seul fournisseur. Le critère (*dfq*) dépend des caractéristiques du site de production et sa valeur fait partie de la liste des informations collectées au début du processus d'analyse à l'étape 3. Cette valeur étant exprimée qualitativement en utilisant une échelle sémantique, nous proposons cette grille (tableau 4-10) pour convertir cette valeur qualitative en un niveau de satisfaction.

Tableau 4-10 Grille d'évaluation de la satisfaction de l'attribut de disponibilité de fournisseurs de MP qualifiés

<b>Evaluation qualitative</b>	<b>Interprétation de l'attribut dfq</b>	<b>Valeur de dfq</b>
<b>TI</b>	Nombre de fournisseurs qualifiés très important	1
<b>I</b>	Nombre de fournisseurs qualifiés dépasse le seuil de satisfaction	0,7
<b>M</b>	Nombre de fournisseurs qualifiés est acceptable	0,5
<b>F</b>	Nombre de fournisseurs qualifiés est proche du seuil critique	0,25
<b>TF</b>	Nombre de fournisseurs qualifiés très important ne respecte pas le seuil critique	0

En ce qui concerne le critère de proximité des fournisseurs qualifiés par rapport au site de production, ce critère dépend est lié directement aux localisations géographiques du fournisseur et du site de production. En déterminant ces localisations on peut calculer les distances séparant ces deux sites. On peut ainsi lier la valeur de satisfaction du critère ( $psp$ ) directement à ces distances. On propose par exemple un seuil de satisfaction maximal à 5000 km, la valeur de  $psp$  est donnée par la formule (39) suivante.

$$psp(d_j) = 313.57 d^{-0.825} \tag{39}$$

$d_j$  représente la distance entre le site du fournisseur  $j$  et le site de production. L'expression de la valeur de satisfaction  $psp$  donnée dans l'expression (39) a été obtenue en utilisant trois points de coordonnées (1000, 1), (3000,0.5) et (5000,0.25) où ces coordonnées expriment la distance en km et la valeur de satisfaction qu'on lui associe. Ensuite une courbe de tendance de type puissance est tracée et l'expression (39) est déterminée par Excel.

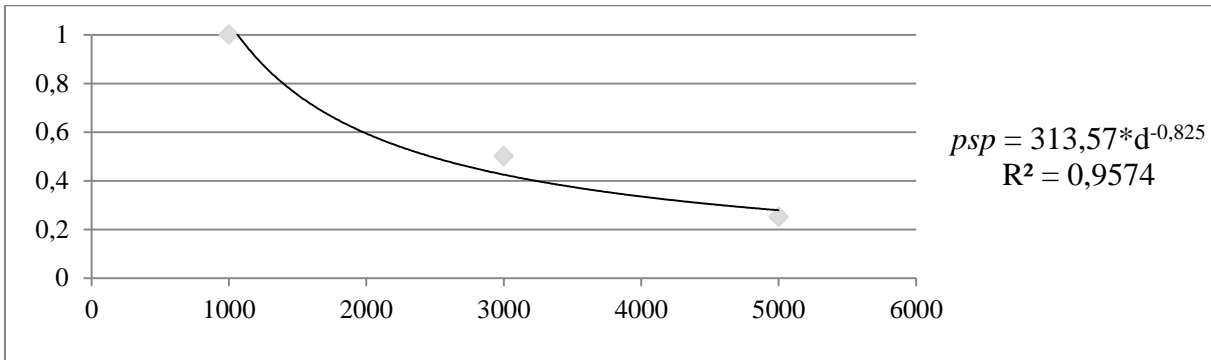


Figure 4-24 Courbe représentant la valeur de satisfaction de l'attribut de proximité des fournisseurs ( $psp$ )

Satisfaction de l'indicateur de performance technique pour le cas du "faire en interne"

L'évaluation de la performance technique d'un fournisseur externe se base sur les six attributs définis dans la (figure 4-20-B). Dans ce cas pour une alternative  $A_j$ , la valeur de satisfaction de la performance technique est donnée par l'expression (40).

$$IPT(A_j) = \sqrt[20]{0.44 * scf^{-20} + 0.149 * sst^{-20} + 0.08 * scc^{-20} + 0.065 * sir^{-20} + 0.09 * srd^{-20} + 0.176 * snp^{-20}} \tag{40}$$

Les valeurs de pondérations indiquées dans la formule (40) sont obtenues par la méthode AHP. Le détail de la démarche est donné en annexe (cf. § 11.2.3).

Les six valeurs des attributs sont initialement renseigner en utilisant une échelle sémantique. Cette échelle sémantique est ensuite convertit en une valeur de satisfaction de chaque attribut en utilisant un la grille (tableau 4-11).

Tableau 4-11 grille d'évaluation des attributs de performance technique pour un fournisseur externe

TI	I	M	F	TF
1	0.75	0.5	0.25	0.1

▪ **Obtention de la valeur de satisfaction de l'indicateur de performance socioéconomique (IPS)**

L'indicateur de performance socioéconomique considère l'impact sociétal sur l'environnement direct du site de production. Cet impact est mesuré par la création d'emploi local. Cet indicateur est directement lié à la localisation géographique de où la fabrication des produits a lieu pour chaque alternative de production.

La satisfaction de l'indicateur de performance Ainsi, pour chaque alternative, si la production a lieu dans la même région que la localisation du site de production alors l'indicateur *IPS* vaut 1, sinon il vaut 0,1.

On note pour le cas du scénario "*faire en interne*" l'indicateur *IPS* est toujours satisfait grâce à l'utilisation d'un SPM.

▪ **Evaluation de l'objectif de maîtrise des risques (OMR)**

La criticité<sup>34</sup> des facteurs de risque de chaque alternative est évaluée en utilisant la méthode AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance par leur Effet et leur criticité). La criticité de chaque facteur de risque est identifiée et quantifiée vis-à-vis de la probabilité d'occurrence, de la gravité et de la détectabilité (tableau 4-12).

Tableau 4-12 Exemple de grilles AMDEC Pour l'évaluation des facteurs de risques

Type de risque	Facteur de risque	Dépendance au site production	Fréquence d'occurrence (F)	Gravité (G)	Détectabilité (D)	Criticité (C=F*G*D)
<b>Risque de rupture d'approvisionnement</b>	<i>Grèves dans les usines du fournisseur</i>	Invariable par rapport aux caractéristiques du site				
	<i>Instabilité financière du fournisseur</i>					
	<i>Fermetures imprévisibles En cas de catastrophe</i>					
	<i>Instabilité politique dans le pays du fournisseur</i>					
<b>Risque</b>	<i>Coût de</i>					

<sup>34</sup> Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement (SdF) et de la gestion de la qualité, la criticité est définie comme le produit de la probabilité d'occurrence d'un accident par la gravité de ses conséquences

<b>d'appro- priation</b>	<i>transfert en cas de spécialisation</i>					
	<i>Comportement opportuniste sur les prix d'achat</i>					
<b>Risque de diffusion de la technologie</b>	<i>Perte de la confidentialité liée à l'engagement dans un partenariat avec le fournisseur</i>					
<b>Risque de dégradation du produit</b>	<i>Activités de transport</i>	Variable contextuelle dépendant des caractéristiques du site				
	<i>Activités de transfert intermodal</i>					
<b>Risque lié au site de production</b>	<i>Env. politique</i>					
	<i>Env. économique</i>					
	<i>Env. socioculturel</i>					
	<i>Env. technologique</i>					
	<i>Env. écologique</i>					
	<i>Env. légal</i>					
<b>Risque interne</b>	<i>Aléas sur les machines</i>					
	<i>Aléas d'origine humaine</i>					
<b>= min (C)</b>						

Cependant, il peut être difficile d'évaluer des facteurs avec des valeurs quantifiables et précises (dans le cas classique de l'AMDEC on utilise une échelle de 1 à 10). Pour gérer cette imprécision sur l'évaluation de l'indicateur de maîtrise de risque, on propose d'utiliser une échelle sémantique. Chaque facteur de risque est ainsi évalué qualitativement en utilisant cinq niveaux : *Très important (TI)*, *Important (I)*, *Moyens (M)*, *Faible (F)* et *Très faible (TF)*. La valeur sémantique choisie est ensuite convertie en utilisant la grille proposée dans le tableau 4-13.

Tableau 4-13 Grille d'évaluation des facteurs de risque exprimés à partir de variables sémantiques

<b>TI</b>	<b>I</b>	<b>M</b>	<b>F</b>	<b>TF</b>
-----------	----------	----------	----------	-----------

0	0.25	0.5	0.75	1
---	------	-----	------	---

Pour une alternative  $j$ , La criticité  $c_{ij}$  de chaque facteur  $i$  de risque est donnée par la formule (41)

$$c_{ij} = F_{ij} * G_{ij} * D_{ij} \quad \text{pour } i \in [1, nfr] \quad (41)$$

où  $nfr$  le nombre total des facteurs de risques,  $F_{ij}, G_{ij}$  et  $D_{ij}$  représentent respectivement : la fréquence d'occurrence, la gravité et la détectabilité de chaque facteur de risque  $i$  correspondant à une alternative  $j$ .

La valeur de criticité globale d'une alternative est obtenue en considérant le *minimum* de toutes les valeurs de criticité de chaque facteur. L'opérateur de *minimum* est justifié par le besoin une stratégie conservative. Si un facteur présente un niveau de criticité important, l'indicateur de maîtrise de risque doit en tenir compte. Enfin, pour une alternative  $A_j$  la valeur de satisfaction de l'objectif de maîtrise de risque est donnée par le niveau de criticité global comme donné par l'expression (42).

$$OMR(A_j) = \min(c_{ij}) \text{ où } i \in [1, nfr] \quad (42)$$

L'indicateur  $OMR$  est exprimé par une valeur entre 0 et 1, avec 0 signifie que l'indicateur de maîtrise des risques n'est pas satisfait et 1 désigne l'indicateur  $OMR$  est totalement satisfait.

Dans l'évaluation de la criticité des facteurs de risque, on distingue les facteurs dépendant et indépendant des caractéristiques du site de production.

A la fin de l'étape 6, toutes les alternatives candidates sont évaluées. Sur la base des deux objectifs de performance technico-durable et la maîtrise des risques, l'alternative préférée est choisie. Cette action de choix relève de la phase de décision discutée dans le paragraphe suivant.

#### 4.4.4.3 PHASE DE DECISION

Après l'évaluation des alternatives de production, le décideur doit procéder au choix d'une solution. Cette décision va conduire à : pour l'alternative "*faire en interne*", il faut alors définir les moyens de production et leur dimensionnement. Pour les parties "*externaliser*", il faut définir la nature de collaboration à mettre en place avec le fournisseur.

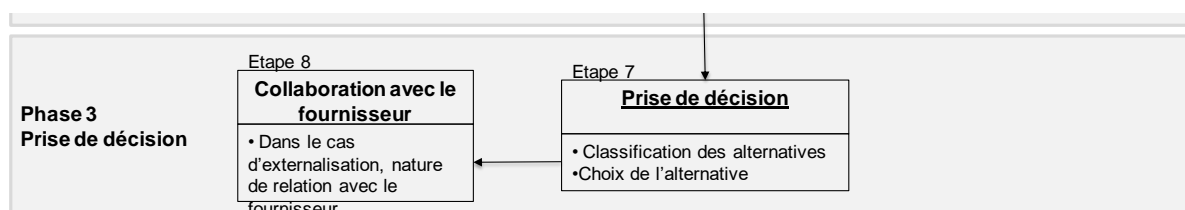


Figure 4-25 Processus d'analyse de la stratégie de production dans un contexte de mobilité réduite à la prise de décision

ETAPE 7 : DECISION DE CHOIX DE L'ALTERNATIVE DE PRODUCTION

Nous considérons que l'activité de prise de décision finale de faire ou faire faire est une décision purement humaine. L'approche que nous proposons doit fournir au décideur les informations nécessaires pour l'aider à prendre cette décision. Nous proposons un tableaux de bord permettant l'évaluation des différentes alternatives "faire en interne" ou "externaliser" selon les quatre points de vue : économique, technique, social ou maîtrise des risques. Ainsi, le décideur peut "extraire" une comparaison selon le point de vue qu'il l'intéresse. La figure 4-26 illustre un exemple de tableau de bord contenant les informations mises à disposition du décideur pour l'assister dans la prise de décision finale. Cette illustration est tirée du cas d'application qui sera présenté dans l'Annexe 1 décrivant le cas d'application (cf. § 9.3.5).

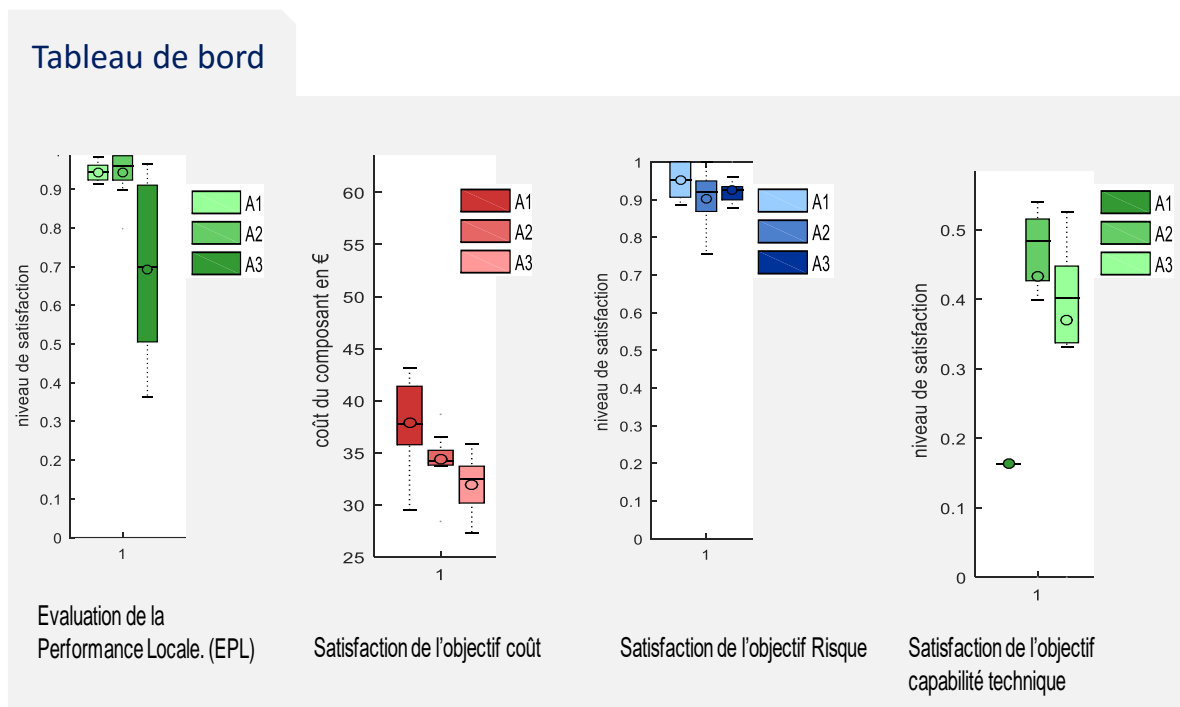


Figure 4-26 Illustration du tableau de bord qui peut être mis à disposition du décideur

Cependant, le nombre d'alternatives à analyser peut être important limitant les capacités du décideur à gérer toutes ces données. Nous proposons de fournir un niveau d'agrégation avec une note unique par alternative. Pour définir cette fonction d'agrégation, des informations concernant les préférences des décideurs sont à intégrer, par rapport à :

- 5 l'importance accordé à la maximisation des performances technico-durable et la maîtrise des risques.

Etant donné qu'il n'y a que deux objectifs à comparer, on opte pour une notation directe. Ainsi le décideur fournit le poids de l'objectif technico durable (notée  $\omega_{OTD}$ ) et l'importance de l'objectif de maîtrise des risques (notée  $\omega_{OMR}$ ), en respectant la condition (43)

$$\omega_{OTD} + \omega_{OMR} = 1 \tag{43}$$

- 6 *La stratégie d'agrégation* à utiliser pour la combinaison des deux objectifs évalués. Selon le contexte de la décision, le décideur peut opter pour une attitude de recherche de compromis ou plutôt une stratégie conservatrice.

Pour chaque alternative  $A_j$ , on propose de calculer le nouvel indicateur intitulé *Evaluation de la performance local (EPL)* en utilisant l'expression (44).

$$EPL(A_j) = \sqrt[z]{\omega_{OTD} * OTD(A_j)^z + \omega_{OMR} * OMR(A_j)^z} \quad (44)$$

Le paramètre  $z$  permet de choisir la stratégie d'agrégation. Les objectifs *OTD* et *OMR* sont donnés respectivement par les expressions (31) et (42).

Dans le cas d'un nombre important d'alternatives "*faire en interne*" ou "*externaliser*", L'indicateur *EPL* permet d'affecter à chaque alternative une note unique. Ainsi, un classement des alternatives peut être proposé sur la base de *EPL*.

#### ETAPE 8 : DETERMINATION DE LA NATURE DE COLLABORATION AVEC LE FOURNISSEUR

Selon Van de Water, il est aussi important- de déterminer le bon type de relation à mettre en place avec un fournisseur, que de déterminer s'il faut faire en interne ou externaliser (Van de Water and Van Peet, 2006). Ce choix de relation client fournisseur étant à la limite de notre périmètre d'étude, nous donnons quelques pistes basés les travaux de Van de Water and Van Peet (2006). Ces auteurs lient la nature de collaboration avec le fournisseur à deux considérations : i) d'une part le type de produit et d'autre part ii) la stratégie de base choisie. La prise en compte de la stratégie de base choisie par l'entreprise a un impact sur la durée du partenariat à mettre en place (long terme ou court terme).

Le type de produit est considéré selon la classification de (Kraljic, 1983) qui identifient 4 types de produits : produits non critiques, produits à effet levier, produit de goulot d'étranglement et produits stratégiques. Cette classification se base sur la considération l'impact des produits sur la rentabilité de l'entreprise et les risques d'approvisionnement.

Pour chaque catégorie de produit un type de relation peut être privilégié avec le fournisseur (Van de Water and Van Peet, 2006) :

- 7 Les produits non critiques sont faciles à gérer et présente une faible importance stratégique, la relation avec le fournisseur doit être mise en place de telle façon qu'elle s'autogère.
- 8 Les produits à effet de levier sont des produits qui sont facilement gérable mais qui bénéficient d'une importance stratégique accrue. Dans ce cas une relation bilatérale pratique peut être mise en place grâce à une contractualisation.
- 9 Les produits de goulot d'étranglement sont des produits qui ont peu d'intérêt stratégique par contre ils sont difficilement gérables. Pour une gestion efficace, l'entreprise peut opter pour une standardisation ou les substituer.
- 10 Enfin, pour les produits stratégiques une relation de proximité doit être établie avec le fournisseur.



#### 4.4.5 CONCLUSION SUR L'ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION

Notre modèle d'aide à la décision «*faire ou faire faire*» propose une démarche d'analyse de la décision qui combine une prise en compte de l'évaluation de la performance des alternatives de production avec une prise en compte de la maîtrise des risques.

La considération de l'opérateur GOWA dans la démarche d'analyse est à la fois innovatrice et appropriée : d'un point de vue scientifique, l'opérateur GOWA permet de tenir compte de la compensation entre les indicateurs ce qui n'était pas pris en compte dans les travaux que nous avons pu consulter. D'un point de vue industriel, l'utilisation de l'opérateur GOWA est appropriée car elle permet d'adapter la démarche en fonction des préférences du décideur et la situation de décision. Cette adaptabilité est très importante dans notre contexte du fait de la mobilité du système de production.

En effet, L'originalité du modèle proposé réside dans la considération de la mobilité du système de production dans l'analyse de la décision de «*faire ou faire faire*». Les particularités de la mobilité du système de production dans la problématique "*faire ou faire faire*" se déclinent selon trois caractéristiques (figure 4-27) :

- *Changement fréquent du site de production* : la stratégie de l'entreprise et par conséquent l'importance accordée aux critères de décision sont remises en question à chaque changement de site de production. Le modèle proposé permet de lier la stratégie de l'entreprise, les caractéristiques du site de production et l'évaluation des alternatives de production.
- *Considération d'un SPM* : l'alternative de *faire en interne* est basée sur l'utilisation d'un SPM.
- *Prise en compte de la mobilité dans l'évaluation des différents indicateurs* : l'aptitude de mobilité du système de production impacte directement les objectifs de performance et de maîtrise des risques de l'alternative *faire en interne*. Le modèle que nous proposons permet de tenir compte de cette appréciation de la mobilité du SPM.

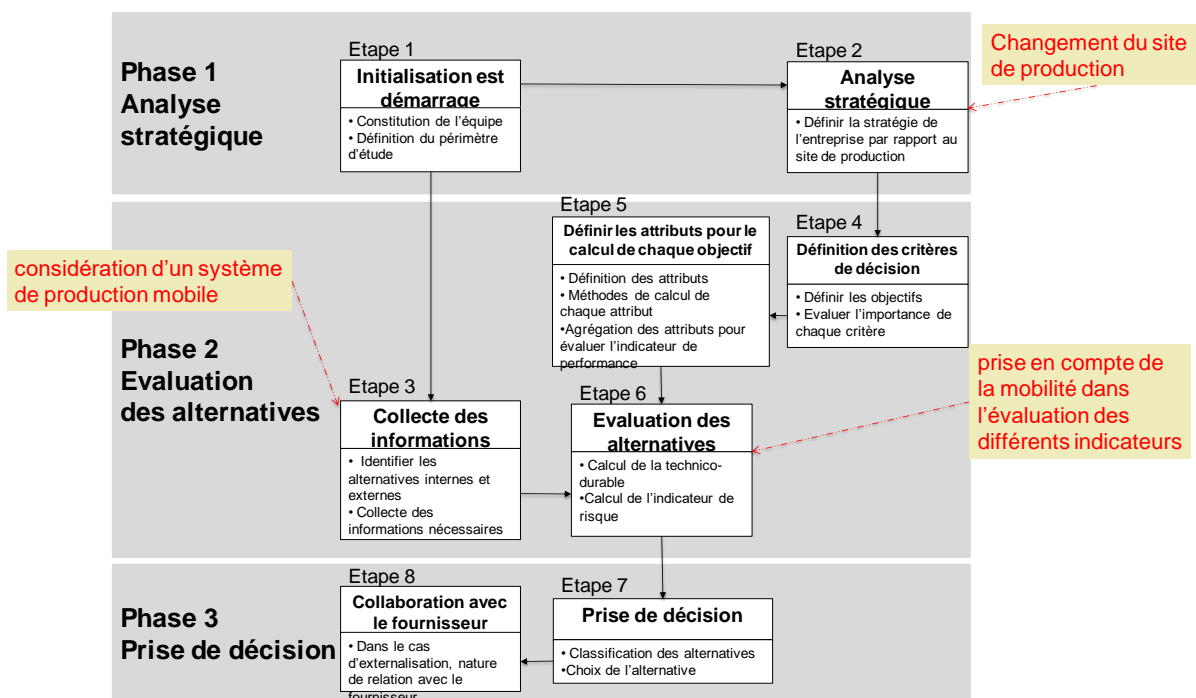


Figure 4-27 prise en compte de la mobilité dans le modèle d'aide à la décision "faire ou faire"

Du fait de sa mobilité, un SPM présente plusieurs différences par rapport à un système de production conventionnel ou "sédentaire". Le chapitre précédent a détaillé les différentes spécificités de la mobilité. Ces spécificités de la mobilité doivent être prises en compte le plus en amont possible dans le processus de conception d'un tel système. La partie suivante a pour objectif de présenter comment la mobilité peut être prise en compte dans la conception d'une configuration du SPM.

## 4.5 LA CONCEPTION DE LA CONFIGURATION DU SPM

Le cahier des charges pour la conception du SPM est à ce stade affiné. On dispose d'une définition du produit à faire (nomenclature), de la demande du client (notamment traduit en cadence nécessaire), de la caractérisation du site de production (spécificités et contraintes) et enfin d'une analyse de ce qu'il est réalisé in situ. L'objectif de la phase de conception du SPM est de partir de ces spécifications (ainsi que de la description de ressources potentielles) pour proposer une configuration du SPM adaptée au site de production.

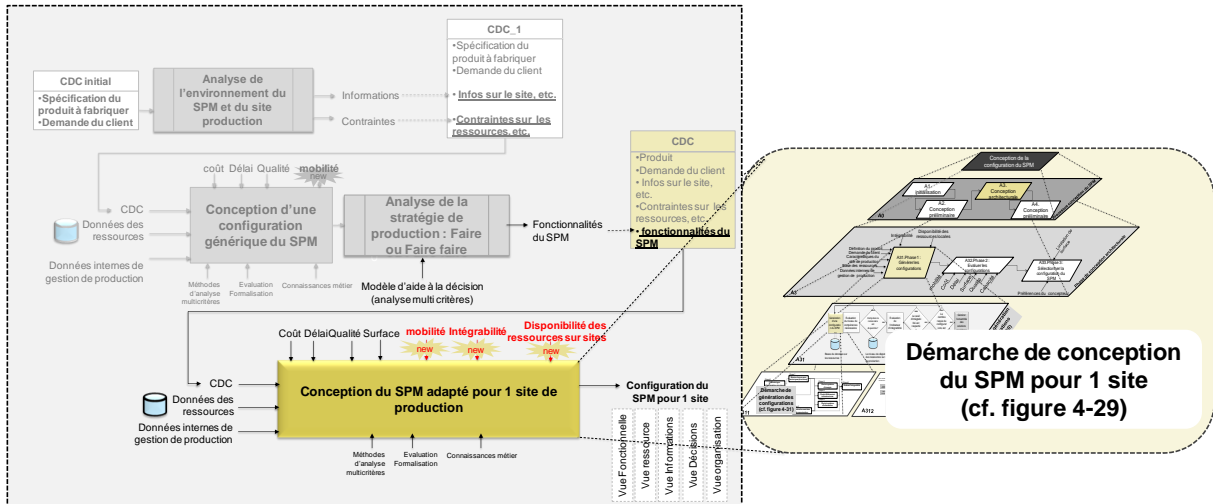


Figure 4-28 La phase de conception du SPM se base sur le processus de conception de système de production défini dans le chapitre 2

La sélection de l'architecture<sup>35</sup> du SPM correspond à un profil de demande précis (en termes de capacité et capabilité nécessaires) et tient compte des caractéristiques du site de production. Cette activité fait suite à l'analyse de la question de faire ou faire faire qui permet de déterminer ce que l'entreprise doit fabriquer en interne, et par conséquent de savoir d'une part quelles ressources sont nécessaires, et d'autre part quelle sera leur organisation (dimensionnement, implantation physique) dans l'architecture du SPM.

Etant donné que la réalisation du produit à fabriquer requiert un certain nombre d'opérations<sup>36</sup> à faire en interne, pour chaque opération le concepteur<sup>37</sup> du SPM dispose d'un certains nombre de ressources capables de réaliser cette opération. Plusieurs architectures du SPM, obtenues grâce à une combinaison des ressources disponibles pour chaque opération, peuvent être envisageables pour l'obtention du produit à fabriquer. Ces architectures du SPM possèdent différentes cadences de production, garantissent différents niveaux de qualités et nécessitent différents coûts d'investissement. Un concepteur ne peut envisager d'analyser toutes les combinaisons possibles des ressources (machines, ressources humaines, infrastructures, etc). L'intérêt de proposer un outil automatisé de génération des implantations du SPM est de permettre au concepteur du SPM de proposer et d'évaluer plus d'alternatives qu'un être humain seul ne peut être capable de faire, en tenant compte de plusieurs critères d'évaluation.

Cependant, toutes les combinaisons possibles des ressources ne peuvent être faisables. En effet, des conditions d'interopérabilité (contraintes d'interfaces) entre les ressources doivent être satisfaites pour que les différentes ressources puissent fonctionner ensemble. Par exemple, pour qu'une ressource humaine puisse intervenir sur une machine, elle doit avoir les compétences nécessaires. Pour qu'un moyen de manutention comme un chariot de transfert

<sup>35</sup> le terme *architecture du système* désigne une implantation physique des ressources composant le système de production. Nous utiliserons sans différence les termes *architecture* ou *configuration*.

<sup>36</sup> Une opération concerne des actions élémentaires pouvant être exécutées par les ressources de l'entreprise

<sup>37</sup> désigne la personne ou le groupe de personnes en charge de la conception du SPM. Le concepteur peut être aussi confondu avec le rôle du décideur qui prendra les choix finaux de conception du SPM.

puisse être lié (au sens physique) à une machine, il doit respecter des contraintes géométriques de dimension et de précision (tolérancement). Afin de désigner ce niveau d'interopérabilité locale entre les ressources nous préférons utiliser le terme d'intégrabilité des ressources afin d'éviter toute confusion avec le terme *d'interopérabilité en entreprise* qui est bien réservé pour le domaine d'intégration d'entreprise (David Chen, Doumeings, et Vernadat 2008; Panetto et Molina 2008; F. B. Vernadat 2003).

En plus d'être intégrable et pour être opérationnelle, une configuration du système de production doit être mobile. Nous proposons un indicateur de mobilité du système dans le modèle d'évaluation et de sélection de la configuration du SPM. Il se rajoute aux indicateurs les plus classiques (coût, qualité, délai).

L'objectif de cette partie est de proposer un modèle (démarche + formalisation des indicateurs) qui permet de sélectionner la meilleure implantation physique du SPM correspondant à une demande définie par une demande de client et un contexte de site de production. Le modèle que nous proposons est constitué de trois modules :

- un module de génération des configurations du SPM,
- un module d'évaluation,
- un module de choix et sélection de la meilleure configuration.

Nous proposons dans un premier lieu de faire une revue des travaux qui ont abordé la problématique de sélection de la configuration du système de production. Avant de détailler la démarche de conception du SPM que nous proposons.

#### **4.5.1 LA SELECTION DES IMPLANTATIONS DE SYSTEME DE PRODUCTION DANS LA LITTERATURE**

La problématique de sélection des implantations du système de production a été abordée dans la littérature selon plusieurs points de vue : *choix du type d'implantation physique, sélection des machines et gestion de la reconfiguration des implantations du système.*

Dans le cas du *choix du type d'implantation physique*, les ressources utilisées dans le système de production (machines, opérateurs, etc) sont supposées être définies à l'avance et il faut savoir quel sera le schéma d'organisation physique de ces ressources. Cette problématique liée essentiellement à la production de composants discrets est gérée d'un point de vue flux physique des produits et composants à l'intérieur de l'usine. Trois types de configurations sont souvent comparées (Abdul-Hamid et al., 1999) : configuration en série (lignes de transfert), implantation fonctionnelle (regroupement des machines assurant la même fonction, par exemple soudage, perçage, etc.) et implantation en cellule ou groupement technologique (regroupement des ressources pour produire une famille de produits.). Le tableau 4-14 ci-dessous présente une comparaison entre ces différents.

Tableau 4-14 comparaison des trois types d'implantation physique du système de production

Type d'implantation	Avantages	Inconvénients
<i>Ligne de transfert</i>	Utilisée en cas de production de masse Organisation facile des flux Faible volume des encours Temps de cycle réduit Faible coût de manutention de produits Faible Niveau requis de qualification	Faible niveau de flexibilité
<i>Implantation fonctionnelle</i>	Niveau de flexibilité important	Coût de manutention de produits considérable Exigence d'un niveau de qualification des opérateurs important Volume des en-cours important Temps de cycle important
<i>Groupement technologique</i>	Réduction des temps de configuration Niveau de flexibilité important Faible temps de cycle Réduction des coûts opérationnels et de stocks	
<i>Reconfigurable</i>	Grand rendement en cas d'aléas sur la ligne	

Pour le problème de sélection des machines lors de la conception du système de production, Ce problème est lié aux problèmes d'ordonnancement et d'allocation des tâches. Le problème de sélection de machines peut être lié à trois questions : équilibrage des lignes (Boysen et al., 2007; Salvesson, 1955), le choix du type de machines et l'analyse de la performance de la ligne (cadence) en tenant compte des paramètres des machines et allocations de buffers. ElMaraghy (1993) a proposé l'utilisation d'une gamme alternative (*Alternative process plan APP*) pour décrire toutes les machines optionnelles liées à une tâche. Un modèle de réseau de pétri a été utilisé par Kiritsis et porchet (1996) pour représenter un *APP*, toutes les gammes possibles peuvent être générées et les machines appropriées pour chaque tâche peuvent être identifiées.

En ce qui concerne la *reconfiguration des implantations du système*, ces travaux s'intéressent à la dynamique d'évolution de l'implantation du système pour s'adapter à un changement de volume et/ou de familles de produits. Dans une logique de re-conception du système, cette problématique concerne le choix d'une nouvelle implantation qui permettra de réagir aux changements tout en minimisant les coûts de reconfiguration. plusieurs travaux se sont intéressés à ce sujet (Deif and ElMaraghy, 2007; Koren, 2010; Xiaobo et al., 2000a, 2000b, 2001a, 2001b; Youssef and ElMaraghy, 2007).

Pour répondre à ces problématiques, les approches proposées dans la littérature peuvent être classées en plusieurs catégories : des modèles conceptuels, des modèles d'optimisation et des modèles d'aide à la décision.

Dans la gamme des modèles conceptuels, on peut citer la démarche MSDD proposée par Cochran et al. (2002) qui se base sur l'utilisation de la conception axiomatique. La démarche MSDD<sup>38</sup> propose de lier des objectifs de haut niveau à un niveau opérationnel de prise de décision via une démarche de décomposition fonctionnelle. Cette démarche est essentiellement utile pour la structuration de la conception du système avec des objectifs pré-spécifiés que pour la recherche d'une solution optimale (Youssef and ElMaraghy, 2007).

La formalisation mathématique du problème de sélection des configurations du système de production a été souvent adressée comme un problème d'optimisation. Plusieurs méthodes de résolution ont été proposées pour la génération de nouvelles configurations du système. Ces méthodes nécessitent l'existence d'une configuration initiale donnée (Tsfamariam and Lindberg, 2005; Youssef and ElMaraghy, 2007).

Pour les modèles d'aide à la décision basés sur une analyse multicritères, (Abdul-Hamid et al., 1999) proposent une démarche basée sur l'utilisation de la méthode AHP pour le choix entre trois types d'implantation physique du système de production (ligne de transfert, fonctionnelle, cellule). Cette démarche basée sur une analyse qualitative ne tient compte d'aucune vision interne du système de production ni de l'environnement de l'entreprise.

La sélection et l'évaluation des configurations du système de production fait appel à plusieurs critères d'évaluation. Tsfamariam et Lindberg (2005) identifient les critères de qualité, délai, dépendance, flexibilité et coût comme les objectifs importants pour l'évaluation des alternatives de configuration des systèmes de production. (Koren et al., 1999) a démontré que la configuration du système a un impact significatif sur six critères d'évaluation : coût d'investissement dans les machines et outils, qualité, productivité, extensibilité de la capacité, nombre de types de produits et temps de reconversion du système. (Spicer et Carlo 2006) ont développé une méthodologie pour concevoir des systèmes de production extensibles en essayant d'optimiser le coût du cycle de vie de la configuration incluant les coûts d'investissement, les coûts de fonctionnement et les coûts de reconfiguration. (Abdul-Hamid et al., 1999) considèrent trois objectifs pour justifier la sélection d'une implantation du système de production : maximiser la flexibilité, maximiser les volumes de production et réduire les coûts de fabrication.

En se basant sur l'analyse bibliographique plusieurs constats peuvent être adressés. Le premier constat qui émerge de cette analyse concerne le contexte d'analyse. ***Les travaux abordent une situation de re-conception d'un système existant dans l'objectif de l'adapter à de nouvelles exigences.*** Dans notre contexte, on se place dans une situation de conception originale où le système de production à concevoir ne se base pas sur un existant. De ce fait nous passons par une première étape de recherche de configurations capables qui pose la question des ressources à intégrer (sélection des machines, ressources humaines, fluides et énergie,...). Les

---

<sup>38</sup> Manufacturing System Design Decomposition

configurations doivent tenir compte des problèmes d'interfaces (intégrabilité des ressources), en tenant compte des ressources identifiées comme nécessaires et générer une configuration faisable du système de production.

Le deuxième constat concerne le système technique. La plupart des travaux analysés *décrivent un système de production comme un agencement de machines et de moyens de manutention*. Ils ne considèrent pas une vue holistique du système de production, ce qui est primordiale dans le contexte de mobilité. Dans notre cas, les ressources humaines sont une composante essentielle du système. Il en va de même avec les autres infrastructures comme les bâtiments.

Notre approche se base sur la démarche de conception et propose des indicateurs spécifiques au SPM. Nous ne nous concentrons pas sur les flux physiques, mais nous mettons au centre de notre analyse la notion d'opération fonctionnelle. Nous ne nous intéressons pas à l'optimisation, car notre premier objectif est de proposer une configuration faisable qui répond aux exigences du site de production.

Après cette revue de la littérature sur les problématiques de sélection de la configuration du système de production, le paragraphe suivant détaille notre démarche de conception de la configuration du SPM adaptée pour un site de production.

#### **4.5.2 DEMARCHE DE CONCEPTION DE LA CONFIGURATION DU SPM ADAPTEE POUR UN SITE DE PRODUCTION**

La démarche adoptée se base sur le processus de conception introduit dans le chapitre 2 (cf. § 2.3). Ce processus consiste en quatre phases, chacune d'elle comprend des activités de choix, évaluation et décision (cf. figure 4-29). La configuration du SPM est définie dans la phase de conception architecturale. C'est sur cette phase que notre attention va porter. Pour aboutir à cette phase, il est toutefois nécessaire d'aborder les phases d'initialisation et de conception préliminaire. Cependant, la phase de conception détaillée ne sera pas abordée dans ce manuscrit.

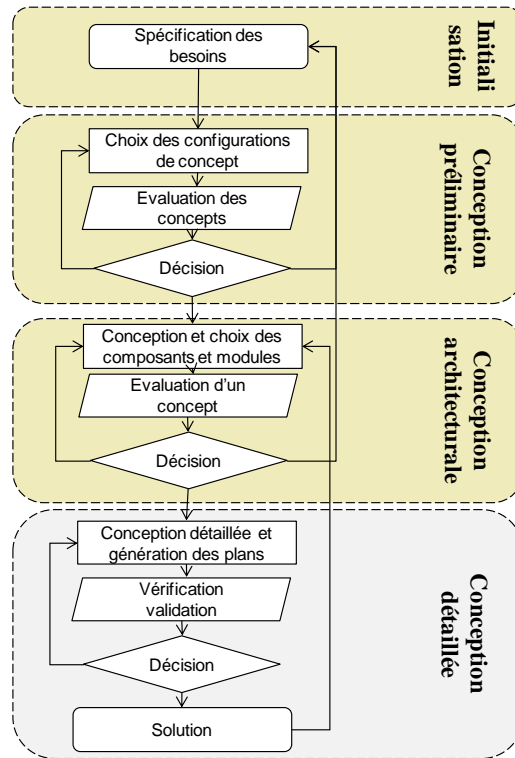


Figure 4-29 Le processus de conception adopté pour la conception de la configuration du SPM

Dans les sections qui suivent, on abordera les phases d'initialisation, de conception préliminaire et de conception architecturale.

#### 4.5.2.1 PHASE D'INITIALISATION

La phase d'initialisation permet de définir le problème de conception. Elle consiste à collecter les informations concernant les exigences que le système à concevoir doit satisfaire ainsi que les contraintes existantes et leur importance. Pour définir notre problème de conception, La figure 4-30 présente un schéma de principe de la démarche de conception de la configuration du SPM.

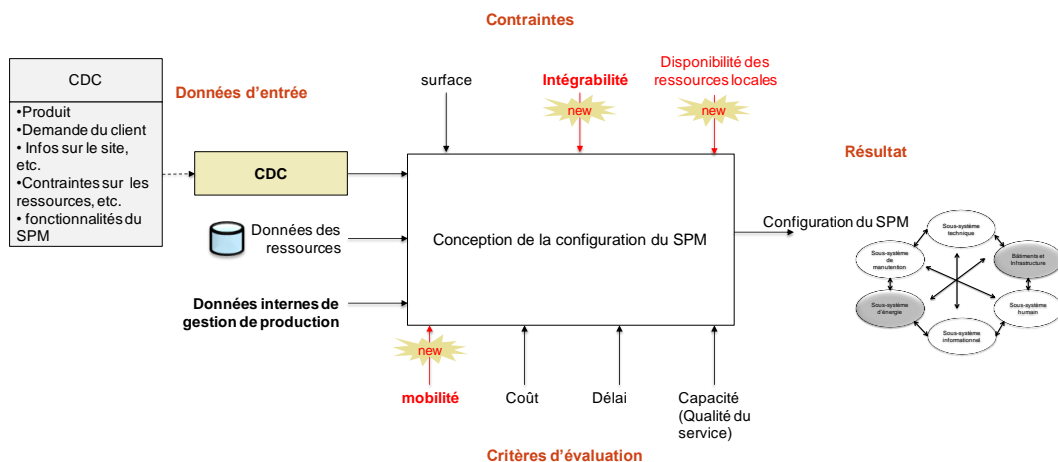


Figure 4-30 Schéma de principe du modèle de sélection de la configuration du SPM.



Les données d'entrée du modèle

La configuration du SPM est générée en tenant compte :

- le *cahier des charges* qui comprend la *définition du produit* et concerne l'ensemble des opérations nécessaires pour l'obtention du produit. Un *graphe de précedence* permet de définir les contraintes d'antériorités entre ces opérations. La description des opérations ne concernent que les opérations qui doivent être réalisées par l'entreprise en interne, suite à une analyse de "*faire ou faire faire*". La *demande du client* est exprimée en termes de volume de produit à fabriquer et le délai requis pour le faire. Les *caractéristiques du site de production* concernent les données impactant la définition de la configuration du SPM. Ces informations sont d'ordre économique (coût énergie, coût des études, coût assurance, etc.), liées à la disponibilité des ressources humaines et matérielles nécessaires sur site ainsi que la disposition de l'énergie nécessaire en quantité et nature.
- la *définition des ressources disponibles* est mise à la disposition du concepteur par une base de données contenant l'ensemble des ressources (machine, outils etc.) permettant la réalisation de chacune des opérations définies dans le plan de fabrication,
- *Les données de gestion de production* sont des informations internes à l'entreprise qui servent pour le dimensionnement de la configuration du SPM.

L'instanciation de ces données d'entrées constitue un *scénario de demande*. Un extrait des informations alimentant le modèle est donné ci-dessous (tableau 4-15).

Tableau 4-15 Extrait des informations nécessaires pour alimenter le modèle de configuration du SPM

Type	Information	Nature
<b>Demande</b>	<i>Volume</i>	Quantitative
	<i>Délai</i>	Quantitative
<b>Produits</b>	<i>Gamme de fabrication (définition des opérations à faire)</i>	-
	<i>Coût d'achat de l'énergie</i>	Quantitative
	<i>Coût petit outillage</i>	Quantitative
	<i>Coût étude</i>	Quantitative
	<i>Coût assurance</i>	Quantitative
<b>Site de production</b>	<i>Disponibilité des ressources humaines (pour chaque phase de l'utilisation du SPM)</i>	Qualitative
	<i>Disponibilité des ressources matérielles</i>	Qualitative
	<i>Disponibilité de l'énergie</i>	Qualitative
	<i>Temps ouverture journalier</i>	Quantitative
<b>Gestion de production</b>	<i>Fiabilité de la ligne</i>	Quantitative
	<i>Nombre managers expatriés</i>	Quantitative
	<i>Disponibilité de la compétence en interne</i>	Qualitative
	<i>Taux de maintenance annuelle (en coût)</i>	Quantitative

Les sorties du modèles

La structure d'une configuration du SPM est décrite en adoptant une vue holistique du système. Dans le chapitre 2, on a abouti à une description de la configuration du SPM qui se compose (cf. **figure** 2-13) : du sous-système technique (machines), du sous-système de manutention, du sous-système humain, du sous-système d'information, du sous-système d'énergie et de sous-système bâtiment et infrastructure. En plus de cette vue ressource du système, il est nécessaire de fournir des indicateurs sur les éléments de la vue fonctionnelle, organisation et informationnelle.

### Les contraintes

La génération des configurations du SPM doit respecter des contraintes. Ces contraintes sont liées d'un côté à la conception de la configuration et d'un autre côté aux caractéristiques du site de production :

- *l'intégrabilité de la configuration* permet de s'assurer de la faisabilité de la configuration du SPM en inspectant les contraintes d'interfaces entre les différents modules d'une configuration du SPM. Par la suite nous introduirons un indicateur permettant d'évaluer le degré d'intégrabilité d'une configuration.
- *les limitations de surface*. La configuration générée doit respecter les limitations de surface du site d'implantation. La longueur est en fonction du nombre de stations (phases) nécessaires dans le processus de fabrication car nous partons sur une hypothèse de fabrication en ligne. La largeur dépend du nombre maximal de lignes en parallèle.
- *la disponibilité de la qualification sur site* : le SPM s'appuie en partie sur la main d'œuvre recrutée localement sur le site de production. Il faut donc prendre en compte le niveau de qualification disponible sur le site;

### Les critères d'évaluations

La phase de sélection de la configuration du se base sur l'évaluation de plusieurs critères :

- *le critère de mobilité* évalue la mobilité de la configuration générée du SPM. La démarche d'évaluation de ce critère a été exposée dans la partie précédente.
- *le critère de coûts* évalue les coûts de revient de chaque configuration. Ce critère de coût tient compte des coûts d'investissements, coûts variables et coûts fixes pour chaque nouvelle commande.
- *le critère de délai* concerne principalement les délais de production pour une commande donnée.
- *le critère de qualité* est mesuré par le rendement du système en se basant sur le rendement de chaque module technique.
- *le critère de capacité* évalue le taux d'utilisation de la configuration du SPM ainsi que la cadence de production maximale.

Pour chaque nouveau site, la configuration initiale<sup>39</sup> peut ne plus être adaptée. Une re-conception (ou reconfiguration) s'impose. Formaliser cette démarche facilitera l'adaptation du SPM au changement du site dans la mesure où cette démarche de re-conception va être «instanciée» en tenant compte des caractéristiques du nouveau site de production à chaque changement de site. Ceci fera l'objet du chapitre suivant. Dans ce chapitre on se focalise sur la conception d'une configuration adaptée à *un* site de production.

#### 4.5.2.2 LA PHASE DE CONCEPTION PRELIMINAIRE DU SPM

La phase de conception préliminaire conduit à la définition de l'ensemble des ressources et procédés capables d'assurer les fonctionnalités du système de production. Pendant la phase de sélection des procédés capables, l'un des critères de choix utilisés est le critère de mobilité introduit dans le chapitre précédent (cf. § 3.5.2).

Cette phase consiste à choisir les concepts de procédés (par exemple, soudage, pliage, traitement de surface, etc.) à utiliser dans la configuration du SPM ainsi qu'une liste de ressources capables correspondant à ces procédés (choix technique des machines). Cette phase conduit à la génération d'une gamme de fabrication et d'assemblage avec un ensemble de ressources potentielles pour chaque phase de la gamme. La conception préliminaire se base notamment sur les connaissances métier du concepteur.

#### 4.5.2.3 LA PHASE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE DU SPM

La phase de conception architecturale a pour objectif de générer, évaluer et choisir une configuration du SPM qui est considérée comme la meilleure alternative possible pour un site de production donné. La démarche de choix de la configuration du SPM la mieux adaptée consiste en trois niveaux imbriqués (figure 4-31) :

- *génération des configurations du SPM,*
- *évaluation des configurations du SPM*
- *sélection de la configuration du SPM.*

Chacune de ces phases sera détaillée dans les sections qui suivent.

---

<sup>39</sup> Celle qui était adaptée au site précédent

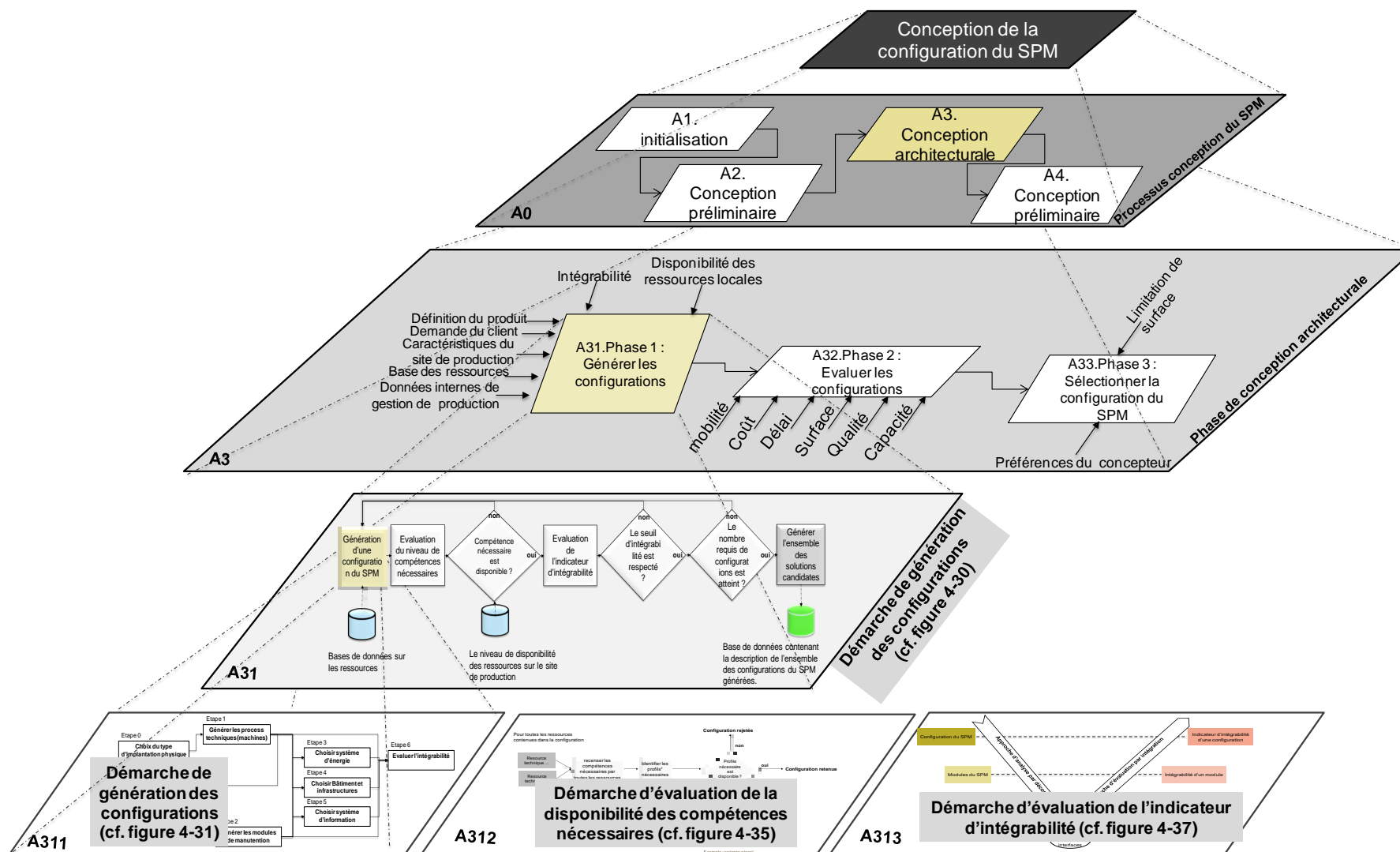


Figure 4-31 Représentation IDEF0 multi niveaux de la démarche de conception de la configuration du SPM



### PHASE 1 : LA GENERATION DES CONFIGURATIONS DU SPM

En se positionnant dans un contexte de conception originale où il n'existerait pas de version antérieure du système sur laquelle l'activité de conception pourrait s'appuyer, il est nécessaire de générer d'abord plusieurs configurations (alternatives de conception) du SPM. Une configuration du SPM est constituée de plusieurs modules (techniques, humains, etc.). La génération d'une configuration consiste alors en un choix (combinaison) de différents modules ainsi que leur arrangement physique.

Nous allons d'abord exposer la démarche de génération des configurations candidates du SPM qui seront sujettes à l'évaluation. Ensuite nous allons présenter l'indicateur d'intégrabilité permettant de s'assurer de la faisabilité d'une configuration du SPM.

Le concepteur peut envisager de générer au minimum un certain nombre de configurations qui seront évaluées par la suite. La

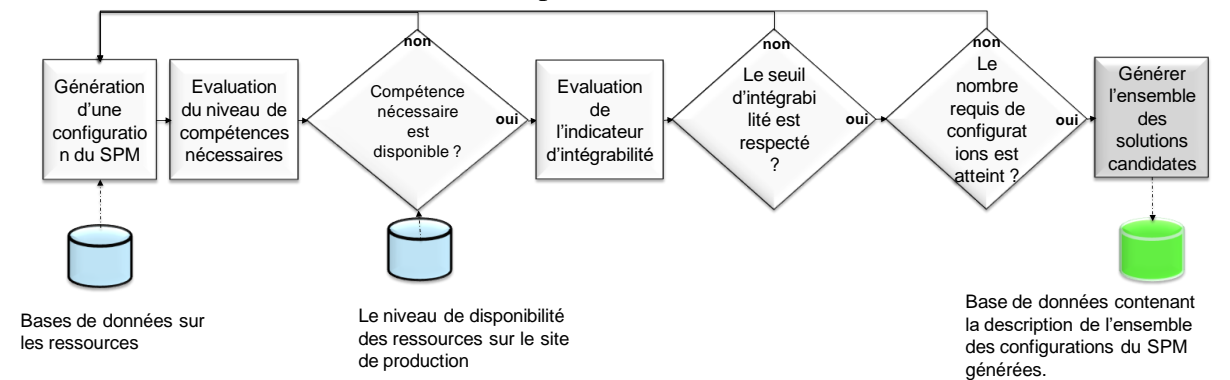


figure 4-32 expose la démarche de génération des configurations du SPM. La génération des configurations du SPM est conditionnée par deux conditions : la faisabilité de la configuration et le niveau de compétences nécessaires.

Lorsqu'une configuration du SPM est générée, une liste des compétences requises par cette configuration est éditée. L'ensemble des compétences nécessaires est alors comparé par rapport à celui disponible sur le site de production. Lorsque toutes les compétences requises sont disponibles (ou peuvent être trouvées) sur le site de production, la configuration est validée. Ensuite, Un indicateur d'intégrabilité est systématiquement incorporé dans la démarche de génération pour vérifier et valider l'intégrabilité de chaque configuration avant qu'elle soit considérée dans la phase d'évaluation. Une fois la configuration validée, elle est rajoutée à la liste des configurations faisables. Ce processus de génération des configurations est reconduit jusqu'à atteinte du seuil minimum de configurations fixé par le concepteur.

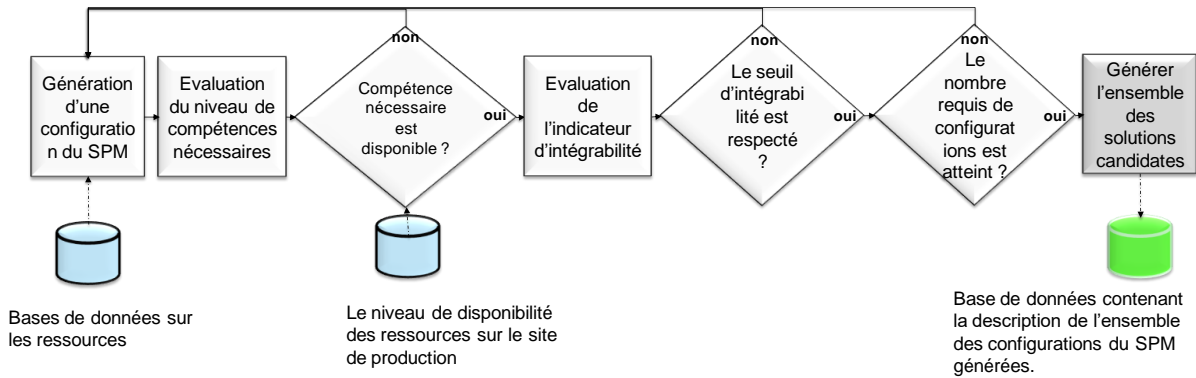


Figure 4-32 Niveau A31 de la démarche de génération des configurations du SPM

La configuration du SPM est caractérisée aussi par le type d'implantation physique à adopter. Quatre différentes implantations physiques ont été présentées précédemment dans le tableau 4-14. Dans notre démarche on s'est intéressé d'abord à l'implantation en série (ligne de transfert). Sur la base du choix du type de l'implantation physique, la phase de génération des configurations du SPM proprement dite peut commencer. La figure 4-33 représente les étapes de génération de la configuration du SPM.

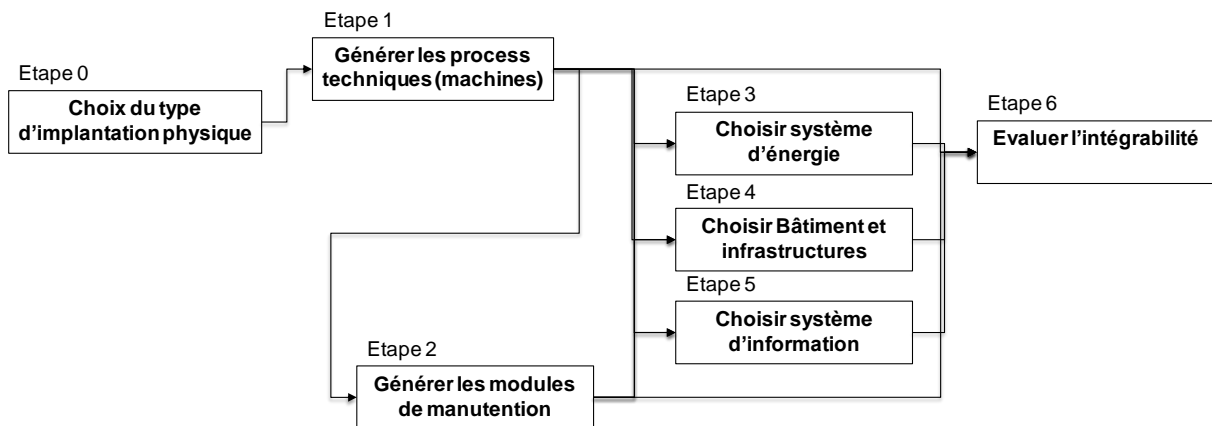


Figure 4-33 Niveau A311 de la démarche de génération d'une configuration du SPM

**La première étape concerne le choix des ressources techniques.** A chaque phase du processus correspond un groupement d'opérations. Pour réaliser ce groupement d'opérations, le concepteur dispose d'une ou plusieurs ressources capables de réaliser ces opérations. Une base de données contenant l'ensemble des descriptions et caractéristiques des ressources disponibles peut être mise en place. La figure 4-34 introduit un modèle conceptuel d'une telle base de données. Selon le modèle proposé, une ressource peut être décrite en considérant :

- *l'ensemble des aptitudes* : pour décrire une ressource technique, il faut définir un ou plusieurs ensembles d'aptitudes associés qui indiquent d'un côté la liste des opérations fonctionnelles offertes par cette ressource (par exemple: une perceuse verticale permet des opérations de perçage, d'alésage et de taraudage) et d'un autre côté ensemble des compétences et aptitudes requises pour l'opérateur qui va utiliser la machine, ainsi que le nombre d'opérateurs qui vont travailler sur la machine.
- *les attributs de performances* concernent les caractéristiques de la machine qui vont permettre d'évaluer les indicateurs économiques, le délai et la qualité liés à la machine.

- les *attributs liés à la mobilité* permettent d'évaluer la mobilité des ressources. Ces attributs ont été introduits précédemment (cf. § 3.5.3.1.1).
- les *interfaces externes* de la ressource technique sont considérées selon trois types : des interfaces pour l'alimentation en énergie, des connexions pour la transmission d'informations et des contraintes dimensionnelles pour l'accouplement physique avec d'autres ressources.

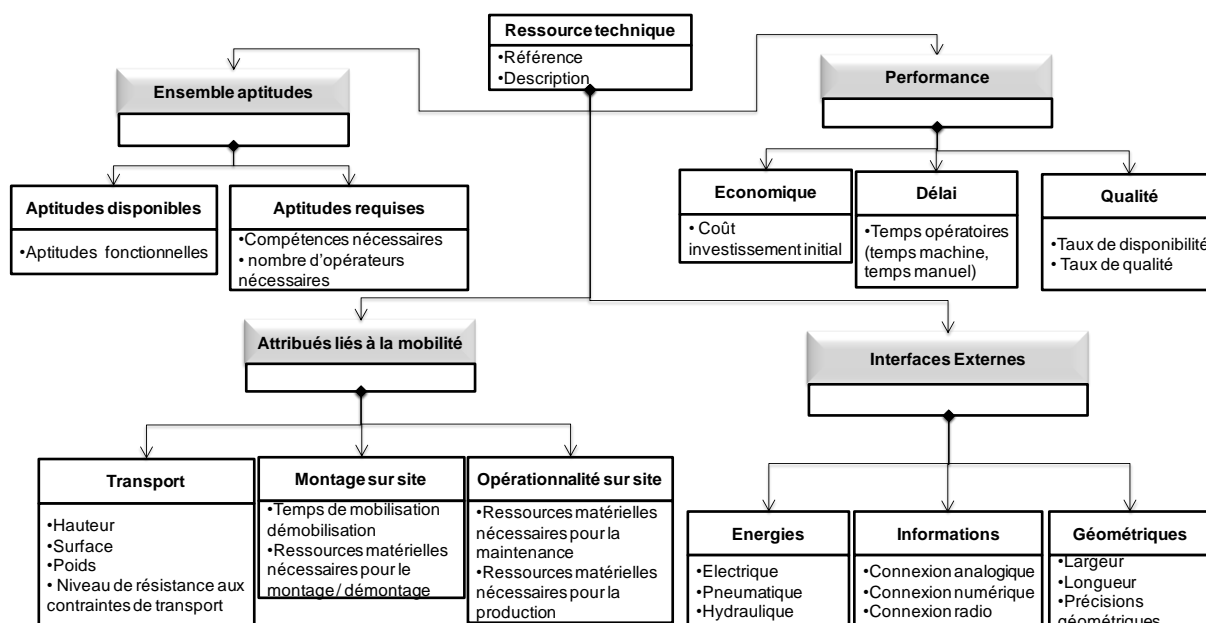


Figure 4-34 modèle conceptuel de la base des ressources techniques

Pour chaque phase, une ressource possédant les aptitudes nécessaires pour réaliser le groupement des opérations associées, est choisie. Ce choix est conduit dans un premier temps d'une manière aléatoire. Ainsi, Le système technique (l'ensemble des process) formant la base de la configuration du SPM est défini.

**La deuxième étape de la démarche de génération des configurations du SPM concerne le choix des modules du système de manutention.** Ces modules permettent de lier les ressources techniques entre elles. De la même manière, le concepteur dispose d'une base de données qui contient toutes les solutions de manutention envisageables. Dans un souci de simplification, on suppose que lorsqu'une solution de manutention est retenue (par exemple transfert par chariot roulant ou par rails), la même solution est dupliquée entre toutes les ressources techniques. La description des ressources du système de manutention suit pratiquement le même schéma que pour les ressources techniques (cf. figure 4-35), à la différence des attributs *d'aptitudes disponibles* et *l'attribut des délais*. Pour chaque configuration un module de manutention est tiré aléatoirement et est dupliquée ( $n-1$ ) fois,  $n$  étant le nombre de postes dans la configuration du SPM.



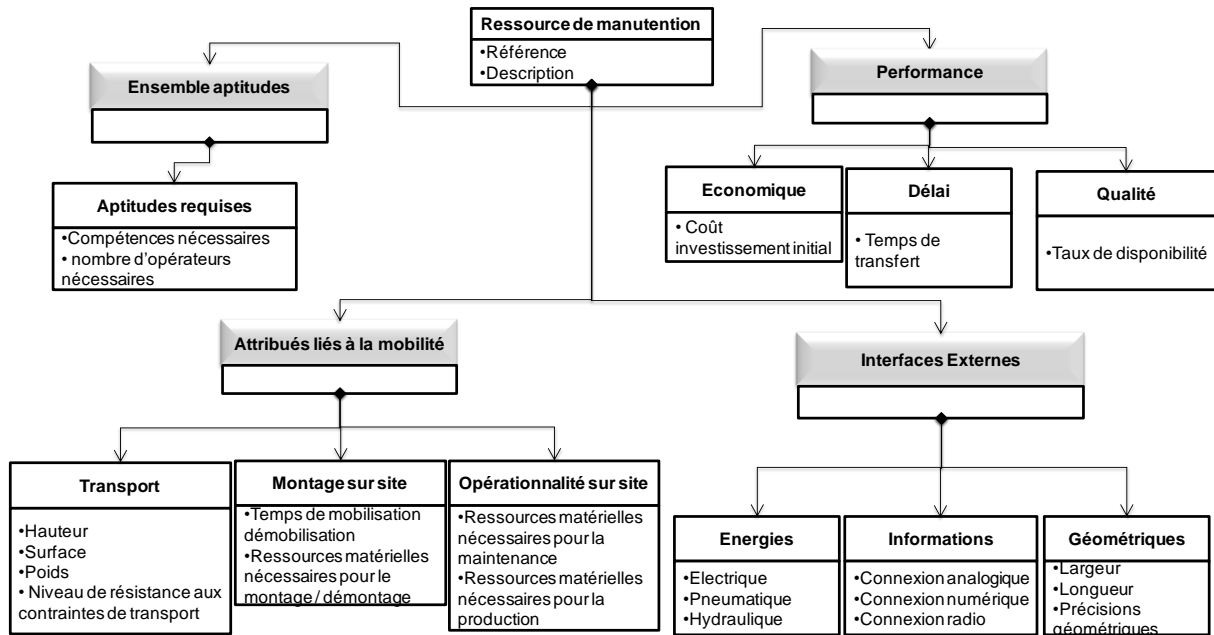


Figure 4-35 modèle conceptuel de la base des ressources de manutention

Les étapes 3,4 et 5 de la démarche de génération des configurations du SPM (cf. figure 4-33) concernent le choix des modules du système d'approvisionnement en énergie, système d'information et les composants formant la structure des bâtiments. De la même façon, les modules envisageables pour chaque sous-système sont décrits dans des bases de données dont les modèles conceptuels sont donnés en annexe 3 (cf. § 11.2.1). Pour chaque configuration du SPM, un type de module pour chaque système est choisi.

Pour compléter la description d'une configuration du SPM, il est impératif de tenir compte de la constitution du système humain. L'attribut *Aptitudes requises* intégré dans la description de chaque module du SPM exprime le besoin en ressources humaines pour ce module. Le système humain est généré à partir du besoin en compétences exprimé par tous les modules de la configuration du SPM.

Le besoin en ressources humaines pour une configuration du SPM doit être confronté aux ressources disponibles sur le site de production. La comparaison des ressources nécessaires et celles disponibles sur le site de production est l'objectif de la section suivante.

- **Prise en compte de la disponibilité des compétences nécessaires sur le site de production**

Cette question fait l'objet de la deuxième étape du niveau A31 (cf. figure 4-31)/

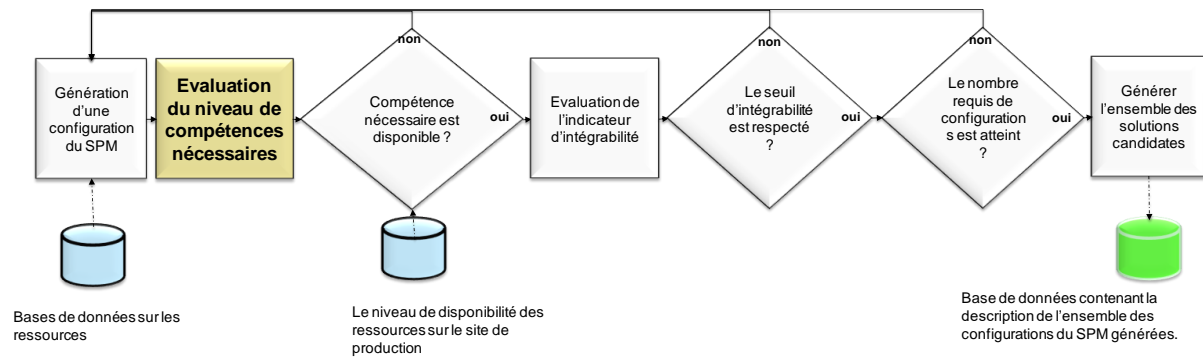


Figure 4-36 Positionnement de l'évaluation du niveau de compétences nécessaires dans l'approche globale

La notion de compétence a été principalement liée aux notions de savoir et de savoir-faire en explicitant la relation entre la compétence et l'action (Mkaouar Hachicha, 2012). En sciences de gestion, Lorino 2001 appuie ce lien entre compétence et action. L'auteur considère qu'une compétence "est l'aptitude à mobiliser, combiner et coordonner des ressources dans le cadre d'un processus d'action déterminé, pour atteindre un résultat suffisamment prédéfini pour être reconnu et évaluable.". En génie industriel, Vernadat (1999) décrit la notion de **compétence** comme "la mise en œuvre intégrée d'aptitudes, de traits de personnalité et aussi de savoir, pour mener à bien une mission". La compétence se présente comme la mise en œuvre combinée de savoirs, savoir-faire et savoir être (Vernadat, 1999).

Notre objectif n'est pas de comparer le niveau de compatibilité entre une compétence requise et une compétence acquise par un acteur. Cette question relève par exemple d'un problème d'affectation de ressources (Mkaouar Hachicha, 2012). Notre objectif est de lier la notion de besoin en compétence par rapport à sa disponibilité dans une localisation géographique donnée dans le but d'évaluer l'impact de sa disponibilité sur certaines mesures de performance du système de production telles que la mobilité du système ou des décisions de choix de la configuration.

On distingue la notion de compétences comme étant un savoir ou connaissance distincte et le profil d'acteur qui lui renseigne sur l'ensemble des compétences acquise par un acteur. (Ulich et al., 1990) identifient plusieurs compétences requises pour accomplir les opérations dans un système de production. Les compétences considérées sont : *opération & contrôle, chargement & surveillance, réglage, maintenance, montage et révision de machines, programmation de machines*, qui peuvent être des compétences d'acteurs *local*. A ces compétences on propose de prendre en compte aussi les compétences de *management des équipes* et *management de site*.

En addition des compétences requises, on identifie des profils d'acteurs du système : *opérateur local, opérateur local qualifié, opérateur certifié, manager intermédiaire et manger de site*. A chaque profil on associe (tableau 4-16) un certain nombre de compétences parmi celles citées ci-dessus. On utilise une échelle binaire 0 ou 1 pour évaluer si un profil d'acteur possède ou non une compétence requise.

Tableau 4-16 correspondance entre les compétences requise et les profils d'acteurs dans le système humain

Profil\compéte nce	Opération & contrôle	Chargement & surveillance	Réglage	Maintenance	Montage et révision	Programmation	Management des équipes	Management de site
<b>Opérateur local</b>	1	1	0	0	0	0	0	0
<b>Opérateur local qualifié</b>	1	1	1	1	0	0	0	0
<b>Opérateur Certifié</b>	1	1	1	1	1	1	0	0
<b>Manager intermédiaire</b>	1	1	1	1	1	1	1	0
<b>Manager de site</b>	1	1	1	1	1	1	1	1

Au lieu d'évaluer des compétences isolées et nombreuses, on évalue des profils d'acteurs possédant plusieurs compétences. La vérification de la disponibilité de profils d'acteurs est ainsi plus facile que la vérification de compétences très nombreuses. La phase d'évaluation de la disponibilité des compétences est décomposée en trois activités (figure 4-37) : recensement des compétences nécessaires, identification des profils d'acteurs correspondant et évaluation de la disponibilité des profils sur site.

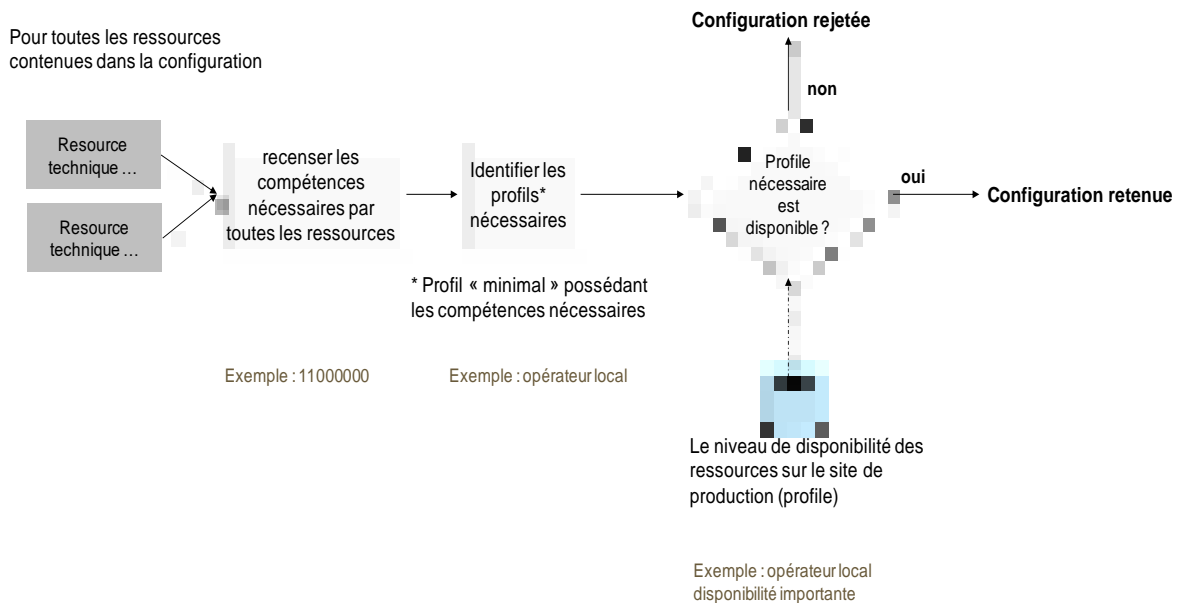


Figure 4-37 Niveau A312 démarche d'évaluation de la disponibilité des compétences sur le site de production

Recensement des compétences nécessaires

Pour une configuration donnée du SPM, la phase d'évaluation de la disponibilité des compétences part du recensement des compétences requises dans cette configuration. Ainsi pour chaque entité de la configuration on identifie les compétences requises en s'appuyant sur

l'attribut "*aptitudes requises*" contenu dans la description de chaque ressource (cf. figure 4-34 et figure 4-35). L'attribut "*aptitudes requises*" est décrit en utilisant la même liste des compétences décrite dans le tableau 4-16. Par exemple une ressource technique (M1) semi-automatique nécessitant uniquement des opérations de chargement et de surveillance est attribuée d'une description de compétence requise: *11000000*

#### Identification des profils d'acteurs correspondant

La compétence requise par chaque ressource technique est traduite vis à vis du profil d'acteur nécessaire. Cette conversion est conduite en utilisant la description des compétences acquises par les profils décrite dans le tableau 4-16. Ainsi on procède à une comparaison entre les compétences requises par la ressource et les compétences acquises par les profils d'acteurs. Cette comparaison est réalisé dans un sens de spécialisation croissante, i.e. on compare d'abord par rapport au profil d'*opérateur local*, ensuite *opérateur local qualifié* jusqu'au dernier profil le plus spécialisé (*manager de site* dans notre cas). Le premier profil possédant au moins toutes les compétences requises est alors retenu. Ainsi, le besoin en compétence pour ressource du SPM est exprimé en terme de profil d'acteur.

Dans notre cas le besoin de "numérisation" des compétences en utilisant une échelle binaire est justifié par ce besoin de comparaison. En utilisant un code numérique la comparaison peut être facilement automatisée.

Par exemple le besoin en ressource humaine pour la ressource technique (M1) est traduit par *opérateur local* (au lieu d'une compétence *11000000*, comme à l'étape précédente).

#### Evaluation de la disponibilité de la compétence sur site

Après l'analyse des besoins en compétences de toutes les ressources de la configuration du SPM, une liste de tous les profils nécessaires est éditée.

Sur un autre niveau, dans l'analyse de l'environnement du site production on conduit une analyse de la disponibilité des profils. La disponibilité de chaque profil est évaluée en utilisant une échelle sémantique à cinq niveaux. Cette échelle a été introduite dans le cadre de l'évaluation de la mobilité du système (cf. tableau 3-13).

Soit  $m$  le nombre total de profil d'acteurs nécessaires dans une configuration du SPM, pour chaque profil  $i$  on note  $mq_i$  le niveau de disponibilité du profil  $i$ , la valeur de  $mq_i$  est donnée en utilisant la grille (tableau 3-13). Soit  $cvdq$  le critère de validation de la disponibilité de la qualification nécessaire pour une configuration du SPM, la valeur de  $cvdq$  est donnée par la formule (45).

$$cvdq = \min(mq_i)_{1 \leq i \leq m} \quad (45)$$

Enfin pour savoir si la configuration du SPM est adaptée à un site de production ou pas, d'un point de vue disponibilités de la qualification nécessaire, elle doit satisfaire à la condition (46).

$$\begin{cases} \text{si } cvdq > 0 \text{ alors la configuration du SPM est retenue} \\ \text{sinon, la configuration du SPM n'est pas retenue} \end{cases} \quad (46)$$

Le critère  $cvdq$  traduit uniquement si toutes les compétences nécessaires sont disponibles en type. Il ne tient pas compte de la quantité disponible ni du niveau de disponibilité (i.e. est-ce que la compétence est facilement disponible sur site ou non). Pour valider une configuration du SPM on s'assure uniquement de la disponibilité de la qualification requise les autres critères de quantité et de niveau de disponibilité auront un impact sur des mesures de performances telles que les coûts ou la mobilité par exemple et ils seront appréciés dans la phase dévaluation (Phase 2).

Si une configuration du SPM est retenue après vérification de la disponibilité de la qualification requise, il est nécessaire de valider sa faisabilité en évaluant l'indicateur d'intégrabilité de la configuration.

#### ▪ Prise en compte de l'intégrabilité de la configuration du SPM

La génération d'une configuration du SPM consiste en l'intégration de différents modules indépendants (machines, opérateurs, convoyeurs, etc.). Afin qu'une configuration soit *faisable*, il est nécessaire de s'assurer que les modules choisis puissent s'intégrer les uns avec les autres. Chaque module possède une ou plusieurs interfaces permettant de le lier à un autre module. Une connexion entre deux interfaces permet de définir un nœud (Figure 4-38). Le but de ce paragraphe est de proposer un indicateur pour mesurer l'intégrabilité d'une configuration du SPM en s'intéressant à l'adaptabilité des interfaces de chacun des modules entre elles.

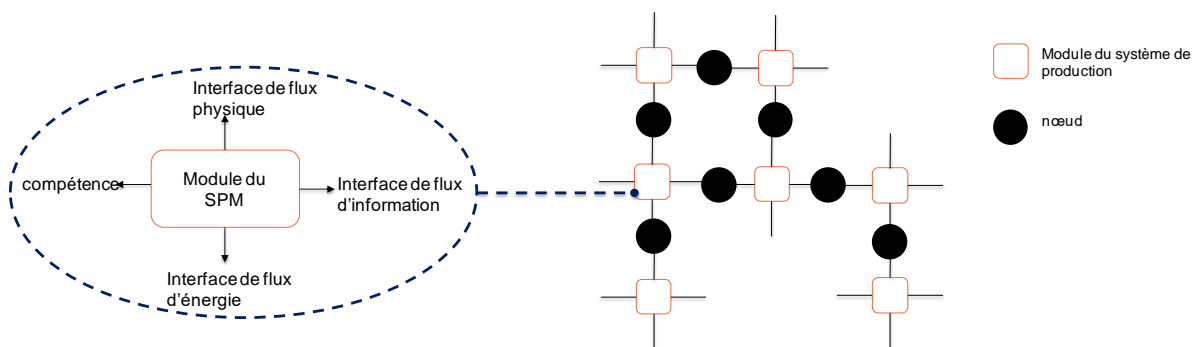


Figure 4-38 La configuration du SPM est définie à partir d'une connexion de plusieurs modules, chaque connexion définit un nœud

La structure de la démarche qu'on propose pour évaluer l'intégrabilité d'une configuration du SPM comporte deux branches (figure 4-39):

- une branche descendante d'analyse du système par décomposition. L'intégrabilité de la configuration du SPM nécessite une adéquation entre les différents modules du SPM. L'analyse de l'intégrabilité des modules se passe au niveau de leurs interfaces.
- une branche remontante d'intégration pour l'évaluation du niveau d'adéquation de la configuration. On se base sur la définition et l'évaluation de tous les nœuds de l'architecture du système. Les différentes mesures relevées vont être agrégées pour donner une mesure unique de l'intégrabilité de la configuration du SPM.

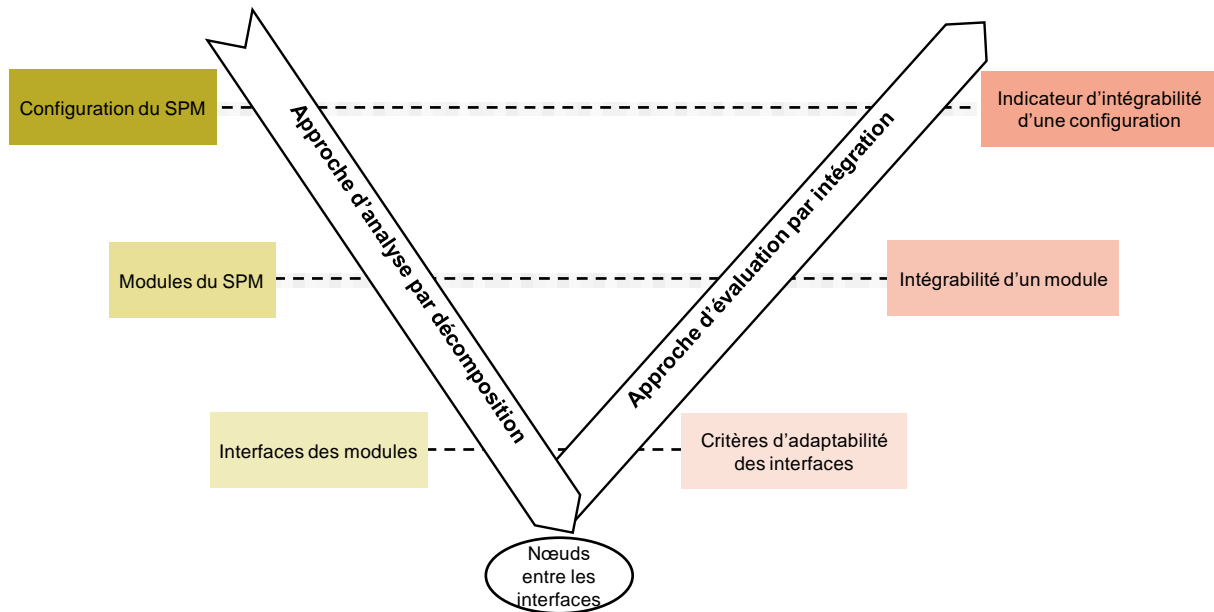


Figure 4-39 A313 : Démarche d'obtention de l'indicateur d'intégrabilité d'une configuration du SPM

A chaque nœud on peut associer un critère mesurant son **adaptabilité** ( $c_{\text{adaptabilité}}: (x,y) \rightarrow [0,1]$ ) afin d'apprécier la qualité de l'interface entre  $x$  et  $y$ . Le niveau d'adéquation de chaque module du SPM peut être évalué grâce à la vérification de l'adaptabilité de ses  $z$  interfaces avec ses "voisins" directs dans la configuration :  $I_{\text{module}} = f_1(c_{\text{adaptabilité } 1}, \dots, c_{\text{adaptabilité } z})$ . Enfin, L'indicateur d'intégrabilité de la configuration du système de production sera donc défini en fonction de l'ensemble des  $n$  modules définis dans la configuration du système de production:  $I_{\text{configuration}} = f_2(I_{\text{module } 1}, \dots, I_{\text{module } n})$ .

Dans ce qui suit nous allons d'abord définir les interfaces des différents types de modules utilisés dans la définition d'une configuration du système de production. Ensuite nous allons présenter la démarche pour construire le critère d'adaptabilité ( $c_{\text{adaptabilité}}$ ) des différents nœuds de l'architecture du système. Puis, nous allons définir les fonctions d'agrégation pour évaluer l'indicateur d'intégrabilité d'un module (la fonction  $f_1$ ) et l'indicateur d'intégrabilité d'une configuration du système (la fonction  $f_2$ )

#### ▪ **Modules et interfaces d'une configuration du SPM**

Une configuration du SPM est définie comme une composition de six sous-systèmes, comme il l'a été mentionné précédemment dans la figure 2-13. Chacun de ces sous-systèmes du SPM peut être décomposé en plusieurs modules. On évoquera ainsi le :

- *module technique* : une entité du sous-système technique (process). Il sera noté  $Mt$ ,
- *module de maintenance*: une entité du sous-système de maintenance. Il sera noté  $Mm$ ,
- *module bâtiment et infrastructure*: une entité du sous-système bâtiment et infrastructure. Il sera noté  $Mb$ ,
- *module d'énergie*: une entité du sous-système énergie. Il sera noté  $Me$ ,
- *module du système humain*: une entité du sous-système humain. Il sera noté  $Mh$ ,

- *module d'information*: une entité du sous-système d'information. Il sera noté *Mi*.

La modélisation des interfaces entre les modules formant la configuration du système mobile de production, est réalisée en s'intéressant aux flux qui transitent à travers ces interfaces. Ces flux sont regroupés initialement selon 3 familles en s'inspirant de la méthode FSM<sup>40</sup> (Pahl et al., 2007) : flux d'énergie, flux d'information et flux matériel (physique). En plus de ces trois types, on considère la compétence comme définissant l'interface entre le sous-système humain et les autres sous-systèmes. Ainsi, en se basant sur l'analyse des types de flux échangés via les interfaces des modules, on définit quatre types d'interfaces (figure 4-38) :

- ✓ *l'interface physique* définit les contraintes dimensionnelles, de précisions et matérielles qui doivent être respectés pour que 2 interfaces puissent s'adapter.
- ✓ *l'interface d'information* définit le type d'information ainsi que le moyen de transmission de ces informations (port,...) dans les interfaces.
- ✓ *l'interface d'énergie* définit la nature de l'énergie dans les interfaces en distinguant l'énergie nécessaire et énergie disponible selon le type de module
- ✓ *l'interface de compétence* définit la compétence requise dans les interfaces entre deux modules du système de production.

Cependant, selon le type de module du SPM l'utilisation des quatre interfaces n'est pas indispensable. On utilise une analyse des modules deux à deux pour définir le type d'interfaces nécessaires (tableau 4-17).

Tableau 4-17 Détermination de la nature des interfaces entre les différents modules du SPM

	<b>Mm</b>	<b>Mb</b>	<b>Me</b>	<b>Mi</b>	<b>Mh</b>
<b>Mt</b>	NP	NP	NE	NI	NC
<b>Mm</b>		NP	NE	NI	NC
<b>Mb</b>			NP	NP	NC
<b>Me</b>				NI,NE	NC
<b>Mi</b>					NC,NI*

NP : nœud physique

NI : nœud d'information

NE : nœud d'énergie

NC : nœud de compétence

NI\* : pour tenir compte des interfaces Hommes machines

Grâce à cette analyse, on peut déterminer le besoin en interfaces pour chaque type de module. On distingue pour certains types d'interfaces une "orientation" des flux selon le type de module : par exemple la compétence est requise par un module technique (flux entrant) et elle est fournie par un module humain (flux sortant).

<sup>40</sup> Function Structure Modeling Technique

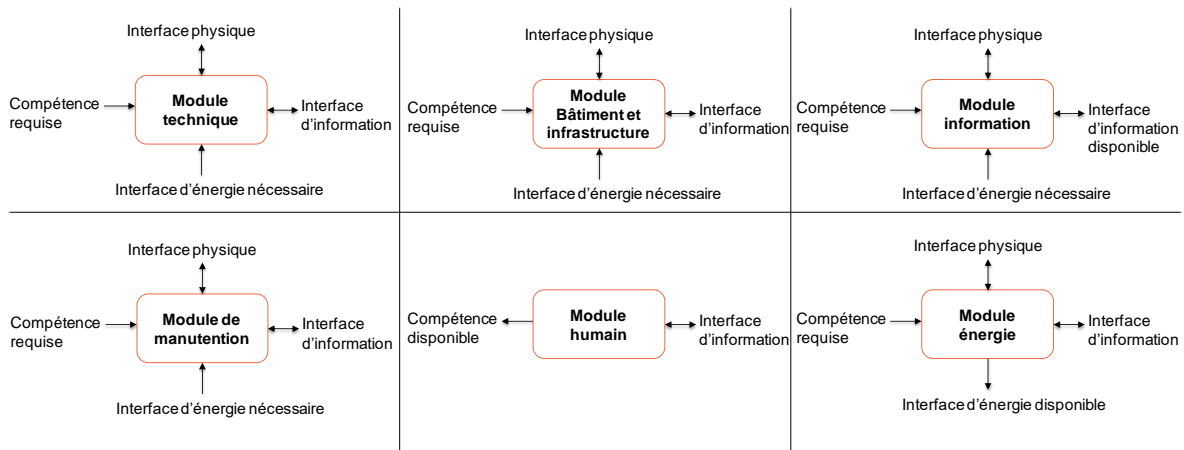


Figure 4-40 Les différentes interfaces nécessaires selon le type du module du SPM

Après avoir défini les différents types de nœuds considérés dans une configuration du SPM, nous allons introduire le critère d'adaptabilité d'un nœud.

#### ▪ Construction du critère d'adaptabilité des nœuds d'une configuration du SPM

Le critère d'adaptabilité des nœuds est une mesure adimensionnée, binaire, qui a pour objectif d'apprécier le niveau d'adaptabilité d'un nœud entre deux modules d'une configuration du SPM. Nous avons introduits quatre types de nœuds : physique, d'information, de compétence et d'énergie. Si un nœud est totalement adapté, le critère d'adaptabilité la valeur de 1. Si au contraire le nœud n'est pas adapté, cela signifie que les interfaces des deux modules ne peuvent être associées alors le critère d'adaptabilité correspondant aura une valeur de 0.

Pour analyser le critère d'adaptabilité, nous dissocions selon le type d'interfaces.

#### ▪ Critère d'adaptabilité de l'interface physique

Une interface physique est définie par les dimensions géométriques des liaisons physiques entre deux modules du SPM. Une interface physique est définie par une largeur et une hauteur de l'interface. Le critère d'adaptabilité de l'interface physique entre deux modules  $i$  et  $j$  est noté  $ca_{ip(i,j)}$  et est donné par la formule (9).

$$ca_{ip(i,j)} = \min(ca_{ipl(i,j)} ; ca_{iph(i,j)}) \quad (47)$$

Où  $ca_{ipl(i,j)}$ ,  $ca_{iph(i,j)}$  définissent respectivement les critères d'adaptabilité de la largeur et la hauteur de l'interface physique entre deux modules  $i$  et  $j$  du SPM.

#### ▪ Critère d'adaptabilité de la largeur d'une interface physique

Une largeur est définie par  $l^{\pm x}$  avec  $l$  la largeur nominale  $x$  la tolérance permise sur la largeur  $l$ . En considérant un nœud entre deux interfaces  $i$  et  $j$ , le critère d'adaptabilité de la largeur d'une interface physique ( $ca_{ipl(i,j)}$ ) est défini comme suit :

Pour une interface  $k$  donnée on note :

$a_k = l_k - x_k$  avec  $l_k$  largeur de l'interface  $k$ , et  $x_k$  tolérance sur la largeur de l'interface  $k$



$$b_k = l_k$$

$$c_k = l_k + x_k$$

Ainsi  $ca_{ipl(i,j)}$  entre une interface  $i$  et  $j$  est donné par la relation suivante (48) :

$$ca_{ipl(i,j)} = \begin{cases} 0 & \text{si } a_i < c_j \text{ ou } c_j < a_i \\ \frac{\min(a_i * b_i; a_j * b_j)}{\max(a_i * b_i; a_j * b_j)} & \text{si } b_i = b_j \\ \frac{\alpha - a_i}{b_i - a_i} & \text{avec } \alpha = \left[ a_i - c_j \left( \frac{b_i - a_i}{b_j - a_j} \right) \right] \left[ \frac{b_j - c_j}{b_j - c_j + a_i - b_i} \right] \text{ si } a_j < a_i \leq b_j < b_i \leq c_j < c_i \end{cases} \quad (48)$$

- Critère d'adaptabilité de la hauteur d'une interface physique

Le critère d'adaptabilité  $ca_{iph(i,j)}$  est défini de la même façon que le critère de largeur  $ca_{ipl(i,j)}$  (en remplaçant la largeur par la hauteur).

- Critère d'adaptabilité de l'interface d'énergie

Le flux dans une interface d'énergie peut être caractérisé par deux attributs : la nature de l'énergie qui transite par l'interface ainsi que la quantité d'énergie nécessaire. Le flux d'énergie est défini par un vecteur (*vse*) regroupant les différentes sources (type) d'énergie ainsi que les quantités nécessaires et disponibles :

$$vse = \begin{bmatrix} \text{électrique} \\ \text{pneumatique} \\ \text{hydraulique} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{ele} \\ q_{pne} \\ q_{hyd} \end{bmatrix} \text{ avec } q_i \text{ la quantité de l'énergie de types } i.$$

Par exemple: un système d'énergie donné permet de fournir deux types d'énergie électrique et pneumatique mais l'énergie hydraulique est indisponible alors le vecteur correspondant aura la valeur :

$$vse = \begin{bmatrix} 380 \text{ V} \\ 6 \text{ bars} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dans un nœud entre deux interfaces d'énergie, une des interfaces requiert de l'énergie et l'autre interface en fournit. On définit alors deux vecteurs : le vecteur source d'énergie nécessaires sera noté  $vse_{necessaire}$  et le vecteur  $vse_{disponible}$  avec :

$$vse_{necessaire} = \begin{bmatrix} qn_{ele} \\ qn_{pne} \\ qn_{hyd} \end{bmatrix} \text{ et } vse_{disponible} = \begin{bmatrix} qd_{ele} \\ qd_{pne} \\ qd_{hyd} \end{bmatrix}$$

Remarque: On prend en compte une certaine tolérance sur les valeurs nécessaire et disponible des quantités d'énergie. Si par exemple une machine pneumatique requiert une pression nominale de fonctionnement ( $qn$ ) de 6 bars, elle pourrait avoir un fonctionnement proche du nominal avec quantité d'énergie nécessaire minimale ( $qn_{min}$ ) de 5.8 bars. De même, pour une source d'énergie qui fournit 6 bars en fonctionnement nominal ( $qd$ ), il est possible de fonctionner jusqu'à une quantité disponible maximale ( $qd_{max}$ ) de 6.5 bars.

On a définit ainsi 2 grandeurs nominales ( $qn$  et  $qd$ ) et 2 grandeurs extrêmes ( $qn_{min}$  et  $qd_{max}$ ).

Pour simplifier on considère (49) :

$$qd_{max}=1.1 * qd \text{ (augmentation autorisée de 10\%)} \quad (49)$$

et  $qn_{min}=0.9 * qn$  (réduction autorisée de -10%)

En notant  $ca_{ie(i,j)}$  le critère d'adaptabilité d'un nœud d'énergie entre deux modules  $i$  et  $j$  d'une configuration du SPM. Enfin on définit un vecteur  $ca_{ien}$  qui vérifie l'adaptation entre la quantité nécessaire et disponible pour chaque source d'énergie. Pour chaque composante de  $ca_{ien}$  notée  $ca_{ien}(k)$  avec:  $k \in \llbracket 1, n \rrbracket$   $n$  étant le nombre totale de type d'énergie,

$$ca_{ien}(k) = \begin{cases} 1 & \text{si } qn < qd \\ 0 & \text{si } qn_{min} > qd_{max} \\ \frac{\alpha - qn_{min}}{qn - qn_{min}} & \text{avec } \alpha = \left[ qn_{min} - qd_{max} \left( \frac{qn - qn_{min}}{qd - qd_{max}} \right) \right] * \left[ \frac{qd - qd_{max}}{qd - qd_{max} + qn - qn_{min}} \right] \\ & \text{si } qn_{min} < qd \leq qn \leq qd_{max} \end{cases} \quad (50)$$

En se basant sur ces définitions, le critère d'adaptabilité de l'interface d'énergie entre deux modules  $i$  et  $j$  peut être défini comme suit (51) :

$$ca_{ie}(i, j) = \min(ca_{ie}(1), \dots, ca_{ip}(k)) \quad (51)$$

$k \in \llbracket 1, n \rrbracket$   $n$  étant le nombre totale des types d'énergie (électrique, pneumatique, etc.)

#### ▪ Critère d'adaptabilité de l'interface de compétence

L'interface de compétence modélise les contraintes de qualification exigées pour le fonctionnement d'un module donné. Le système de ressource humain est défini par un ensemble de profils. Chaque profil ayant une ou plusieurs compétences. Dans un nœud de compétence, un module du système de production demandant un certain nombre de compétences, est modélisé par un vecteur de compétences nécessaires, noté  $vcn = (vcn(k))_{1 \leq k \leq m}$  qui définit l'ensemble des compétences nécessaires. De même,  $vcd = (vcd(k))_{1 \leq k \leq m}$  définit l'ensemble des compétences fournies par un module du système humain,  $m$  étant le nombre de compétences nécessaires.

Pour chaque compétence  $k$  du vecteur des compétences nécessaires (disponibles),  $vcn(k)$  ( $vcd(k)$ ) prendra la valeur 1 si elle est nécessaire (disponible) ou 0 sinon.

$$vcn = \begin{bmatrix} \text{Opération \& contrôle} \\ \text{Chargement \& surveillance de machines} \\ \text{Réglage} \\ \text{maintenance} \\ \text{Montage et révision} \\ \text{Programmation} \\ \text{Mangement des équipes} \\ \text{Management du site} \end{bmatrix}$$

Pour chaque type de compétence, Le critère d'adaptabilité à l'interface de compétence entre deux modules  $i$  et  $j$  dans un nœud noté  $ca_{ic(i,j)}$  est défini par (52):

$$ca_{ic(i,j)} = \min(ca_{icn}(1), \dots, ca_{icn}(k))$$

$k \in \llbracket 1, m \rrbracket$   $m$  étant le nombre totale de type de compétence. (52)

Le vecteur  $ca_{icn(i,j)}$  permet de vérifier la compatibilité de chaque compétence, en vérifiant si dans un nœud, la compétence requise par un module peut être fournie par l'autre module.

$$ca_{icn(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{si } vcn(k) \geq vcd(k) \text{ pour chaque } k \in \llbracket 1, m \rrbracket \text{ } m \text{ étant le nombre totale de compétences} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (53)$$

Le critère d'adaptabilité de l'interface de compétence apporte une appréciation complémentaire par rapport à la vérification de disponibilité de la compétence sur le site de production (cf. §□). A ce stade d'analyse, on s'intéresse au niveau d'adéquation de la compétence disponible par rapport à celle requise dans la configuration du SPM.

#### ▪ Critère d'adaptabilité de l'interface d'information

Pour qualifier l'interface d'information entre deux modules d'une configuration du SPM, on s'intéresse au type de connexions utilisées pour échanger les informations.

Sur la base du même modèle utilisé pour l'interface d'énergie ou de compétence, le type d'interface d'information est défini par un vecteur regroupant les différentes interfaces

d'informations :  $v_{ii} = \begin{bmatrix} \text{analogique} \\ \text{numérique} \\ \text{radio} \\ \dots \end{bmatrix}$  ainsi si le type d'interface d'information est disponible il prendra la valeur 1, sinon 0.

Par exemple, sur un système centrale d'information, il existe deux types d'interfaces : analogique et numérique mais la connexion radio est indisponible alors le vecteur correspondant aura la valeur:

$$v_{ii} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dans un nœud entre deux interfaces d'information, une interface requiert de l'information et l'autre interface fournit cette information. On définit alors deux vecteurs:

$v_{ii_{necessaire}}$  pour l'interface qui requiert de l'information et  $v_{ii_{disponible}}$  pour l'autre qui en fournit.

Ainsi

$$ca_{iin(i,j)} = \begin{cases} 1 & \text{si } vii_{necessaire}(k) \geq vii_{disponible}(k) \text{ pour chaque } k \in \llbracket 1, u \rrbracket \\ u & \text{étant le nombre totale de type d'interfaces d'information} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (54)$$

Basé sur ces définitions, le critère d'adaptabilité de l'interface d'information pour un nœud d'information entre deux modules  $i$  et  $j$  est défini comme suit (55) :

$$ca_{ii(i,j)} = \min(ca_{iin}(1), \dots, ca_{iin}(k))$$

$k \in \llbracket 1, m \rrbracket$   $m$  étant le nombre totale de type type d'interfaces d'information (55)

▪ **Obtention de l'indicateur d'intégrabilité d'une configuration du SPM**

Dans notre démarche (figure 4-39) deux niveaux d'agrégation sont explicités : niveau module et niveau système.

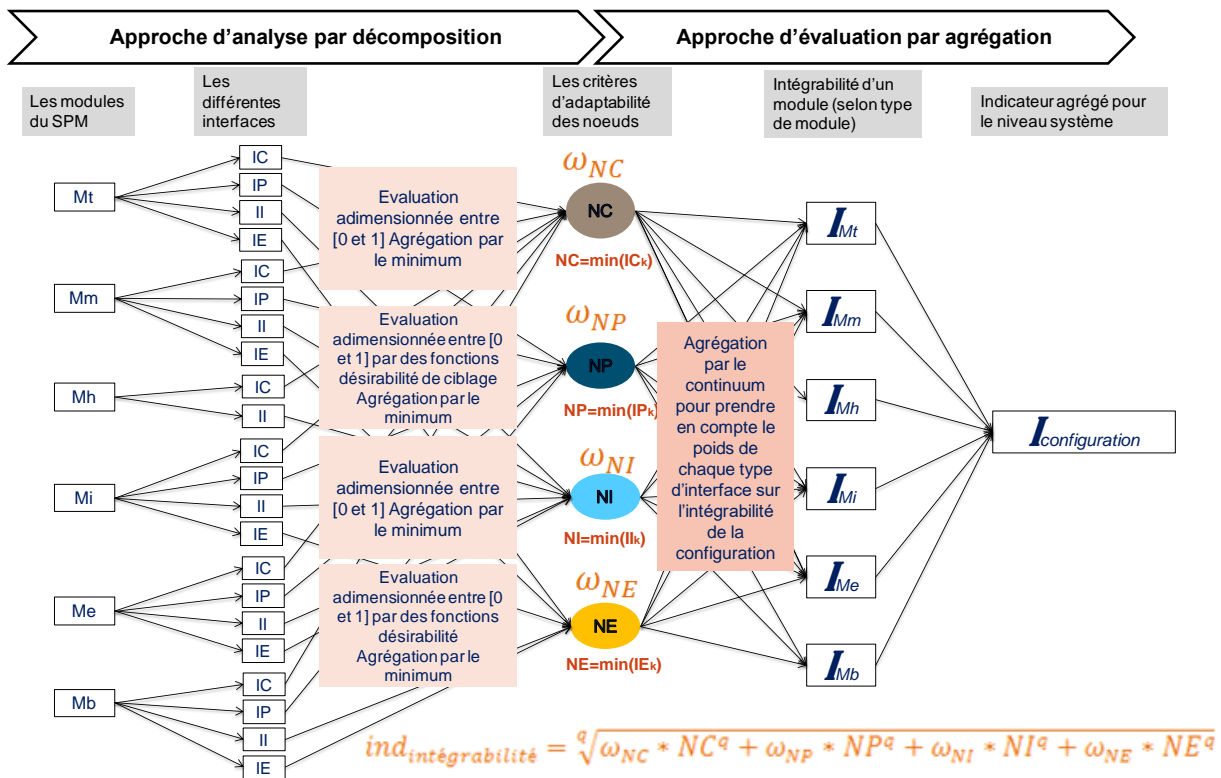


Figure 4-41 Démarche de construction de l'indicateur d'intégrabilité d'une configuration du SPM

▪ **La mesure de l'intégrabilité d'un module du SPM**

La mesure de l'intégrabilité d'un module permet de déterminer le niveau d'adéquation d'un module spécifique dans la configuration du SPM. L'évaluation de l'intégrabilité d'un module est nécessaire puisqu'elle constitue une étape intermédiaire pour accéder à l'évaluation de l'intégrabilité de toute la configuration du SPM (niveau système). De plus, ceci peut être utile dans une logique d'optimisation. En identifiant les modules les "moins intégrés" dans la configuration, on peut orienter les algorithmes d'optimisation pour proposer de les remplacer

par d'autres modules qui seraient plus adaptés. Dans cette logique, l'indicateur d'intégrabilité peut faciliter la génération de nouvelles configurations mieux optimales en se basant sur une mesure objective au lieu que ça soit conduit uniquement par le hasard. L'optimisation de la configuration ne sera pas abordée dans ce manuscrit mais demeurera comme une perspective d'approfondissement de nos travaux.

Chaque module partage au maximum quatre types d'interfaces avec les autres modules voisins. Chacun de ces quatre types d'interfaces accomplit un rôle dans l'intégrabilité du module, dont l'importance est tributaire du type d'interface. Par exemple, si des interfaces physiques entre deux modules ne sont pas parfaitement adéquates, la liaison entre ces deux modules ne peut être envisagée. Alors que si la qualification requise dans une interface de compétence n'est pas tout à fait adaptée, le module peut opérer avec un fonctionnement dégradé. Pour cette raison nous envisageons une priorisation de l'importance des types d'interfaces.

Le choix d'un opérateur d'agrégation nécessite de répondre à la question sur la stratégie d'agrégation : l'intégrabilité d'un module dépend de la bonne adéquation de toutes les interfaces de ce fait la méthode d'agrégation ne peut être que conservative pour s'assurer que l'indicateur d'intégrabilité d'un module tient compte de l'adaptabilité de toutes ces interfaces.

Enfin, la figure 4-40 montre qu'à l'exception du module humain, les autres types de modules du SP utilisent les quatre types d'interfaces. La définition de l'indicateur d'intégrabilité du module fera la distinction entre les modules de type humain et les autres modules du SPM. Pour un module  $k$  l'indicateur d'intégrabilité est donné par la formule (56):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si le module } k \text{ n'est pas du type humain} \\ I_{M(k)} = \sqrt[{-100}]{0.562 * NP_k^{-100} + 0.281 * NC_k^{-100} + 0.06 * NI_k^{-100} + 0.097 * NE_k^{-10}} \quad (56) \\ \text{Sinon} \\ I_{M(k)} = NC_k \end{array} \right.$$

où  $NP_k$ ,  $NC_k$ ,  $NI_k$  et  $NE_k$  représentent respectivement les valeurs d'adéquation des interfaces physique, de compétence, d'information et d'énergie d'un module  $k$ . Ces valeurs sont obtenues en tenant compte des critères d'adaptabilité de tous les nœuds auxquels le dit module participe. Ainsi si valeur sont donnés par la formule (57).

$$\left\{ \begin{array}{l} NP_k = \min(ca_{ip(k,*)}) \\ NC_k = \min(ca_{ic(k,*)}) \\ NI_k = \min(ca_{ii(k,*)}) \\ NE_k = \min(ca_{ie(k,*)}) \end{array} \right. \quad (57)$$

Les valeurs de pondération données dans la formule (56) ont été obtenues en procédant à une comparaison deux à deux des types d'interfaces en utilisant la méthode AHP. La matrice de jugement utilisée est donnée en annexe 3 (cf. § 11.2.4). La valeur du paramètre d'agrégation (-100) a été choisie pour assurer une stratégie d'agrégation conservative.

- **L'indicateur d'intégrabilité de la configuration du SPM**

En s'appuyant sur l'évaluation de l'intégrabilité de chaque module, mesure unique de l'intégrabilité d'une configuration du SPM peut être fournie. Cette mesure unique renseigne sur la faisabilité de la configuration proposée.

$$I_{\text{configuration}} = \min (I_{M(k)})_{1 \leq k \leq n_{\text{mod}}} \quad (58)$$

où  $n_{\text{mod}}$  représente le nombre de modules contenus dans une configuration du SPM.  $I_{M(k)}$  représente la valeur de l'indicateur d'intégrabilité d'un module  $k$ .

- **Conclusion sur l'indicateur d'intégrabilité**

Dans cette section une démarche de construction de l'indicateur d'intégrabilité a été présentée. La mesure d'intégrabilité permet de renseigner sur la faisabilité d'une configuration par l'analyse de l'adéquation entre ses différents modules.

En se basant sur cet indicateur, une configuration peut être considérée comme faisable si la mesure de l'indicateur d'intégrabilité dépasse un seuil. Cependant, il est difficile d'associer une signification concrète à la mesure de l'intégrabilité. Le choix de la valeur seuil revient au concepteur. En usant de son expérience, le concepteur peut juger de la valeur du seuil d'intégrabilité à imposer.

Les configurations jugées faisables sont considérées pour la phase d'évaluation (phase 2 de la figure 4-31). Plusieurs aspects sont à prendre en compte. La section suivante présente les critères utilisés pour l'évaluation des alternatives de conception du SPM.

#### PHASE 2 : EVALUATION DES ALTERNATIVES DE CONCEPTION DU SPM

Les configurations générées du SPM sont évaluées en considérant les critères de : surface occupée au sol, mobilité, coût de revient des produits, délais et capacité du système. L'évaluation de la mobilité et du coût de revient a été introduite précédemment dans cette partie, nous nous focaliserons d'avantage sur les démarches d'évaluation des autres critères.

- **Critère de surface**

Le SPM est destiné à produire directement sur le site du client final. La surface mise à disposition par le client final pour l'implantation du SPM, peut être limitée et considérée ainsi comme une contrainte pour sa conception. L'intégration du critère d'estimation de la surface occupée dans la phase d'évaluation des configurations du SPM, a pour objectif de renseigner le concepteur sur la surface occupée par chaque configuration générée du SPM.

Le critère de surface tient compte des surfaces occupées par chaque module du SPM. La description des modules fournit une information sur la surface nécessaire pour chaque module (cf. figure 4-34 et figure 4-35). Dans l'hypothèse ou l'implantation physique adoptée est de type '*lignes de transferts en parallèle*' le critère de surface peut être formalisé par la formule (59).

$$I_{surface} = \left( \left( \left( \sum_i^{n_{st}} surf_{st_i} + \sum_i^{n_{sm}} surf_{sm_i} \right) * nombre_{ligne} + \sum_i^{n_{si}} surf_{si_i} + \sum_i^{n_{se}} surf_{se_i} \right) + surf_{interligne} + surf_{passages} \right) * coef_{surf} \quad (59)$$

$surf_{st_i}$ ,  $surf_{sm_i}$ ,  $surf_{si_i}$ ,  $surf_{se_i}$  désignent respectivement la surface des modules technique, de manutention, d'information et d'énergie.

$n_{st}$ ,  $n_{sm}$ ,  $n_{si}$ ,  $n_{se}$  désignent respectivement le nombre total des modules techniques, de manutention, d'information et d'énergie compris dans la configuration du SPM.

$nombre_{ligne}$  désigne le nombre de lignes de production contenues dans la configuration

$surf_{interligne}$  et  $surf_{passages}$  désignent les surfaces prévues entre les lignes de production et les surfaces prévues pour la circulation des opérateurs.

$coef_{surf}$  est un coefficient correcteur.

Au-delà des attributs liés directement aux modules du SPM, le critère de surface permet de tenir compte d'autres hypothèses liées à la conception du SPM et qui ont un impact sur la surface occupée par la configuration. Ces hypothèses concernent par exemple la distance entre les lignes de production, les passages prévus pour la circulation des opérateurs et des produits. Le concepteur du SPM peut choisir aussi d'appliquer un coefficient correcteur pour tenir compte de d'autres considérations qui ne peuvent être quantifiables à ce stade (par exemple les postes opérateurs, les encours, etc.).

L'attribut de surface constitue un point de différence important entre les systèmes de production mobiles et ceux considérés comme sédentaires. En effet, les SPM ne nécessitent pas une acquisition de fonciers propres ce qui pourrait contribuer à alléger les coûts de revient. Cependant pour s'intégrer sur le site de production, le SPM devrait s'adapter à une surface limitée. Car à la base ces surfaces devraient être aménagées spécifiquement pour le SPM pendant sa phase d'exploitation. En limitant la surface nécessaire, on limite les coûts les coûts d'aménagement de ces surfaces.

#### ▪ Critères de délais

La performance du SPM pour chaque site de production dépend de trois critères de délais qui doivent être tenus par le SPM : le *délai de montage*, le *délai de production* et le *délai de démontage*.

#### ▪ Le délai de montage du SPM

Le *délai de montage* du SPM permet de d'estimer le temps nécessaire pour mettre en service le SPM sur le site de production. Ce délai tient compte des activités de montage de l'usine et des activités de mise en service. Une information peut être obtenue par rapport au temps de mise en service nécessaire pour chacun des modules du SPM.

Le délai de montage d'une configuration du SPM dépend d'une part des temps nécessaires pour la mise en service de chaque module et d'autre part, du nombre d'équipes qui peuvent être mobilisées pour conduire les activités de montage et mise en service du SPM. En considérant que les modules vont être montés et mis en service successivement, le critère de délai de montage ( $I_{delai\_montage}$ ) d'une configuration du SPM peut être exprimé par la formule (60).

$$I_{delai\_montage} = \frac{\sum_i^{n_{mod}} temps\_montage_i}{nombre\_equipe\_montage} \quad (60)$$

où  $temps\_montage_i$  représente le temps de montage et mise en service de chaque module  $i$  dans la configuration du SPM. Cet attribut est supposé connu à l'avance par le concepteur.

$n_{mod}$  représente le nombre total de modules contenus dans une configuration du SPM

et,  $nombre\_equipe\_montage$  représente le nombre d'équipes mobilisées parallèlement pour le montage et la mise en service des modules du SPM.

On note que le critère ( $I_{delai\_montage}$ ) s'intéresse spécifiquement à tous les modules physiques (non humains) du SPM. La notion de montage et mise en service des modules humains peut être assimilée au besoin de formation des opérateurs locaux. L'activité de formation de ces opérateurs est conduite en parallèle des activités de montages des modules physiques du SPM. La durée de formation des opérateurs dépend de leur niveau de qualification initiale et être difficilement estimables à ce stade de conception.

#### ▪ Le délai de production

Le délai de production permet de renseigner sur la durée nécessaire pour satisfaire la demande de production sur un site donné. Cet attribut dépend de la capacité de production du SPM. La capacité, exprimée par la cadence du système, désigne le débit de production (en nombre de produits par unité de temps) du SPM. Chaque configuration générée du SPM possède une cadence propre, qui est en fonction des modules choisies pour la former.

Dans une configuration en série (lignes de transfert), la cadence de la ligne de production dépend de la cadence du poste goulet qui a le débit de production le moins rapide. En plus des temps de production sur chaque poste, il faut considérer les temps de transfert entre les postes.

La cadence du SPM exprimée par exemple (nombre produit/jours) peut être donnée par la formule :

$$I_{cadence\ prod} = \frac{temps\ ouverture * nombre_{ligne}}{\max(temps\ production_k, temps\ transfert_i)_{\substack{1 \leq k \leq n_{st} \\ 1 \leq i \leq n_{sm}}} \quad (61)$$



Le *temps d'ouverture* désigne le temps correspondant aux horaires de travail journalier du SPM incluant aussi les temps de désengagement (nettoyage, formation, essai, pause, maintenance préventive, etc.).

Les *temps production<sub>k</sub>* et *temps transfert<sub>i</sub>* désignent respectivement les temps de production de chaque module technique *k* dans la configuration, et les temps de transfert de chaque module de manutention *i* dans la configuration.

- Le délai de démontage du SPM

Le délai de démontage du SPM désigne la durée nécessaire pour remettre le SPM en état de transport après la fin de la campagne de production. Le délai de démontage du SPM peut acquérir une importance dans le contexte où le client exigerait de rendre disponible l'emplacement utilisé par le SPM dans une durée contractuelle. Dans un souci de simplification, on considérera que le délai de démontage nécessaire est équivalent au délai de montage du SPM, et sera évaluée de la même manière.

- Le critère de capacité d'une configuration du SPM

La cadence d'une configuration du SPM est comparée au *takt time*<sup>41</sup> nécessaire. Si la cadence est inférieure au *takt time* la configuration du SPM est dite en surcharge, cela signifie que le SPM ne peut honorer la demande nécessaire dans la période exigée par le client. La comparaison entre la cadence de la configuration et le *takt time* nécessaire permet d'évaluer le taux de charge de la configuration. (cf. formule (62)).

$$Taux\_charge = \frac{I_{cadence\ prod}}{takt\ time} \quad (62)$$

### PHASE 3 : SELECTION DE LA MEILLEURE ALTERNATIVE DE CONCEPTION DU SPM

En se basant sur l'évaluation des critères de performance des différentes configurations générées du SPM, le concepteur procède à la sélection de la meilleure configuration du SPM. La sélection de la meilleure alternative de conception du SPM est une activité de recherche de compromis. En utilisant les cinq critères définis dans la phase d'évaluation (mobilité, coûts, surface, délai et capacité), la conception recherche la solution (configuration du SPM) réalisant le meilleur compromis, en représentant toutes les solutions retenues avec leurs critères d'évaluation dans un tableau.

Cependant lorsque le nombre de solutions (configurations générées du SPM) est important ou si le processus de sélection doit être automatisé pour s'intégrer par exemple dans un processus d'optimisation, il devient impossible de procéder à la sélection de la meilleure configuration "manuellement". Dans ce cas, une étape de formalisation des préférences du concepteur et un opérateur d'agrégation peuvent être utilisés pour aider le concepteur à prendre la décision finale, en fournissant un classement ordinal de toutes les solutions. La préférence du

<sup>41</sup> désigne le rythme de production juste égal aux quantités vendues (durée demandée par le client/nombre total de produits à produire dans la période).

concepteur peut être formalisée d'une part par la pondération des cinq critères en utilisant la méthode AHP (Saaty, 1990) et d'autre part, par l'utilisation de fonctions de désirabilité (Harrington, 1965) pour évaluer le niveau de satisfaction du concepteur vis-à-vis du niveau de chaque critère de performance.

La stratégie de compromis (compensation ou non) envisagée entre ces critères oriente le choix de l'opérateur d'agrégation. Nous considérons que le concepteur doit adapter le choix de la stratégie d'agrégation en fonction du contexte de décision. Nous optons pour le choix de l'opérateur GOWA (Yager, 2004) qui facilite l'adaptation de la stratégie d'agrégation. Nous définissons ainsi un indice de performance globale (*IPG*) qui permet d'attribuer une note unique pour chaque configuration, l'objectif serait alors de choisir l'alternative de conception qui maximise l'indice (*IPG*). Pour configuration du SPM  $C_j$ , l'indice (*IPG*) est donné par la formule suivante :

$$IPG(C_j) = \sqrt[z]{\omega_{uc} * uc(C_j)^z + \omega_{um} * um(C_j)^z + \omega_{us} * us(C_j)^z + \omega_{ud} * ud(C_j)^z + \omega_{ut} * ut(C_j)^z} \quad (63)$$

$uc$ ,  $um$ ,  $us$ ,  $ud$  et  $ut$  désignent respectivement les valeurs de satisfaction des critères de coûts, de mobilité, de surface, de délai et de capacité pour une configuration  $C_j$ . Les paramètres  $\omega_{uc}$ ,  $\omega_{um}$ ,  $\omega_{us}$ ,  $\omega_{ud}$  et  $\omega_{ut}$  définissent les facteurs de pondérations associées aux valeurs de satisfaction des critères de performance. Le paramètre  $z$  permet de fixer la stratégie d'agrégation.

La valeur de  $z$  ne peut pas être associée à une signification réelle. Scott et Antonsson (2000) proposent une méthode de calcul de la stratégie  $z$  appelée la méthode des points indifférentes (Scott and Antonsson, 2000) ou "la méthode de points équivalents" (Quirante, 2012). Cette méthode permet, via une résolution numérique, de trouver à la fois les valeurs des pondérations et le paramètre d'agrégation  $z$ . Il est à noter que la méthode de choix des valeurs de pondération et la méthode de choix du paramètre d'agrégation sont liées.

Le recours à une étape d'agrégation offre aussi au concepteur la possibilité de comparer plusieurs situations : en changeant les poids des critères de performance, il est possible de constater rapidement les configurations du SPM les mieux adaptées selon les différentes situations.

### 4.5.3 CONCLUSION SUR LA CONCEPTION DES CONFIGURATIONS DU SPM

Cette partie a porté sur l'analyse de la problématique de conception de la meilleure configuration du SPM pour un site de production. Plusieurs aspects ont été analysés. D'abord cette problématique doit être abordée avec une approche holistique qui tient compte de tous les composants du système de production.

Dans un contexte de mobilité du système de production, la problématique de disponibilité de ressources humaines qualifiées s'impose au cœur des préoccupations du concepteur. En concevant le SPM, les choix du concepteur doivent être en adéquation avec les caractéristiques du site de production et en l'occurrence la disponibilité des compétences requise dans le système humain.

Ensuite, une démarche de conception du SPM adapté à un site de production a été introduite en vue d'assister le concepteur dans la démarche de génération, évaluation et choix des configurations du SPM. Cette démarche de conception scindée en trois macro phases, adopte une vue holistique du système de production. La génération de configurations faisables et opérationnelles nécessite de tenir compte de l'interopérabilité entre les différents modules constituant le SPM. Un indicateur mesurant l'intégrabilité des configurations du SPM. Cet indicateur s'appuie sur l'analyse des interfaces physiques, d'information, de compétence et d'énergie entre les différents modules du SPM. Les configurations jugées comme faisables sont soumises à la phase d'évaluation selon cinq critères de performance : la mobilité, les coûts, les délais, la surface occupée et la capacité.

Enfin une dernière phase correspond à la sélection de la meilleure solution. Nous proposons un indice agrégé de performance global pour guider le décideur dans son choix final. Cette dernière phase bien que n'étant pas indispensable, peut s'avérer nécessaire dans le cas où le nombre de solution à comparer est important et la comparaison ne peut être accomplie par un humain seul. L'usage de l'indice de performance global peut être également nécessaire dans le cas où la démarche de génération proposée est accouplée à un algorithme d'optimisation où la méthode de sélection des configurations du SPM doit être automatisée.

#### **4.6 CONCLUSION SUR LA L'APPROCHE GENERALE DE CONCEPTION DE SPM POUR UN SITE DE PRODUCTION**

Un système de production mobile se démarque des systèmes de production classiques ou sédentaires par sa dépendance au site de production. La complexité des relations entre le SPM et le site de production réside dans le positionnement du site comme faisant partie à la fois de l'environnement direct du système en définissant les missions et services à rendre et, aussi comme élément de l'environnement indirect influençant et imposant des contraintes sur le SPM. L'analyse de l'environnement du site de production, conduite dans la première partie, a permis de dégager les éléments qui le caractérisent et qui exercent un impact sur le SPM. L'identification de ces éléments de l'environnement permet de les considérer dès la phase de conception du SPM.

La conception du SPM dépend de ce qu'il est nécessaire de faire sur le site de production. De ce fait, l'originalité du modèle d'aide à la décision proposé réside dans la considération de la mobilité du système de production dans l'analyse de la décision de « faire ou faire faire ». Les particularités de la mobilité du système dans l'analyse de cette problématique ont été

identifiées selon trois aspects : (1) *changement fréquent du site de production*, (2) *considération d'un SPM* et (3) *prise en compte de la mobilité dans l'évaluation des différents indicateurs*. Toutefois, dans un contexte de mobilité du système de production, la stratégie de production du SPM est remise en cause pour chaque nouveau site de production. La figure 40 ci-après reprend et positionne ces différents aspects.

La vision adoptée dans ce chapitre est celle de la conception d'un SPM pour un site de production supposé bien identifié. Cependant, pour des considérations de rentabilité, le SPM doit opérer successivement sur plusieurs sites géographiques. La gestion de la mobilité entre deux sites de production soulève plusieurs difficultés, d'autant plus que ces sites ne sont pas définis au moment de la conception initiale du système. Comme il l'a été mentionné, un changement du site de production oblige de repenser par exemple la stratégie de production, mais aussi la reconfiguration du SPM nécessaire pour s'adapter au nouvel environnement du site de production. Le besoin de gestion de cet aspect dynamique de la configuration du SPM nous conduit à analyser dans quelles mesures les techniques de modélisation en entreprise peuvent contribuer à la gestion de la mobilité successive du SPM. Le chapitre qui suit propose d'aborder cette problématique de gestion de la mobilité du système entre deux sites de production, en s'appuyant sur des techniques de modélisation en entreprise.

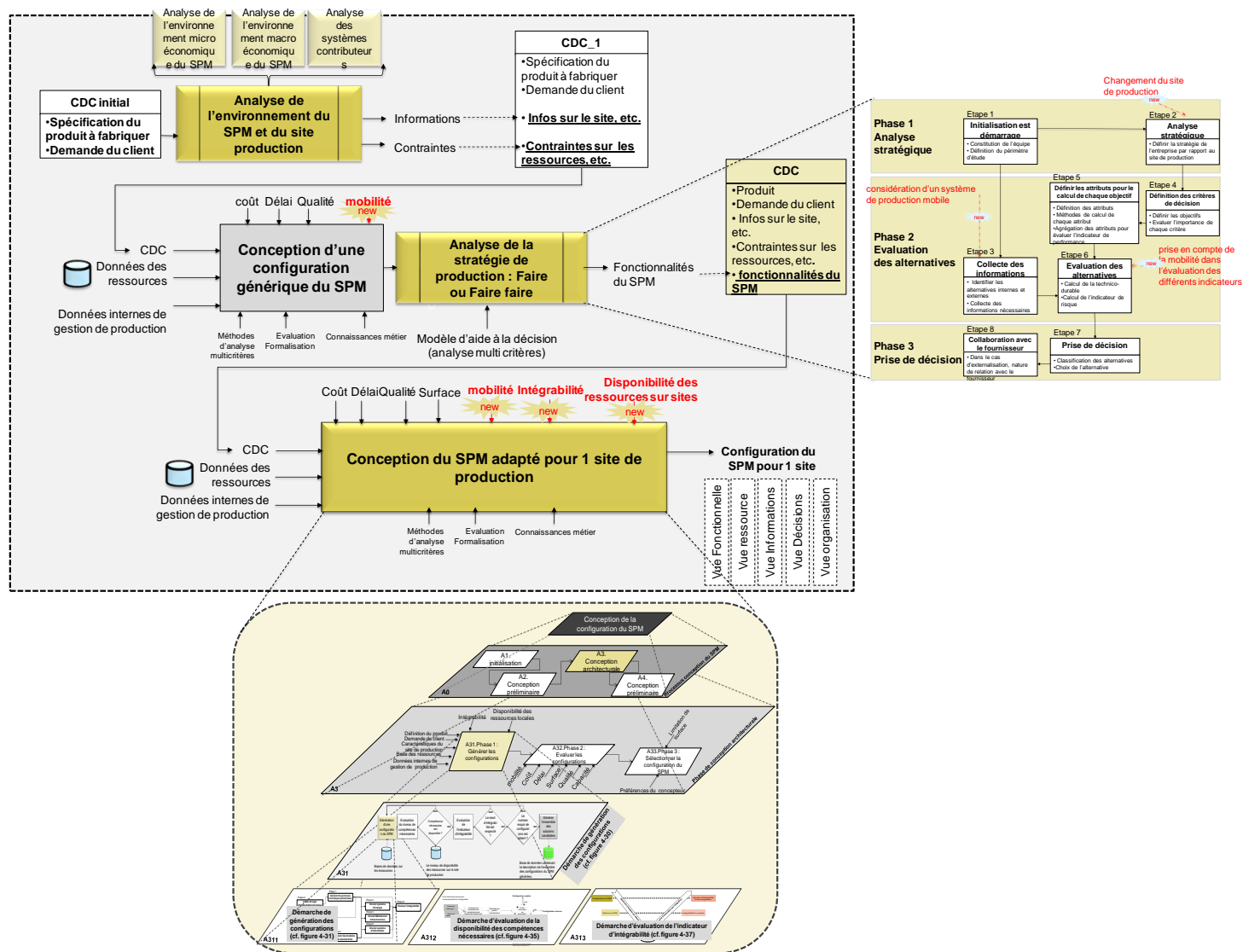


Figure 4-42 Synthèse de l'approche globale de conception de SPM pour un site de production



---

CHAPITRE  
5

5 INTÉGRATION DE LA MOBILITÉ RÉCURSIVE :  
SUCCESSIVE MULTI SITE

---





## *Sommaire du chapitre 5*

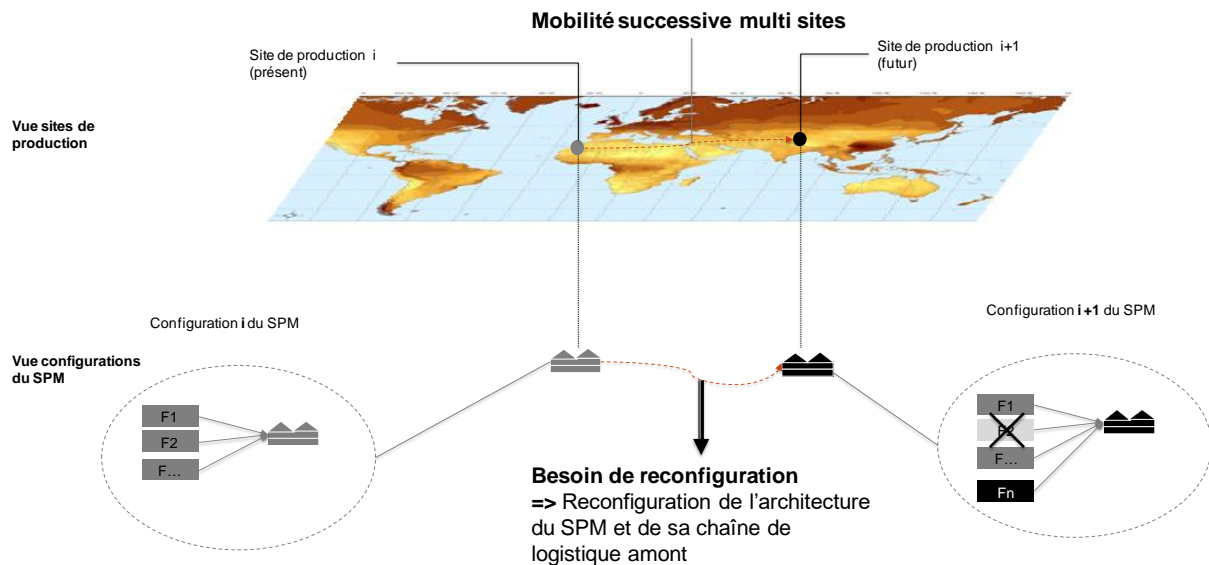
<b>5</b>	<b>INTÉGRATION DE LA MOBILITÉ RÉCURSIVE : SUCCESSIVE MULTI SITE .....</b>	<b>215</b>
5.1	INTRODUCTION GENERALE AU CHAPITRE 5 .....	219
5.2	D'UNE APPROCHE DE CONCEPTION DU SPM POUR 1 SITE VERS UNE ADAPTATION POUR UN CONTEXTE MULTI SITES .....	220
5.3	LA PRODUCTION SUCCESSIVE MULTI-SITES : CONCEPT ET EXIGENCES.....	224
5.3.1	<i>Les systèmes de production distribués : paradigme et principales tendances .....</i>	<i>224</i>
5.3.2	<i>Les exigences liées à la production mobile successive multi sites. ....</i>	<i>227</i>
5.4	LA PROBLEMATIQUE DE FAIRE OU FAIRE FAIRE A L'ECHELLE MULTI-SITES. ....	229
5.4.1	<i>Les nouvelles exigences d'une mobilité successive multi sites dans l'analyse de la stratégie de production .....</i>	<i>230</i>
5.4.2	<i>Un modèle d'analyse de la décision faire ou faire faire à l'échelle multi sites.....</i>	<i>232</i>
5.4.3	<i>Une chaine d'approvisionnement reconfigurable.....</i>	<i>234</i>
5.4.4	<i>Conclusion sur la problématique de faire ou faire faire à l'échelle multi-sites. ....</i>	<i>236</i>
5.5	PRISE EN COMPTE DE L'ADEQUATION AU SITE DE PRODUCTIONS DANS LA GESTION DE LA RECONFIGURABILITE DE L'ARCHITECTURE DU SPM.....	237
5.5.1	<i>La gestion de la reconfigurabilité de l'architecture interne du SPM .....</i>	<i>239</i>
5.5.2	<i>Conclusion sur la gestion de la reconfiguration du SPM.....</i>	<i>246</i>
5.6	CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE 5.....	247



## 5.1 INTRODUCTION GENERALE AU CHAPITRE 5

A la fin d'une première campagne de production, le système de production mobile doit être préparé et configuré pour la prochaine commande. Ceci implique une nouvelle localisation géographique, un nouvel environnement et une nouvelle demande en termes de capacités et capacités nécessaires. Dans ce chapitre il est question d'analyser les enjeux de l'évolution et conception / reconception d'un SPM successivement sur plusieurs sites de production.

Le besoin d'une mobilité récurrente et successive sur plusieurs emplacements géographiques nous conduit à se poser la question de la reconfigurabilité / reconception du système au regard des caractéristiques de chaque site de production. Ces besoins de reconfigurations ont été identifiés à deux niveaux : une reconfiguration de l'architecture interne du SPM et une reconfiguration de la chaîne logistique amont du SPM comme l'illustre la figure 5-1.



**Figure 5-1** Le concept de mobilité successive et le besoin de reconfigurabilité

Face à une nouvelle demande, il faut d'abord identifier quelle (nouvelle) configuration du SPM est nécessaire pour répondre à cette commande. La future configuration doit être générée en tenant compte de la configuration initiale du SPM (celle qui a servi pour la production de la commande précédente). Pour y arriver, il faut déterminer quels sont les composants de la configuration initiale du SPM qui vont être maintenus, et quels sont ceux qui doivent être modifiés ou reconfigurés.

Ce chapitre a deux objectifs. Le premier consiste à explorer cette problématique de "mobilité successive multi sites" notamment via l'analyse des questions qui s'y réfèrent lié au besoin de reconfigurabilité interne et externe du SPM. Le second objectif consiste à voir comment la démarche de conception du SPM formalisée dans le chapitre précédent peut être adaptée dans le contexte d'une mobilité successive multi sites. La figure 5-2 positionne ces différentes questions sur les différents chapitres successifs.

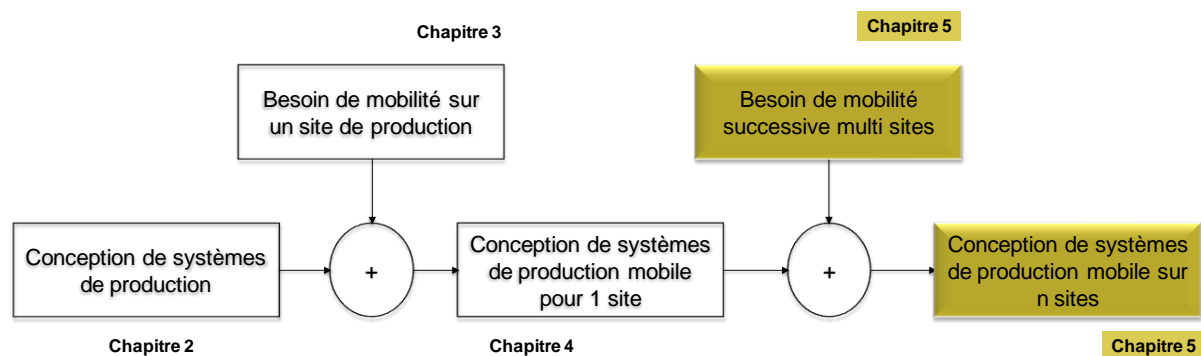


Figure 5-2 Positionnement des objectifs de ce chapitre dans la démarche globale

## 5.2 D'UNE APPROCHE DE CONCEPTION DU SPM POUR 1 SITE VERS UNE ADAPTATION POUR UN CONTEXTE MULTI SITES

Le chapitre précédent s'est attaché à la formalisation d'une démarche de conception du SPM adaptée pour un seul site de production. A cette occasion une approche de conception constituée de quatre étapes a été proposée. Ceci concerne 1) les phases d'analyse de l'environnement du SPM et du site de production, 2) de définition d'une configuration générique du SPM, 3) d'analyse de la stratégie de production sur site et 4) de choix d'une configuration adéquate du SPM. Plusieurs démarches et modèles d'aides à la décision visant à assister le concepteur/décideur le long du processus de conception ont été proposés.

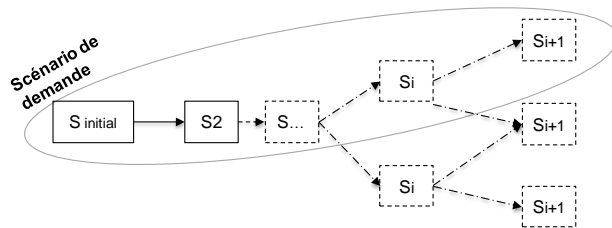
Dans ce chapitre on s'intéresse à l'évolution du SPM après une première utilisation sur un site de production. Ce qui signifie qu'une configuration existe déjà. La logique adoptée sera une logique de re-conception d'une configuration de ce système : pour répondre à une demande sur un nouveau site de production, il est nécessaire de proposer une nouvelle configuration du tout en tenant compte de l'existant.

Dans cette logique de re-conception et reconfiguration du SPM, une adaptation de la démarche de conception précédemment exposée, s'impose. De nouveaux éléments doivent être pris en compte.

- D'abord l'approche de conception multi sites dépend maintenant d'un existant et ce pour chacune des futures localisations d'implantation.

- Ensuite, il est nécessaire de spécifier un scénario de production qui décrit l'ensemble des sites de production envisagés ainsi que les demandes de client liées à ces sites. Cette notion de scénario de production (cf. figure 5-3) est très dépendante de la réalité économique de l'entreprise et des incertitudes liées au remplissage du carnet de commande. Il permettrait d'envisager une rentabilité sur plusieurs sites et une vision des investissements et amortissements en moyens techniques et humains. Il est alors très compliqué de disposer de données précises. Néanmoins, notre approche n'intégrera pas une analyse des incertitudes ce

qui n'est pas notre objectif. La prise en compte des incertitudes dans les scénarios de production peut se présenter comme une perspective de nos travaux.



Evolution de la capacité nécessaire selon le scénario de demande envisagé

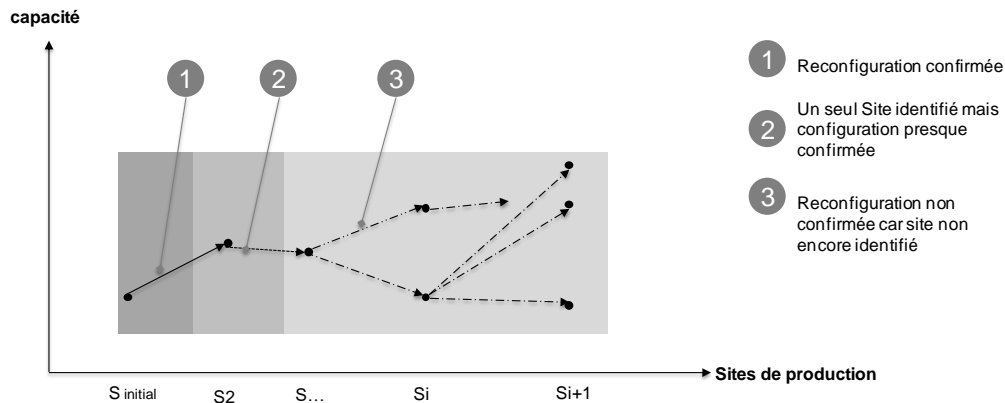


Figure 5-3 Evolution de la capacité nécessaire selon le scénario de demande envisagé

- Enfin, le dernier élément à prendre compte est l'évolution du cahier des charges. En effet, ce dernier doit désormais intégrer les spécifications des  $n$  sites envisagés dans le scénario de production. Ce *nouveau* cahier des charges est une agrégation des cahiers des charges de chaque site de production concerné dans le *scénario de production*.

La démarche de conception multi sites proposée dans la figure 5-4 et qui est revendiquée dans ce chapitre, consiste en une adaptation (et presque une automatisation) de l'approche de conception qui a été exposée dans le chapitre précédent. En effet cette problématique va se poser pour chaque site. Il faut alors concevoir une solution qui adapte au besoin instantané (*niveau local*), mais avec une vision multi sites, cette conception doit tenir compte de la configuration existante et aussi des autres reconfigurations qui pourraient être nécessaires dans le futur (*niveau global*). La démarche de conception multi sites va consister alors à 1) analyser l'environnement du SPM et l'environnement de chaque site de production, ensuite 2) définir la configuration générique qui conviendrait au nouveau site, puis 3) se poser la question de ce qu'il faut faire sur site ou externaliser, puis 4) comparer les ressources nécessaires pour produire sur le nouveau site avec celles qui sont disponibles dans la configuration existante du SPM ( $i-1$ ). Compte tenu de ces informations, 5) définir un plan de reconfiguration (ajout/suppression de modules, ajout/suppression d'équipes).

En ce qui concerne l'analyse de l'environnement du site de production, la même démarche est reconduite pour chaque site de production dans l'objectif d'enrichir le cahier des charges (noté cahier des charges initial sur la figure 5-4) avec les informations et contraintes de chaque site. Ne présentant pas de différences majeures, on se référera aux discussions exposées dans le

chapitre précédent (cf. § 4.2). De même la définition d'une configuration générique du SPM ne tient compte que des spécifications et des besoins de chaque site. La logique adoptée précédemment (cf. § 4.3) demeure d'actualité. Quant à l'analyse de la stratégie de production, de nouvelles considérations s'imposent. En l'occurrence, on distingue deux niveaux d'analyses : un niveau local pour chaque site et un niveau global concernant un ensemble de sites. De plus la stratégie de l'entreprise d'un site à un autre peut peser dans la décision finale. La décision de "faire ou faire faire" va avoir d'une part, une portée externe au cadre du SPM remettant en question l'organisation de la chaîne d'approvisionnement aval et d'une autre part, une portée interne au SPM concernant les modules nécessaires pour produire sur chaque site. L'analyse des enjeux de cette décision bénéficiera d'une attention particulière dans ce chapitre (cf. §5.4). En définissant ce qu'il est nécessaire de faire en interne, il est nécessaire d'analyser dans quelle mesure la configuration existante du SPM (celle qui a servi pour le site i-1) pourrait être adaptée au contexte du nouveau site ? En particulier, Après reconfiguration, il est nécessaire de vérifier que la nouvelle (re-) configuration du SPM s'adapte au contexte du nouveau site de production. Cette question sera abordée dans le paragraphe §5.5.

La suite de ce chapitre est structurée en trois parties représentées sur la figure 5-4. Primo, nous allons introduire le concept de "*mobilité successive multi sites*" et les questions et exigences qui s'y réfèrent. Puis, dans un second temps, en se positionnant à un niveau plus global, nous allons explorer la problématique de faire ou faire faire à l'échelle multi sites. Enfin en troisième étape, nous allons analyser le besoin de reconfigurabilité de l'architecture interne du SPM, avant de conclure ce chapitre.

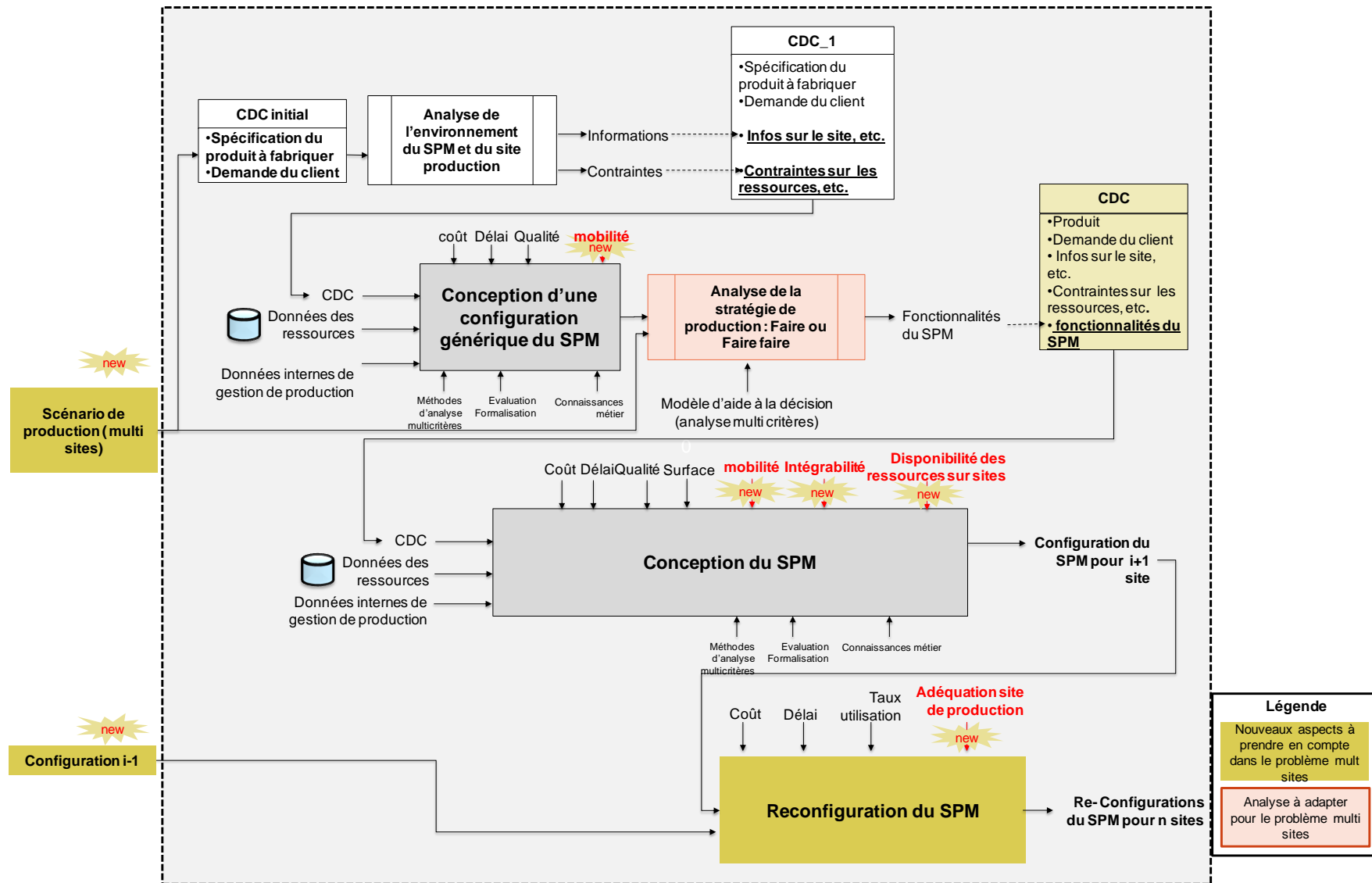


Figure 5-4 Démarche de conception du SPM pour n sites de production

### **5.3 LA PRODUCTION SUCCESSIVE MULTI-SITES : CONCEPT ET EXIGENCES.**

Dans la présente partie, il est question de l'intégration de la problématique multi-sites dans la gestion de la mobilité successive du système de production. L'optimisation globale du SPM, à l'échelle multi sites, doit tenir compte des contraintes de tous les sites sur lesquels le SPM devrait intervenir. En particulier, la mobilité successive multi sites du SPM nécessite de s'adapter à l'évolution de la demande entre les différents sites de production. Afin de rester efficient, la structure du SPM doit être adaptée en fonction des exigences (vis à vis de la capacité de production) de chaque site. Dans une logique de globalisation, ce concept de mobilité vise à satisfaire une demande de clients dispersés sur plusieurs régions géographiques. Des analogies peuvent être faites alors avec les systèmes de productions distribués. Dans le paragraphe suivant, nous proposons de discuter de ces analogies mais aussi des divergences existantes.

#### **5.3.1 LES SYSTEMES DE PRODUCTION DISTRIBUES : PARADIGME ET PRINCIPALES TENDANCES**

Le concept de production distribuée se base sur l'utilisation d'un réseau d'usines de production qui sont dispersés sur plusieurs régions géographiques. Dans un objectif d'adaptabilité aux fluctuations du marché et les demandes individuelles des consommateurs, la production prend place au plus près des clients (Kühnle, 2010). Le concept de production multi sites de systèmes de production distribués consiste en une duplication de plusieurs exemples (plus ou moins similaires) du même système sur plusieurs régions géographiques. Dans ce contexte de décentralisation, la performance d'une entreprise ou un site ne dépend pas uniquement de sa propre performance mais globalement de la performance de l'ensemble du réseau de production dans lequel elle se situe. Des facteurs clés sont identifiés comme d'importants facilitateurs du concept de production distribuée (Kühnle, 2010; Matt et al., 2015) : l'ouverture croissante des marchés et la baisse constante des coûts de transports et logistique aussi bien que les coûts de communication (grâce à l'émergence d'internet). Matt et al. (2015) identifient plusieurs grandes tendances concernant le développement de systèmes de productions décentralisées dans le futur. Ces tendances peuvent être résumées en :

5. une grande *tendance de développement durable* : satisfaire une demande (du client) par une création de la valeur dans une manière socialement et environnementalement responsable. Dans cet objectif, la conception des éléments du système (comme le choix de la localisation ou les schémas logistiques) doit éviter les effets environnementaux négatifs, optimiser les avantages du client et être économiquement efficiente.
6. une *inflation des coûts logistiques* : la flambée des prix de l'énergie ainsi que les taxes "environnementales" contribuent à l'augmentation des coûts logistiques. Selon un rapport de (PwC, 2009) la minimisation des coûts de transport serait, dans les 15 prochaines années, un critère important dans la décision de choix de localisation. Ce



point est très dépendant du paramètre du cout du baril de pétrole qui, on le constate cette année est peu prédictif et peut subir des variations importantes.

7. une *personnalisation de masse* : le besoin de répondre à une demande du client de plus en plus individuelle, les systèmes de production doivent être capables de produire des petites en quantités avec une grande flexibilité et une reconfigurabilité rapide. La localisation de la chaîne de valeurs au plus près du client final conduit à la réduction des longues distances de transport de produits finis ou semi-finis. "*Dans le future, seulement les matières premières et les informations seraient transportées sur de longues distances*".
8. une *démocratisation de la conception et de l'innovation ouverte* : dans une logique d'innovation ouverte (*open innovation*), le client final est de plus en plus impliqué dans le processus de conception et de développement, grâce à la diffusion des outils de conception. Dans cette logique, "*les clients finaux peuvent concevoir et créer leur produit en utilisant des outils de conception digitale, ensuite ils transfèrent leurs données à des laboratoires de production distribuées dans leurs régions, qui vont fabriquer les produits utilisant des technologies de fabrication additive*" Matt et al. (2015)

Plusieurs formes de systèmes de production distribuées peuvent être distinguées. Le tableau 5-1 en présente une classification basée sur les travaux de Matt et al. (2015). En particulier, une des formes spéciales identifiées des systèmes de production distribués (SPD) est le type 6: *Modèle de SPM*.

Tableau 5-1 classification des nouvelles formes des systèmes de production distribués (Matt et al., 2015)

Etapas d'évolution des modèles d'usines distribuées			Formes spéciales de production distribuée		
Type	Classification	Description et caractéristiques	Type	Classification	Description et caractéristiques
1	<b>Modèles d'usines standardisées et répliquables</b>	Modèles d'usine standardisées et répliquables pour une production distribuée géographiquement de produits définis avec un nombre d'unités définies	5	<b>Un modèle de service pour des prestations de production industrielle</b>	Des fournisseurs de services de production et intermédiaires ("prestataires de production") pour des contrats de production distribués concernant différents produits avec des étapes de production similaires et des quantités variées pour diverse clients
2	<b>Modèle d'usines modulaires et extensibles</b>	Modèles d'usines modulaires pour une production géographiquement distribuée avec une flexibilité par rapport aux quantités de produits et ainsi une extensibilité du système de production.	6	<b>Modèle d'usines mobiles sans localisations fixes</b>	Des modèles d'usines mobiles qui ne sont pas liées à une localisation fixe et qui sont en plus hautement flexibles et extensibles pour satisfaire les exigences d'une production temporaire et la réduction des activités de transport (approvisionnement ou distribution)
3	<b>Modèle d'usine flexible et reconfigurable</b>	Un modèle d'usines flexibles et rapidement reconfigurables pour production géographiquement distribuée de produits en différentes variantes (flexibilité de produits) et en quantités variées (flexibilité de quantité)	7	<b>Franchise de production</b>	Modèle d'usines, exploitées indépendamment par des franchises, avec un certain niveau de flexibilité et des unités de production adaptables pour une production géographiquement distribuée de produits dans un réseau de franchise
4	<b>Modèle d'usines changeables et intelligentes</b>	Un modèle d'usines intelligentes et auto-optimisées avec un degré important d'adaptabilité à une production géographiquement distribuée de différents produits avec des étapes de fabrication similaires et des quantités variables.	8	<b>Fabrication additive dans des laboratoires de production (Cloud production)</b>	Des laboratoires de production hautement flexible et géographiquement distribués pour la production de produits variés avec des processus de fabrication génératifs (impression 3D) avec des moyens de CAO transmis à partir du Cloud

Comme il l'a été mentionné, le concept de production multi sites de systèmes de production distribué consiste une duplication de plusieurs exemples (plus au moins similaires) du même système sur plusieurs régions géographiques. Dans notre contexte, le même système de production doit opérer sur plusieurs sites géographiques. Les points de similitude et de divergence entre les systèmes de production distribués et les SPMs successivement sont résumés dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2 Similitudes et divergences entre les systèmes de production distribués et mobiles (successivement)

Similitudes	Divergences
<b>Couverture géographique</b> : couvrir plusieurs régions géographiques tout en étant au plus près du client final.	<b>Localisation de la production</b> : Dans le cas des SPD les usines sont fixes tandis que le SPM occupe temporairement un site de production.
<b>Produit à fabriquer</b> : un produit similaire fabriquer et distribuer dans toutes les régions concernées	<b>Fréquence de mobilité</b> : dans le cas de SPM, le même système de production
<b>Proximité des marchés</b> et clients : réduire la distance avec le client final en implantant le système de production au plus près des clients et en privilégiant le transport des matières premières	<b>Organisation humaine</b> : Dans le cas des SPDs, la structure organisationnelle est figée, alors que pour les SPM cette même structure est adaptable d'un site à l'autre en raison du recrutement du personnel local.
<b>Base fixe</b> : existence possible d'une base fixe qui centralise, contrôle et coordonne les opérations sur les différents sites "décentralisées".	

Dans ce chapitre le concept de "mobilité successive mutli sites" du système de production est introduit. Ceci correspond à une extension et de nouvelles exigences par rapport à une mobilité mono site (qui a été considérée dans le chapitre précédent). Le paragraphe qui suit a pour objectif de discuter de ces nouvelles exigences.

### 5.3.2 LES EXIGENCES LIEES A LA PRODUCTION MOBILE SUCCESSIVE MULTI SITES.

Nous avons vu que la conception du SPM est dépendante des caractéristiques de l'environnement du site de production. Lorsque le système de production doit avoir une mobilité successive, i.e. le même système sera utilisée successivement sur plusieurs contextes, certaines questions que le concepteur se posait pour le premier site, deviennent récurrentes pour chaque nouveau site. Ces questions touchent à plusieurs aspects du SPM et de sa reconfiguration, qui sont présentés ci-après :

#### 5.3.2.1 RECONFIGURATION DE L'ARCHITECTURE DU SPM

D'un point de vue dimensionnement, la demande des clients varient d'un site à l'autre. La mobilité successive appelle donc à un besoin de reconfiguration du SPM. Cette reconfiguration concerne l'ajout, modification ou suppression d'un ou plusieurs modules du SPM. Ce niveau de reconfiguration concerne donc l'architecture (interne) du SPM. Il adresse des aspects de capacité de production, au sens des quantités à augmenter ou réduire, mais aussi de la capacité technique à produire une évolution du produit (à fabriquer) initial.

#### 5.3.2.2 RECONFIGURATION DE LA CHAINE LOGISTIQUE AMONT DU SPM

La chaîne d'approvisionnement du SPM est optimisée pour une localisation géographique et du réseau de fournisseurs. Cette chaîne d'approvisionnement est remise en cause pour le nouveau site de production. Une reconfiguration de toute la chaîne d'approvisionnement s'impose. Elle concerne l'approvisionnement des matières premières mais aussi celle des pièces de rechange pour assurer les activités de maintenance sur site. Sans oublier aussi l'approvisionnement des moyens de production. Ce niveau concerne la reconfiguration de la chaîne logistique (externe) amont du SPM.

Le modèle d'aide à la décision "faire ou faire-faire" présenté dans le chapitre précédent est un outil qui peut servir dans l'analyse du besoin de reconfiguration de la chaîne logistique amont par la détermination des alternatives de production à privilégier pour le nouveau site de production.

### 5.3.2.3 ORGANISATION HUMAINE ADAPTABLE

Nous avons pensé le SPM en appuie d'une utilisation de la main d'œuvre locale. Chaque nouvelle commande exige une nouvelle configuration des équipes recrutées localement. Le chapitre précédent a abordé le besoin de vérification de la disponibilité de la qualification nécessaire sur le site de production. Cette question se repose pour chaque nouveau site de production. La mobilité successive du site de production nécessite une organisation adaptable des équipes intervenantes sur le SPM. En addition des aspects de qualification requise introduits dans le chapitre précédent, d'autres aspects tels que la culture locale, la langue utilisée ou les habitudes de travail sont à prendre en compte.

Les enjeux peuvent concerner la non qualification des opérateurs sur le nouveau site, la non adaptation au contexte de travail local, la non compréhension avec les opérateurs (langues différentes par exemple), obligation de contractualisation et travail avec des ressources non choisies mais imposées lors de la négociation du contrat, etc.

### 5.3.2.4 OPTIMISATION LOCALE OU GLOBALE DU SPM

Les trois aspects susmentionnés s'inscrivent dans une optique d'optimisation de la performance du SPM au regard des exigences d'un site de production. Du point de vue de l'entreprise, ce qui compte le plus c'est d'atteindre une optimisation (en l'occurrence en termes de rentabilité) globale du système de production sur les différents sites. Deux niveaux d'optimisation du système de production peuvent être alors distingués :

- le niveau local correspondant à une seule commande et un site de production unique, le SPM doit être configuré et optimisé pour répondre à cette demande (cela correspond à la vision adoptée dans le chapitre précédent),
- le niveau global correspondant à la gestion du SPM sur plusieurs sites successivement. Les décisions prises doivent tenir compte de la stratégie de l'entreprise pour un ensemble de sites de production.

Les enjeux liées à la considération d'un niveau local et global se manifestent par une cible de rentabilité économique construite sur n sites, mais sans lisibilité (économique) à long terme et

une remise en cause à chaque site nécessitant ainsi de nouveaux investissements, le bilan financier serait impossible à construire à priori, l'analyse de la rentabilité ne pourrait se faire qu'à posteriori, avec les risques que cela implique.

### 5.3.2.5 CAPITALISATION DE LA CONNAISSANCE ISSUE DES RETOURS D'EXPERIENCES.

A la fin de la production sur un site, l'ensemble des informations générées doivent être capitalisées pour contribuer à l'amélioration des performances du SPM et afin de mieux faire pour la prochaine campagne de production. Ces connaissances peuvent être en lien avec la mobilité du système, la gestion de la configuration ou la maintenance entre autres. L'évolution du SPM d'un site de production à un autre, s'appuie sur les retours d'expériences capitalisés à chaque utilisation du SPM. Ce retour d'expérience est par exemple nécessaire pour la gestion de la maintenance du système, en identifiant les problèmes rencontrés et en pérennisant les diagnostics envisagés ainsi que les solutions retenues. Olsson et al. (2007) suggèrent un outil basé une approche CBR<sup>42</sup> pour la gestion de la maintenance d'un SPM.

En plus de l'application pour la gestion de la maintenance du SPM, le suivi du retour d'expérience d'un site à un autre, doit servir aussi pour faire évoluer le choix et la construction des indicateurs de performance utilisés, mais aussi actualiser les hypothèses et objectifs utilisés dans la (re-) conception.

## 5.4 LA PROBLEMATIQUE DE FAIRE OU FAIRE FAIRE A L'ECHELLE MULTI-SITES.

Dans l'analyse de la mobilité successive multi sites du SPM, la deuxième question qui se pose est la nécessité de reconfiguration de la chaîne d'approvisionnement amont du SPM (cf. figure 5-5). Le choix des alternatives de production dépend en partie des localisations géographiques du SPM et de ses fournisseurs. L'objectif de cette section, est d'analyser dans quelle mesure la mobilité successive multi sites du SPM pourrait remettre en cause la configuration définie de la chaîne d'approvisionnement du SPM.

---

<sup>42</sup> Case based reasoning

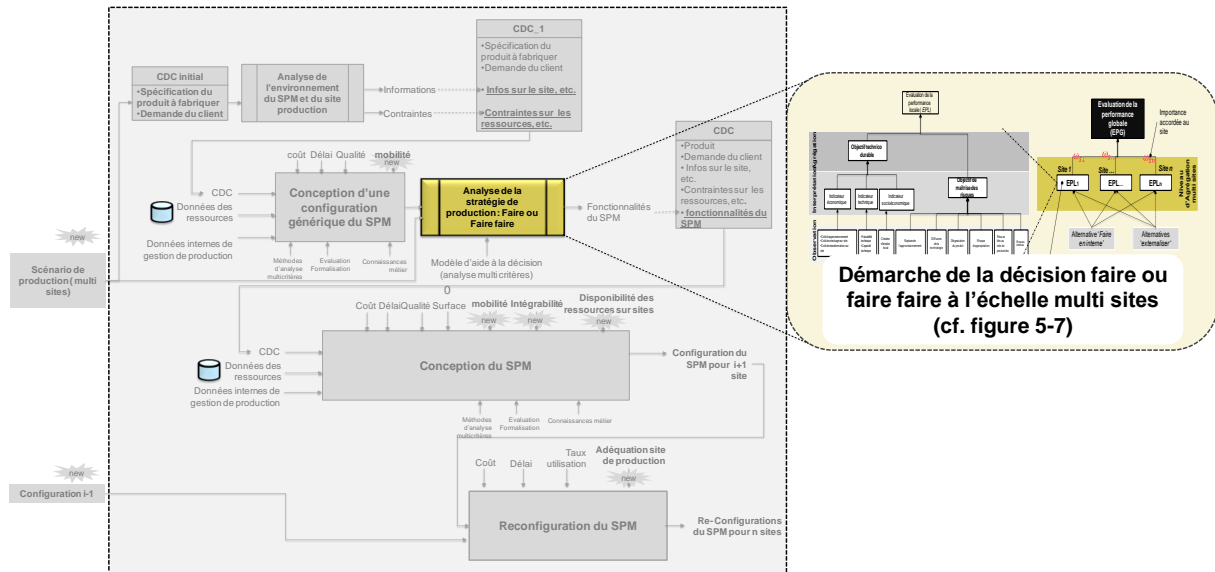


Figure 5-5 L'analyse de la question de faire ou faire faire à l'échelle multi sites fait appel à une démarche de décision

Le modèle d'analyse de la décision de "faire ou faire faire" présenté dans le chapitre précédent (cf § 4.4) a pour objectif d'assister le décideur dans le choix d'une alternative de production, interne ou externe, pour un site de production identifié. Dans ce chapitre, on se positionne à un niveau encore plus global. Pour commencer cette question sera posée au niveau d'un site de production (*performance locale*) et ce pour tout site dans le scénario de production. Dans un second temps, pour un composant / produit ou activité donnés, une décision globale de faire ou faire faire (*performance globale*) est considérée, en se basant sur les évaluations locales de chaque site.

La complexité de la décision réside dans la recherche de compromis entre une alternative de production qui peut s'avérer la mieux adaptée pour un site de production ou bien privilégier une autre alternative qui permet de garantir "un bon compromis" sur l'ensemble de sites de production (*c'est la question de recherche d'un optimum global qui n'est pas forcément un optimum local*). Ce dilemme se résume par la question suivante : **compte tenu des caractéristiques (demande, localisation géographique, etc.) de chaque site de production, est-il plus intéressant (économiquement et techniquement mais pas que) de choisir pour chaque site un fournisseur différent, ou bien d'établir une collaboration à long terme avec un seul fournisseur pour assurer la production nécessaire sur un ensemble de sites différents ?**

Afin de répondre à cette question, il est important de comprendre les nouvelles exigences de la mobilité successive multi sites dans l'analyse de la décision de "faire ou faire faire".

#### 5.4.1 LES NOUVELLES EXIGENCES D'UNE MOBILITE SUCCESSIVE MULTI SITES DANS L'ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION

Dans le modèle d'analyse mono site, une fois le site de production identifié, la stratégie adoptée, la localisation géographique ainsi que le volume de demande sont supposés invariables pour l'analyse de la décision de faire ou faire faire. La mobilité successive multi

sites introduit de nouvelles variables dans l'analyse de la décision concernant le choix de la stratégie de production.

***La mobilité successive multi sites introduit de nouvelles variables dans l'analyse de la stratégie de production qui se résume par le changement de localisations de production, le changement des capacités de production et la considération de l'importance relative des sites***

#### 5.4.1.1 CHANGEMENT DE LOCALISATIONS GEOGRAPHIQUES DE PRODUCTION

Le changement de localisation géographique du SPM conduit à un changement des distances entre les fournisseurs et le SPM. Cela peut concerner aussi un changement des modes de transport (par exemple nécessité de prendre le bateau, existence et état de l'infrastructure routière ou ferroviaire, etc.). Le changement de localisations géographiques induit également un changement d'environnements socioculturelle, politique et légale induisant d'une part des impacts économiques (nouvelles taxes, coût de main d'œuvre, etc.) et d'autre part, remettant en question l'analyse des risques (nouvelle réglementation, stabilité dans la région, etc.).

#### 5.4.1.2 CHANGEMENT DES CAPACITES DE PRODUCTION

Le changement des capacités de production peut impacter directement la capacité de production des fournisseurs externes se traduisant ainsi par des coûts additionnels à supporter (impact économique) ou une dégradation du taux de service due à une incapacité du fournisseur à satisfaire la demande (impact technique).

#### 5.4.1.3 L'IMPORTANCE RELATIVE DU SITE DE PRODUCTION DANS L'ANALYSE DE LA STRATEGIE DE PRODUCTION

En plus de la stratégie de base à adopter pour chaque site de production, une autre question se pose : ***Est-ce que tous les sites de production jouissent de la même importance pour l'entreprise ?*** Cette question devient légitime dans le cas où l'entreprise envisage certains sites de production dans l'objectif d'accéder à des bénéfices à long terme. Cela peut être illustré par la vocation de l'entreprise de se positionner sur un nouveau marché et dans quel cas elle pourrait privilégier certains sites de production par rapport à d'autres.

Pour tenir compte de l'importance de chaque site de production, nous introduisons une pondération pour chaque site (par la méthode AHP Saaty, 1990) qui retranscrit les préférences et la stratégie des décideurs. En considérant par exemple un *scénario de production* contenant  $n$  sites de production, un vecteur *ISP* fournit les résultats de pondérations de chaque site de production dans le scénario considéré. Le vecteur *ISP* représente le vecteur propre obtenue pour la comparaison par paire des différents sites.

$$ISP = [\omega_{s1}; \dots; \omega_{si}; \dots; \omega_{sn}] \quad (64)$$

où  $\omega_{si}$  est compris entre 0 et 1 et traduit la pondération accordée au site  $i$ .

### 5.4.2 UN MODELE D'ANALYSE DE LA DECISION FAIRE OU FAIRE FAIRE A L'ECHELLE MULTI SITES.

L'évaluation de la décision de faire ou faire à l'échelle multi sites va se baser sur l'évaluation de performance locale (*EPL*) pour chaque site à part La figure 5-6 présente un rappel de la démarche d'évaluation de la performance locale pour chaque alternative de production (la démarche à été présentée précédemment cf. § 4.5.2.3).

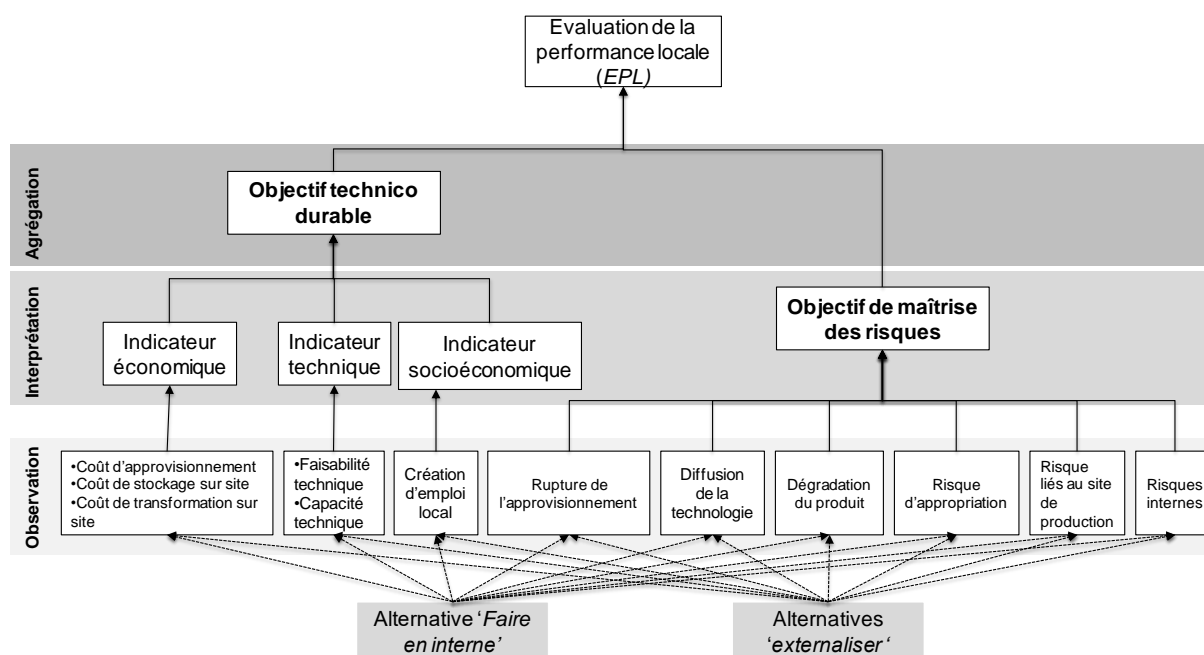


Figure 5-6 rappel de la démarche de la décision de faire ou faire faire pour un site de production

Pour chaque alternative  $A_j$ , pour tout site de production  $i$  une évaluation de la performance locale est donnée. Cette évaluation, notée  $EPL_i(A_j)$ , permet de fournir une évaluation de l'alternative  $A_j$  à l'échelle locale du site  $i$ . Ce niveau d'analyse permet de tenir compte des caractéristiques de chaque site de production notamment la localisation géographique et la capacité de production nécessaire.

En ce qui concerne le niveau d'analyse multi sites, une autre indice de performance est introduite : l'Evaluation de la Performance Globale, notée  $EPG$ , qui permet de tenir compte de la performance d'une alternative de production  $A_j$  non plus à l'échelle d'un site de production unique, mais à l'échelle d'un ensemble de sites de production. La formalisation de ce niveau d'analyse globale justifie le recours à un autre niveau d'agrégation de performance (intitulé *niveau d'agrégation multi sites* dans sur la figure 5-7). Ce niveau d'agrégation additionnel va permettre en l'occurrence de tenir compte de l'importance de chaque site de production, dont le besoin a été motivé dans le paragraphe précédent (cf. § 5.4.1.3). Ce niveau d'agrégation soulève la problématique de choix de la fonction d'agrégation adéquate et particulièrement celle de la stratégie d'agrégation. A ce titre un sens pratique peut être associé à la stratégie d'agrégation nécessaire à ce niveau d'analyse : pour une alternative de production donnée, chacun des sites considérés va avoir des résultats différents avec des résultats tantôt



déficitaires et tantôt positifs, la stratégie d'agrégation permet de se poser la question, dans un scénario contenant plusieurs sites, si les résultats déficitaires d'un site peuvent être compensés par les résultats positives d'un autre site (*stratégie d'agrégation compensatoire*) ou non (*stratégie d'agrégation conservative*). De ce fait, selon le contexte de décision les deux stratégies peuvent être envisagées et aucune stratégie d'agrégation ne peut être imposée d'emblée, et doit être adaptée en fonction de l'intention du décideur.

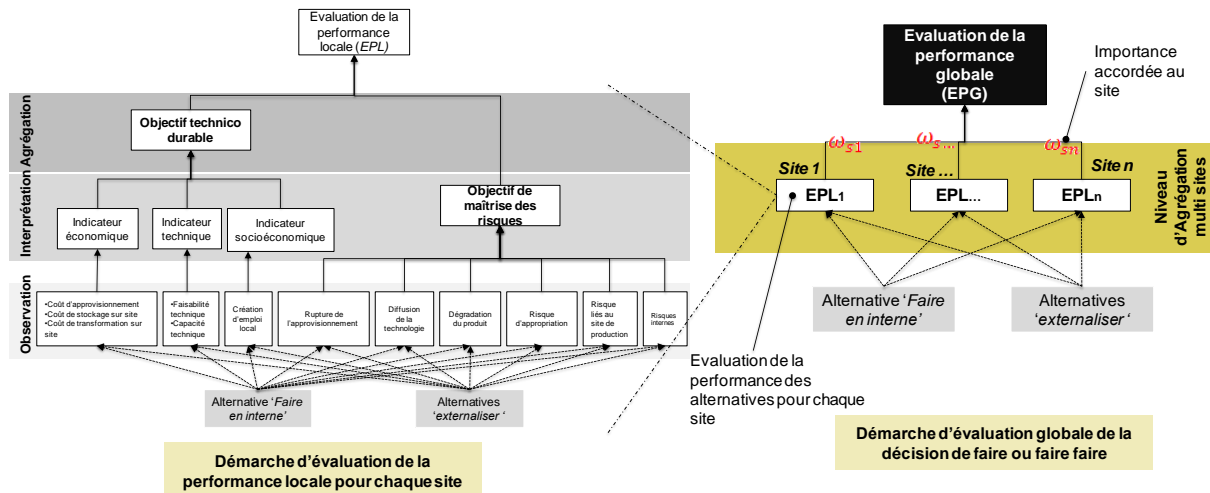


Figure 5-7 Démarche d'évaluation globale de la décision de faire ou faire faire

Pour la formalisation de l'évaluation de la performance globale, l'expression (65) propose une expression mettant en relation quatre paramètres : d'un côté l'évaluation de la performance globale (EPG) d'une alternative  $A_j$  et d'autre part, l'évaluation de la performance locale pour un site  $i$   $EPL_i(A_j)$ , l'importance du site  $i$  incarnée par la valeur de pondération  $\omega_{si}$  et enfin, le paramètre de la stratégie d'agrégation  $z$ .

$$EPG(A_j) = \sqrt[z]{\sum_{i=1}^n \omega_{si} * (EPL_i(A_j))^z} \tag{65}$$

Le modèle d'analyse de la décision "faire ou faire faire" à l'échelle multi sites présenté dans ce paragraphe permet tenir compte des trois exigences de mobilité successive identifiées dans le paragraphe précédent (cf. § 5.4.1). Dans ce sens, les impacts de changement de localisation géographiques et de capacités de production sur la performance de chaque alternative de production ( $A_j$ ) sont évaluées indépendamment au niveau local via l'indicateur des performances locales (EPL). Cet indicateur permet ainsi de tenir compte des spécificités de chaque site de production. En ce qui concerne la troisième exigence en relation avec l'importance de chaque site de production, elle est intégrée au niveau d'agrégation multi-sites via la prise en compte des pondérations des sites dans la fonction d'agrégation.

Les résultats de ce modèle vont avoir un impact sur la configuration de la chaîne d'approvisionnement pour chaque site de production. Cet impact se décline selon deux aspects : d'une part le choix de l'alternative de production (interne ou externe) dépendamment des évaluations de la performance locale des alternatives pour chaque site et d'autre part, le

changement des modes de transport ainsi que des caractéristiques d'approvisionnements (quantités, planning, etc.). Le paragraphe suivant a pour objectif d'analyser l'usage qui peut être fait du modèle d'analyse de la décision "faire ou faire faire" à l'échelle multi sites sur la configuration de chaîne d'approvisionnement du SPM.

### **5.4.3 UNE CHAÎNE D'APPROVISIONNEMENT RECONFIGURABLE**

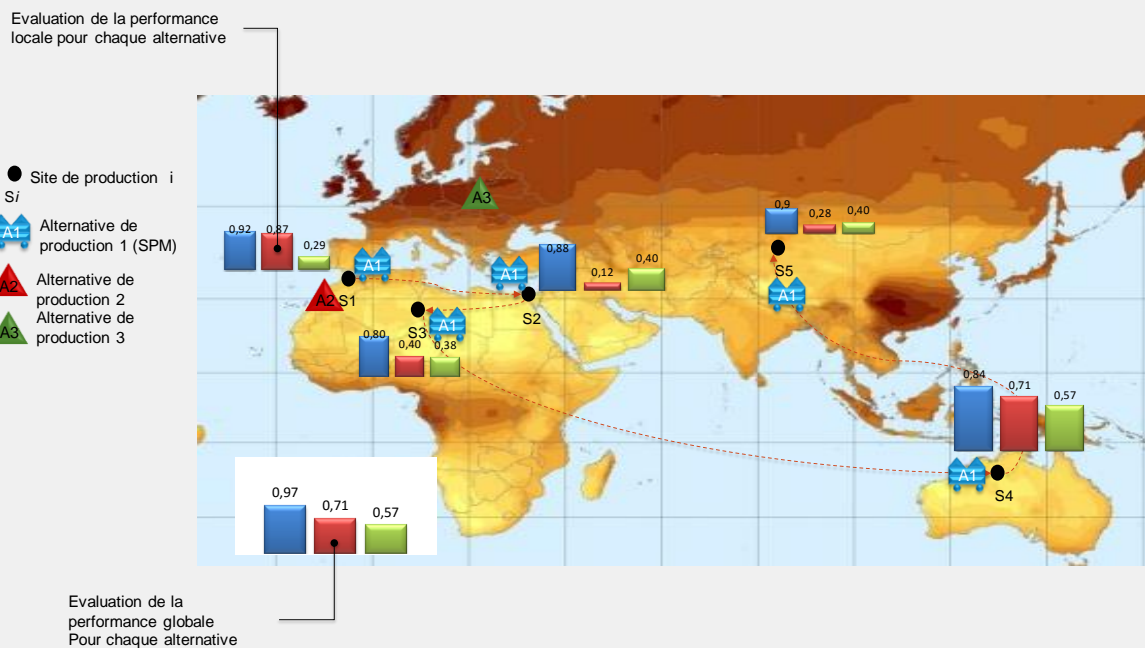
L'impact de l'analyse de la décision de "faire ou faire faire" sur l'organisation de la chaîne d'approvisionnement du SPM se traduit par un besoin de reconfiguration ou d'adaptation de cette chaîne. En effet, l'analyse de la décision de "faire ou faire faire" se conduit à deux niveaux :

- un *niveau local* pour un site de production et qui est concerné par l'évaluation de la performance locale (*EPL*) des alternatives de production.
- un *niveau global* concernant plusieurs sites basé sur l'évaluation de la performance globale (*EPG*) des alternatives de production.

*Dans un contexte de mobilité successive du SPM, l'analyse de la décision de 'faire ou faire faire' peut se traduire par un besoin de reconfiguration de la chaîne d'approvisionnement du SPM. Cette reconfiguration concerne le choix des alternatives de production (fournisseurs) et les modes de transport.*

La reconfiguration de la chaîne d'approvisionnement concerne deux aspects : *le choix de l'alternative de production* et *le choix des modes de transport*. En ce qui concerne, le choix de l'alternative de production, le niveau local pour chaque site, permet d'évaluer toute alternative possible en fonction des caractéristiques de chaque site. En se fiant uniquement à ce niveau d'analyse, le décideur peut ainsi choisir l'alternative de production (SPM ou fournisseur externe) la mieux "adaptée" pour le site concerné. En conduisant cette analyse locale sur l'ensemble des sites, plusieurs configurations de la chaîne d'approvisionnement peuvent être mises en place en fonction des caractéristiques de chaque site de production.

**Exemple :** Pour la production d'un composant, trois alternatives s'offrent : (1) une alternative en interne en utilisant un SPM (notée A1) (2) un fournisseur proche du premier site de production (noté A2) et (3) un fournisseur low cost localisé en Europe de l'est (noté A3). D'un autre côté, nous considérons un scénario composé de 5 sites de productions sur lesquels le SPM intervient successivement. Chacun des sites se distingue par une localisation et une demande propres. La figure 5-8 a pour objectif d'illustrer les deux niveaux de décisions qui peuvent s'offrir au décideur : un niveau local basé sur l'évaluation de performance locale (EPL) pour chaque site et un niveau global donnant une vision générale basée sur l'évaluation de la performance globale (EPG).



**Figure 5-8 Exemple illustratif de la matrice de cadence**

*L'analyse et l'interprétation qui peuvent être faite de ces résultats feront l'objet d'une analyse plus détaillée dans l'annexe 1 "cas d'application" (cf. § 10).*

Ce niveau d'analyse est indépendant du scénario de production envisagée, i.e. l'ensemble des sites qui précèdent ou suivent le site de production concerné.

Le niveau d'analyse global, à l'échelle multi sites, est basé sur l'évaluation de la performance globale (EPG). Ce niveau d'analyse permet de prendre une décision d'externalisation ou d'internalisation d'une activité de production particulière à un plus long terme. Il tient compte aussi d'un scénario de production (ensemble de sites) qui peut être aligné sur une stratégie/projection commerciale à long terme. Comme il l'a été motivé précédemment (cf. § 5.4.1.3), ce niveau tient compte de l'intention du décideur, ou plus globalement la stratégie d'entreprise, vis-à-vis de chaque site de production. La décision prise en se basant sur ce niveau d'analyse conduit à la mise en place d'une relation/collaboration à long terme avec un fournisseur. A l'encontre du niveau d'analyse local, la décision de "faire ou faire faire" basée

sur le *EPG* est dépendant du scénario de production : la décision qui pourrait être prise pour un site de production dépend des caractéristiques (localisation, volume de demande, etc.) des autres sites considérés dans le scénario de production.

La décision de "faire ou faire faire" basée sur l'*EPG* résulte donc en un choix d'une seule alternative de production (interne ou externe) dont la localisation géographique est fixe (pour les alternatives externes) mais les modes de transport sont adaptés en fonction de la localisation du site de production. La reconfiguration de la chaîne d'approvisionnement du SPM impactée par le niveau d'analyse global du "faire ou faire faire" concerne notamment le choix des modes de transport.

#### **5.4.4 CONCLUSION SUR LA PROBLEMATIQUE DE FAIRE OU FAIRE FAIRE A L'ECHELLE MULTI-SITES.**

Dans ce paragraphe, il était question de savoir dans quelle mesure il est possible de prendre en compte l'aspect de mobilité successive multi sites dans l'analyse de la question de "faire ou faire faire". Deux niveaux d'analyse ont été mis en avant : un niveau local pour un site et niveau global pour un ensemble de site. En plus du besoin d'évaluation relative à chaque site de production et qui nécessite une formalisation et automatisation de la démarche vu le nombre d'alternatives et le nombre de sites à évaluer, une autre question qui se pose et le positionnement stratégique vis à vis de chaque site de production. Ce positionnement stratégique se traduit par un poids/ importance à allouer aux résultats de performance sur chaque site.

Il y a aussi un autre aspect dont il faut tenir compte : un aspect dynamique. Compte tenu de l'horizon de décision qui peut s'étaler sur plusieurs années. Il est nécessaire de tenir compte de l'évolution temporelle de critères tels que le coût de matière première, ou la performance<sup>43</sup> des alternatives (internes ou externes). Le besoin d'intégration de cet aspect dynamique pour les performances du SPM nous conduit à nous poser la question de l'usage qui peut être fait des techniques de modélisation d'entreprise, qui sont par ailleurs largement discutées dans la littérature, pour la définition d'un cadre de modélisation générique du SPM.

La partie qui suit a pour objectif de discuter de l'adaptation des techniques de modélisation d'entreprise pour la prise en compte du concept de mobilité du système de production.

---

<sup>43</sup> Par exemple, on considère une capacité fixe des fournisseurs, au cours des sites de production, cette capacité est susceptible d'évoluer.

## 5.5 PRISE EN COMPTE DE L'ADEQUATION AU SITE DE PRODUCTIONS DANS LA GESTION DE LA RECONFIGURABILITE DE L'ARCHITECTURE DU SPM

Les entreprises industrielles font face à des changements dans leur marché de plus en plus fréquents et imprédictibles imposés par une compétition globale (Koren and Shpitalni, 2010). Dans ce contexte économique incertain, l'aptitude de réagir rapidement et économiquement aux fluctuations du marché devient un objectif stratégique pour l'entreprise. Les changements dans l'environnement du système de production peuvent porter sur la variété de produit (par l'introduction de nouveaux produits) ou la fluctuation du volume de la demande. Dans cette section nous nous intéresserons à l'aptitude du SPM à faire face à une fluctuation du volume de la demande entre plusieurs sites de production.

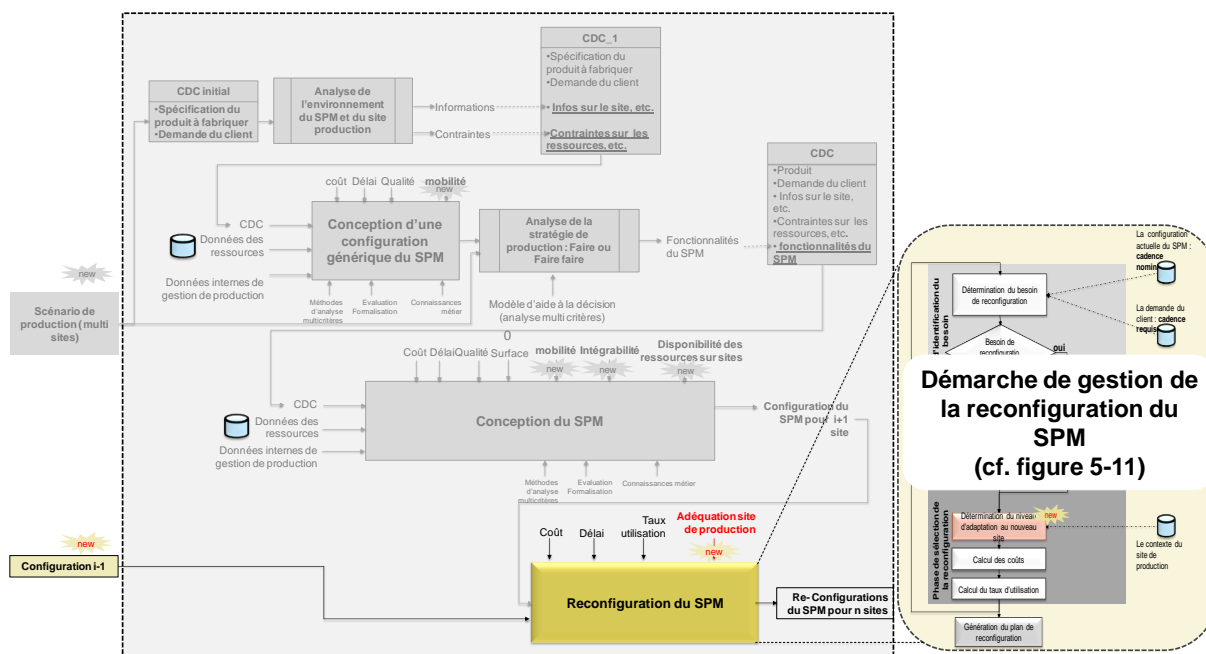


Figure 5-9 positionnement du besoin de reconfigurabilité du système dans la démarche globale

Chaque site de production se caractérise par une demande propre en terme de volume de production, un contexte propre mobilisant de nouvelles ressources (humaines, énergies, techniques) à différents niveaux de disponibilité et de nouvelles contraintes représentées par un environnement politique et législatif différent. Dans une logique de mobilité successive multi sites, le SPM doit s'adapter aux exigences de chacune des localisations géographiques. En l'occurrence, la variation de la demande, en terme de quantité de produits à fabriquer, nécessite d'adapter la capacité de production du SPM. L'adaptation de la capacité exige soit une augmentation par l'ajout de modules ou lignes de production, soit une diminution par leur suppression. Cette caractéristique appelée *extensibilité du système (scalability)* (Putnik et al., 2013) est l'une des caractéristiques critiques dans la conception des systèmes de production reconfigurables (Koren and Shpitalni, 2010).

L'analyse de l'extensibilité du système permet de déterminer l'évolution de la structure du SPM en fonction d'un scénario de demande exprimée pour plusieurs sites de production. L'intégration de l'analyse de la reconfigurabilité lors de la conception du système, est particulièrement importante pour choisir la configuration du SPM qui permettra de minimiser l'effort de reconfigurabilité nécessaire pour s'adapter à chaque nouvelle demande.

Pour mesurer l'effort de reconfigurabilité, Youssef et ElMaraghy (2006) ont proposé une métrique qui permet d'évaluer la facilité de transformation du système d'une configuration à une autre. Cependant, Cette mesure ne présente qu'une vue partielle du système qui ne tient compte que des aspects techniques (i.e. les machines) et n'intègre pas toutes les composantes du système de production (humaine, énergie...). L'effort de reconfigurabilité peut être mesuré également par son coût de reconfiguration et les délais nécessaires pour adapter la configuration du SPM aux variations de la demande.

Youssef and ElMaraghy (2007) présentent une démarche pour le choix des reconfigurations du système de production selon un scénario de demande stochastique. La démarche proposée dans ces travaux ne considère que la description des machines dans la définition de la configuration. Dans notre contexte, en plus du besoin de considérer de toutes les composantes du système, la reconfiguration du SPM est liée à un changement de contexte de production. De ce fait, il est nécessaire de vérifier d'une part que la nouvelle configuration proposée répond d'un côté au niveau de réactivité exigée pour satisfaire la demande du client et d'autre part, de s'assurer que la nouvelle configuration proposée s'adapte au nouveau contexte de production. Le niveau de satisfaction de la réactivité nécessaire est lié à la cadence de production nécessaire par rapport à laquelle la nouvelle configuration du SPM est choisie. Le niveau d'adéquation par rapport au contexte du site de production est renseigné par l'indicateur de mobilité présenté dans la partie précédente. En effet, l'indicateur de mobilité considère des aspects intrinsèques au système (par exemple les types de ressources utilisées, les dimensions, etc.) et aussi l'adéquation entre la configuration et le site de production (par exemple, la disponibilité de la qualification requise sur le site de production).

Dans cette partie, on se propose d'analyser les deux questions de recherche suivantes :

*- dans quelle mesure la reconfigurabilité du système de production peut être analysée dans un contexte de mobilité successive du système de production ?*

*- comment intégrer dans la démarche de conception, la reconfigurabilité du système dans un contexte de mobilité successive avec une vision de minimisation du coût globale de reconfiguration ?*

Ces questions se déclinent selon trois aspects qui font la particularité de nos travaux :

- La prise en compte d'un aspect holistique dans l'analyse de la reconfigurabilité du système.
- La mise en relation de la reconfigurabilité avec d'une part le besoin de réactivité et d'autre part le contexte du site de production.

- La considération d'une mobilité successive du système de production comme facteur déclenchant le besoin de reconfigurabilité.

### 5.5.1 LA GESTION DE LA RECONFIGURABILITE DE L'ARCHITECTURE INTERNE DU SPM

La gestion de la reconfiguration du SPM consiste en la génération d'un plan de reconfiguration du SPM en fonction des différentes localisations géographiques envisagées. Le plan de reconfiguration est obtenu en adaptant une configuration initiale du SPM. La configuration initiale est celle qui a été proposée pour un site de production défini en utilisant la démarche proposée dans la partie précédente (cf. § 4.5). Pour assurer une réactivité à un changement de volumes de production, l'adaptation de la configuration initiale par l'ajout ou la suppression de modules du SPM. Cela concerne aussi bien les modules techniques que les modules humains du SPM. La caractéristique de modularité est une caractéristique importante pour la définition d'un système de production reconfigurable.

On considère deux paramètres pour décrire une configuration du SPM : le nombre de lignes utilisées et le nombre d'équipes intervenant sur chaque ligne. Pour toute nouvelle demande, incarnée par un nouveau site de production, l'adaptation de la configuration du SPM consiste à adapter le nombre de lignes de production et le nombre d'équipes intervenant sur chaque ligne.

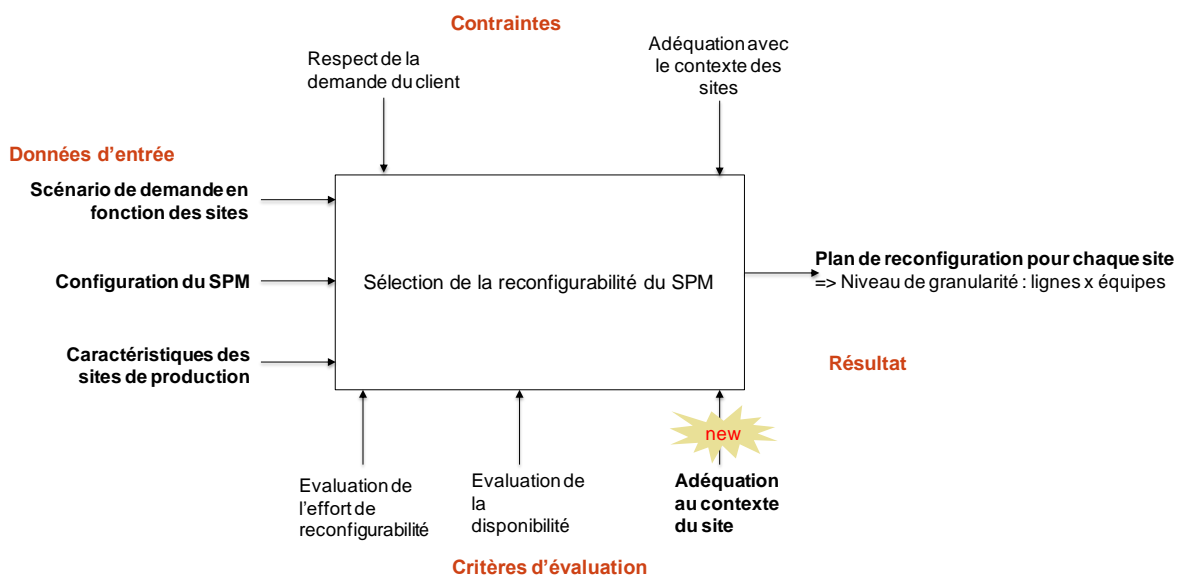


Figure 5-10 Principe de gestion de la reconfigurabilité du SPM

La gestion de la reconfiguration s'appuie sur trois types d'informations : (1) un scénario de la demande, (2) la description des caractéristiques de chaque site de production envisagé et (3) une configuration initiale du SPM. Le scénario de la demande (un exemple est donné dans le Tableau 5-3) décrit pour chaque site de production, le volume de produits à fabriquer et le délai accordé pour satisfaire la production.

Tableau 5-3 Exemple de scénario de demande

Sites de production	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>..</sub>	S <sub>n</sub>
Volume de produits	20000	18000	16000	5000
délat en jours	208	182	156	104

Le besoin de reconfiguration du SPM doit nécessairement répondre à deux contraintes : d'une part, l'atteinte du niveau de réactivité nécessaire pour satisfaire la demande du client et d'autre part, vérifier que la nouvelle configuration s'adapte au contexte du site de production. Chaque site de production est unique par sa demande et par ses caractéristiques. L'entreprise peut envisager une stratégie différente pour chaque site. Chaque stratégie dépend de l'importance dont revête le site et qui peut dépendre par exemple de la vocation de l'entreprise de se positionner sur un nouveau marché grâce à l'acquisition du contrat en cours même si il n'est pas rentable à court terme.

Lorsqu'un besoin d'adaptation de la configuration du SPM est exprimé, une reconfiguration du SPM est proposée. Le choix de la nouvelle reconfiguration est fait dans un objectif de minimisation des coûts de reconfiguration nécessaires, de maximisation du taux d'utilisation de la nouvelle configuration du SPM et de maximisation de la mobilité de la dite configuration. Ce dernier critère est intégré pour évaluer le niveau d'adéquation entre la reconfiguration proposée et le site de production concerné.

Le plan de reconfiguration dépend de la configuration initiale choisie pour le premier site. La configuration initiale est conçue pour le premier site identifié. Dans un environnement incertain, bien que l'entreprise envisage une rentabilité sur plusieurs sites, la réalité économique fait qu'elle ne peut avoir une visibilité commerciale que sur un ou quelques sites. La reconfiguration du SPM se fait alors d'une manière incrémentale (cf. Figure 5-3) : le SPM est donc conçu en tenant compte des exigences du premier site identifié et confirmé, et est ensuite adapté aux prochains sites au fur et à mesure de leur confirmation.



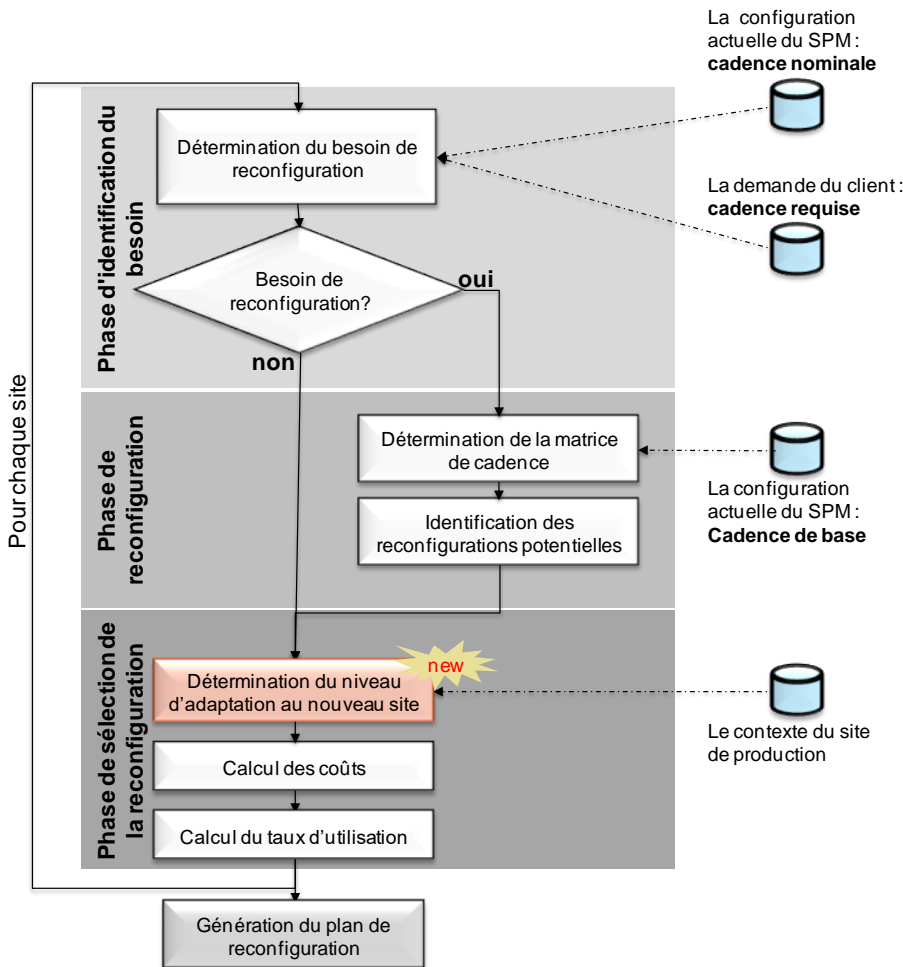


Figure 5-11 Génération du plan de reconfiguration du SPM pour un scénario de demande

La démarche de génération du plan de reconfiguration du SPM est présentée dans la figure 5-11. Cette démarche est constituée de trois phases : une phase d'identification du besoin de reconfiguration, une phase de reconfiguration et une dernière phase de sélection. Chacune de ces trois sera détaillée dans les sections qui suivent.

Dans un souci de clarification, nous utiliserons les termes de *site de production présent* pour désigner le site de production sur lequel le SPM vient d'être mobilisé en utilisant une *configuration i du SPM*. De même, le terme *site de production futur* renvoie à la localisation géographique suivante sur laquelle le SPM va être ensuite mobilisé et qui peut nécessiter une nouvelle configuration *i+1* du SPM.

### 5.5.1.1 IDENTIFICATION DU BESOIN DE RECONFIGURATION

A chaque changement de site de production, une reconfiguration du SPM peut être nécessaire. Le besoin de reconfiguration est exprimé dès lors que la configuration présente du SPM n'est plus adaptée aux exigences de production du futur site de production. L'adaptation aux nouvelles exigences peut nécessiter soit une augmentation ou une baisse de la capacité de production du SPM.

Le besoin de reconfiguration peut être analysé en comparant d'une part, la capacité exigée par le futur client (i.e. *site de production futur*) et d'autre part, la capacité fournie par la configuration actuelle du SPM. Cette capacité est exprimée par un délai nécessaire pour produire une quantité donnée de produit. L'écart entre la capacité requise et la capacité fournie par le SPM détermine la réponse du SPM pour le *futur site de production*. Le SPM peut répondre soit en avance (en cas de surcapacité) soit en retard (en cas de sous capacité) par rapport au délai demandé par le client.

Le besoin de reconfiguration est exprimé selon l'écart observé, qui se traduit par une durée d'avance ou de retard dans la production de la quantité demandée de produits. Si le SPM répond en retard à la demande du client, il est nécessaire d'augmenter sa capacité par l'ajout de d'autres lignes de production ou en multipliant le nombre d'équipes intervenant sur le système. Dans le cas contraire, i.e. lorsqu'il y a le SPM répond en avance à la demande du client, il peut être économiquement intéressant de réduire sa capacité afin de minimiser les coûts de production. Le dépassement de l'écart toléré par le client déclenche un besoin de reconfiguration du SPM. La reconfiguration va consister à adapter le nombre de lignes de production et nombre d'équipes intervenant sur le système dans le but d'obtenir le niveau de capacité nécessaire pour la satisfaction de la demande du client.

### 5.5.1.2 APPROCHE DE GENERATION DE LA RECONFIGURATION DU SPM

La reconfiguration du SPM vise à proposer une structure du système de production qui permet de satisfaire la demande du client. La modification de la configuration consiste à faire varier le nombre de lignes de production et le nombre d'équipes intervenants<sup>44</sup> sur le système. Ces deux variables conduisent à la variation de la capacité du système et de produits fabriqués par jours. Pour chaque combinaison (nombre d'équipes, nombre de lignes) on peut déterminer une cadence nominale du SPM.

Par exemple, une ligne de production utilisée par une seule équipe par jour ayant une capacité nominale de 16 produits fabriqués par équipe, peut avoir les cadences suivantes selon les configurations choisies (cf. Figure 5-12)..

Capacité modulaire de base

	L1	L2	L3
E1	16	32	48
E2	32	64	96
E3	48	96	144

Nombre de lignes de production dans le SPM

Nombre de lignes de production dans le SPM

**Exemple de deux configurations potentielles fournissant la même capacité !!**

Figure 5-12 Exemple de calcul de la cadence obtenue en fonction de la reconfiguration du SPM

La question qui se pose à ce stade concerne le critère de choix à utiliser pour privilégier l'une des deux configurations du SPM (soit 1 ligne et 2 équipes ou 2 lignes en 1 équipe).

<sup>44</sup> Passer par exemple d'une configuration travaillant en 2x8h à une configuration en 3x8.

L'approche de sélection de la reconfiguration adéquate du système de production a été souvent (Koren and Shpitalni, 2010; Spicer \* et al., 2005; Youssef and ElMaraghy, 2007) conduite dans un contexte de système de production adapté pour une localisation géographique. Dans un tel contexte, l'objectif de la reconfiguration est de fournir le niveau de réactivité nécessaire face aux variations de la demande client en tenant compte des enjeux technico-économiques (minimisation des coûts et maximisation de la disponibilité du système) (Youssef and ElMaraghy, 2007). A titre d'exemple (Koren and Shpitalni, 2010) proposent de considérer quatre critères de comparaison : la cadence du système en cas de fonctionnement dégradé, le coût d'investissement, le niveau d'extensibilité du système et la l'espace occupé par la configuration. En plus de ces considérations technico-économiques, la mobilité successive multi sites du SPM nécessite de prendre en compte l'adaptation au contexte du site de production. Une reconfiguration qui est optimisé pour un site peut ne l'est pas pour une autre localisation. En plus de l'objectif du choix de la reconfiguration qui minimise les coûts et qui maximise la disponibilité du SPM nous proposons d'intégrer l'indicateur de mobilité pour tenir compte de l'adéquation de la reconfiguration proposée par rapport au site de production concerné.

La démarche de sélection de la reconfiguration du SPM que nous proposons s'appuie sur 2 étapes (cf. Figure 5-11) :

### *1. Détermination de la matrice de cadence*

En se basant sur l'analyse de la *configuration existante du SPM*<sup>45</sup>, nous déterminons la cadence nominale correspondant à une ligne de production fonctionnant avec une équipe. Cette *cadence de base* est utilisée pour "générer" la *matrice de cadences* comme il l'a été illustré la Figure 5-12. Cette matrice renseigne sur les cadences qui peuvent être satisfaite par l'ensemble de reconfigurations possibles du SPM.

### *2. Identification des reconfigurations potentielles*

La matrice de cadence sera particulièrement intéressante pour positionner la cadence de la configuration actuelle du SPM et aussi la cadence requise pour satisfaire la demande du client. L'objectif est de choisir la (ou les) configuration(s) du SPM assurant une configuration nominale proche de la capacité requise pour répondre à la demande du client.

---

<sup>45</sup> La dernière configuration du SPM qui a été utilisée sur un site de production

**Exemple** : une configuration du SPM composée de 2 lignes de production parallèles, chacune d'elles fonctionnent en 3 équipes. Cette configuration assure une cadence de 96 produits/jour. Afin d'honorer une demande sur un site de production de 5000 produits pendant 104 jours, il est nécessaire de posséder une cadence de 48,07 produits/jour.

La matrice de cadence fournit ces informations :

		Capacité de base			Capacité requise pour le futur site de production		
		L1	L2	L3	Nombre de lignes de production dans le SPM		
Nombre de lignes de production dans le SPM	E1	16	32	48			
	E2	32	64	96			
	E3	48	96	144			

Capacité nominale de la configuration actuelle du SPM

Figure 5-13 Exemple illustratif de la matrice de cadence

Pour répondre à la future demande, deux configurations du SPM peuvent être envisagées : une configuration en 1 ligne fonctionnant en 3 équipes ou une configuration en 3 lignes de production fonctionnant en 1 équipe.

Afin de choisir la configuration qui serait la mieux adaptée pour répondre à la demande du client, nous évaluons l'effort de reconfiguration nécessaire pour passer de la configuration actuelle du SPM (par exemple 2 lignes x 3 équipes) à la configuration future (par exemple 1 ligne x 3 équipes ou 3 lignes x 1 équipe).

### 5.5.1.3 LA SELECTION DE LA RECONFIGURATION DU SPM

Trois critères sont identifiés pour l'évaluation du SPM suite à une reconfiguration : primo, l'appréciation de l'effort de reconfiguration, puis, l'évaluation du taux d'utilisation de la nouvelle configuration et enfin, l'appréciation de l'adéquation au contexte du site.

#### 1. L'effort de reconfiguration

L'effort de reconfiguration est évalué via l'appréciation des coûts de reconfigurations nécessaires pour évoluer de la configuration actuelle du SPM vers la configuration future nécessaire. Le passage de la configuration actuelle du SPM à une configuration future nécessite soit de rajouter des modules au SPM soit d'en supprimer. L'ajout de modules est nécessaire dans le cas d'augmentation de la capacité du système, tandis que leur suppression est requise dans le cas de la réduction de la capacité du système. L'évaluation des coûts de reconfigurations fait la distinction entre ces deux cas.

- **L'évaluation des coûts de reconfiguration dans le cas "réduction de capacité".**

Lorsqu'une réduction de la capacité de production est requise, la suppression des modules est nécessaire. La suppression des modules signifie que certains modules ne vont pas être utilisés dans la future configuration du SPM. Les modules non utilisés doivent être "stockés" sur un site donné<sup>46</sup>. Les coûts de reconfiguration dans ce cas tiennent compte des coûts induits par les opérations nécessaires pour la suppression des modules. Ces coûts concernent les coûts d'études, coût d'intégration et coûts de stockage des modules non utilisés (cf. figure 5-14).



Figure 5-14 les attributs intervenants dans la définition des coûts de reconfiguration dans la cas "réduction de capacité"

Les *coûts d'études* concernent les coûts de l'ensemble des ressources humaines et matérielles mobilisées pour l'étude de la reconfiguration du système. Les *coûts d'intégration* concernent les coûts engendrés par les opérations d'adaptation physique de la configuration du SPM après suppression des modules concernés. Enfin l'activité de stockage des modules génère un coût qui dépend par exemple du nombre de modules à stocker, leurs valeurs, le coût du foncier et des ressources utilisées pendant le stockage, le coût d'acheminement jusqu'au site de stockage ainsi que les différents coûts fixes associés aux modules (amortissement de l'investissements, assurances, etc.), entre autres.

- **L'évaluation des coûts de reconfiguration dans le cas "augmentation de capacité"**  
L'augmentation de la capacité du SPM nécessite l'ajout de modules techniques (lignes de productions) ou humains (nombre d'équipe). L'ajout de ces modules génère des coûts de reconfiguration à prendre en compte dans l'évaluation. Ces coûts concernent les coûts d'études, le coût d'intégration et le coût d'acquisition des modules nécessaires.



Figure 5-15 les attributs intervenants dans la définition des coûts de reconfiguration dans la cas "augmentation de capacité"

Les *coûts d'études* concernent les coûts de l'ensemble des ressources humaines et matérielles mobilisées pour l'étude de la reconfiguration du système. Les *coûts d'intégration* concernent les coûts engendrés par les opérations d'adaptation physique de la configuration du SPM après l'intégration des nouveaux modules.

<sup>46</sup> Qui peut être un site fixe défini à l'avance ou une localisation temporaire.

Les coûts d'acquisition des nouveaux modules nécessaires dépendent de leur provenance :

- En effet, soit ces modules ont été stockés quelque part car ils n'étaient pas utilisés dans la configuration actuelle du SPM et donc pour les besoins de la configuration future ils nécessitent d'être acheminés sur le nouveau site de production.
- Si ces modules ne sont pas disponibles, les coûts d'acquisitions dans ce cas vont concerner les coûts d'investissements et d'acheminement sur site.

La sélection de la reconfiguration adéquate pour le SPM va se baser sur le choix de celle qui minimise l'effort de reconfiguration, i.e. les coûts de reconfiguration nécessaire.

### 2. Taux d'utilisation de la configuration

Dans un objectif d'efficacité<sup>47</sup>, le taux d'utilisation permet de renseigner sur le niveau d'occupation du SPM. Les reconfigurations qui maximisent l'occupation du système seront privilégiées. Le taux d'utilisation est évaluée la cadence requise par le client par rapport à la cadence fournie par la configuration du SPM (cf. formule (28)).

$$\text{Taux utilisation} = \frac{\text{cadence requise}}{\text{cadence nominale}} \quad (66)$$

### 3. Adéquation au contexte du site de production

Le niveau d'adéquation de la reconfiguration proposée par rapport au contexte du site de production sur lequel le SPM interviendra. Ce dernier est évalué en utilisant l'indicateur de mobilité introduit dans le chapitre 3 (cf. §3.5.3). L'indicateur de mobilité permet de lier d'un côté la description de la configuration du SPM est d'un autre côté, les caractéristiques du site de production.

## 5.5.2 CONCLUSION SUR LA GESTION DE LA RECONFIGURATION DU SPM

La gestion de la reconfiguration du SPM concerne l'adaptation de l'architecture (aspect interne) du SPM. Notre proposition s'est axée sur la nécessité de la prise en compte, dans la gestion de la reconfigurabilité du système, des aspects d'adaptation au contexte local de chaque site de production. En plus de la mesure de l'effort de reconfigurabilité nécessaire pour s'adapter à l'évolution de la demande, il est primordial de s'assurer que la nouvelle configuration proposée s'adapte au contexte du site de production, via l'utilisation de l'indicateur de mobilité. En outre, La mobilité successive multi sites du système de production, exige aussi une reconfigurabilité de la chaîne logistique amont du SPM.

Dans cette partie, Une démarche de gestion de la reconfiguration du SPM a été proposée. Cette démarche se démarque d'abord par l'intégration de la mesure de l'effort de reconfigurabilité nécessaire pour s'adapter à l'évolution de la demande, ensuite l'indicateur

<sup>47</sup> L'efficacité du système traduit le niveau d'atteinte des objectifs fixés.

mobilité a été utilisé pour renseigner sur le niveau d'adéquation entre la reconfiguration proposée du SPM et le contexte du site de production.

## 5.6 CONCLUSION GENERALE DU CHAPITRE 5

L'objectif de ce chapitre est d'aborder la problématique de mobilité successive multi sites du SPM. A travers une analyse, le besoin d'adaptabilité du SPM a été mis en évidence. Ce besoin d'adaptabilité est considéré selon deux niveaux : un besoin de reconfiguration de l'architecture interne du SPM et un besoin de reconfiguration externe de la chaîne d'approvisionnement.

Lors de l'analyse de la reconfiguration de l'architecture interne du SPM, l'accent est mis sur la nécessité de prendre en compte, dans la gestion de la reconfigurabilité du système, les aspects d'adaptation au contexte local de chaque site de production. La nouvelle configuration proposée s'adapte au contexte du site de production, via l'utilisation de l'indicateur de mobilité. Une démarche de gestion de la reconfiguration du SPM est ainsi proposée. Cette démarche se démarque d'abord par l'intégration de la mesure de l'effort de reconfigurabilité nécessaire pour s'adapter à l'évolution de la demande. Ensuite l'indicateur de mobilité est utilisé pour renseigner le niveau d'adéquation entre la reconfiguration proposée du SPM et le contexte du site de production.

La reconfiguration de la chaîne logistique amont du SPM se pose pour chaque site de production. Cependant, dans ce chapitre on se positionne à l'échelle d'analyse multi sites. Une question important a été soulevé : considéré l'importance du site de production dans la stratégie de production. Cette question a nécessité la formalisation d'un autre niveau de décision intégrant le positionnement stratégique de l'entreprise vis-à-vis de plusieurs sites de production.

La plupart des modèles et méthodes exposés dans ce chapitre sont mis en application sous forme de démonstrateurs de recherches. Ces démonstrateurs ont pour objectif de fournir une démonstration des contributions théoriques de nos travaux. Plus spécifiquement, nous cherchons à démontrer l'applicabilité des modèles présentés et fournir les premiers éléments de réflexion pour amener le décideur/concepteur/ou architecte du système à analyser plusieurs scénarios. Ces démonstrateurs sont alimentés avec les données d'un d'étude industriel qui fera l'objet d'une présentation dans le chapitre suivant.

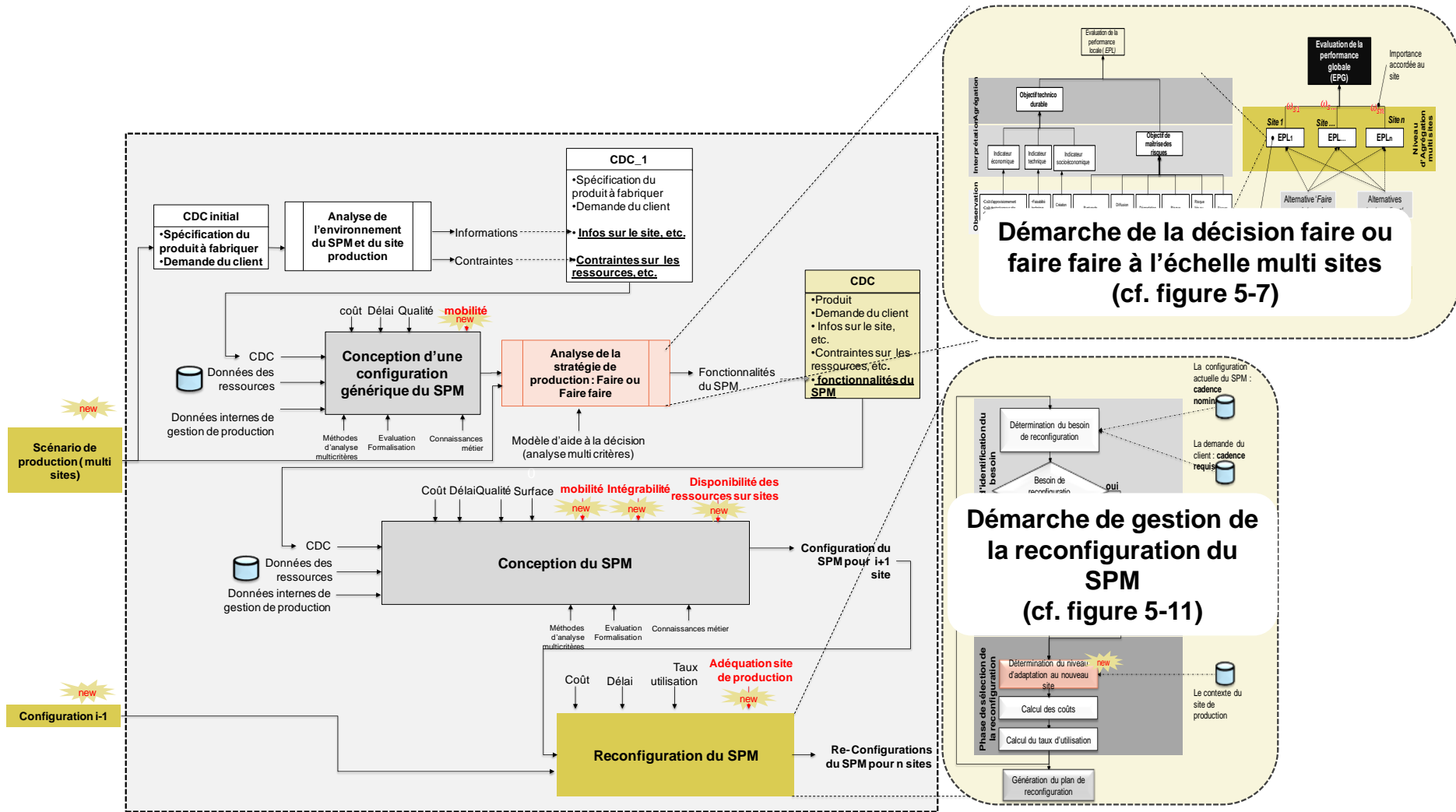


Figure 5-16 Synthèse de la démarche de conception du SPM adaptée pour le contexte multi site



## 6 CONCLUSION GENERALE

---



## 6.1 CONTEXTE

Les travaux de recherche exposés dans ce manuscrit visent à contribuer à la formalisation d'un cadre de conception de Système de Production Mobile (SPM). Le concept de SPM consiste à mobiliser le même système pour satisfaire successivement plusieurs commandes de clients géographiquement dispersés, directement sur le site du client final. Ce concept permet de concilier les objectifs stratégiques de l'entreprise et la rentabilité économique des moyens de production. La littérature sur ce sujet ne fait apparaître aucune démarche de conception formalisée pour ce type de système.

Partant d'un besoin industriel, appliqué au développement de solutions de centrales solaires thermodynamiques à concentration, notre contribution vise à combiner des démarches scientifiques en compléments de données et scénarios industriels. Le caractère confidentiel du projet industriel nous a conduits à utiliser un jeu de données factice mais néanmoins réaliste. Nous nous sommes intéressés à deux concepts complémentaires pour le système de production : la mobilité (pour aller d'un site d'implantation à un autre) et la reconfigurabilité (pour s'adapter aux spécificités de chaque site : produit à fabriquer, volume, réseaux de partenaires, etc.). Les solutions développées sont validées par le développement d'un démonstrateur des procédés caractéristiques de ce système de production.

## 6.2 CONTRIBUTIONS

La principale problématique de conception d'un SPM réside dans l'incertitude des données liées aux différents sites. Idéalement, la conception d'un tel système doit intégrer les spécificités de tous les sites à venir. Cependant, au moment de la conception du système tous les sites ne sont pas identifiés et leurs informations et spécificités afférentes à chacun sont difficilement accessibles. Nous avons en conséquence, proposé une approche de conception scindée en deux temps :

- d'une part, la conception d'un SPM en tenant compte uniquement des spécificités du premier site et en exigeant un indice de mobilité uniquement pour ce site. Notre proposition permet de construire cet indice de mobilité en intégrant les niveaux de satisfaction (vis à vis des décideurs) de cette mobilité, les données intrinsèques au système de production et les spécificités du site d'implantation
- d'une autre part, à partir de la configuration initiale sur le premier site, une reconfiguration du SPM pour tenir compte des spécificités d'autres sites en considérant un scénario de production. A ce niveau nous développons une démarche itérative qui prend en compte les exigences des différents sites pour aller vers une approche de conception globale.

Afin de répondre à ces deux objectifs, nous avons structuré notre apport en cinq parties :

**LE PREMIER CHAPITRE** introduit les problématiques et verrous scientifiques liés à notre sujet de recherche. Deux questions principales ont été identifiées, qui se déclinent en sous questions spécifiques :

- 1 *Dans quelle mesure le concept de mobilité peut être intégré dans une démarche de conception de système de production? (chapitre 3 et 4)*
  - 1.1 Comment formaliser une démarche de conception de système de production ?
  - 1.2 Quelles analyses faut-il conduire en amont de la conception ?
  - 1.3 Quelles sont les exigences de la mobilité ?
  - 1.4 Comment le concept de mobilité peut être considéré le long du processus de conception de système de production ?
  - 1.5 Comment formaliser la décision de faire ou faire-faire dans un contexte de mobilité du système de production ?
  - 1.6 Comment générer la configuration optimale du SPM ?
- 2 *Dans quelle mesure le concept de mobilité successive multi-site du système de production peut être intégré dans la démarche d'analyse du système de production? (chapitre 5)*
  - 2.1 Quelles sont les nouvelles exigences induites par la mobilité successive multi-sites?
  - 2.2 Comment gérer le besoin de reconfigurabilité du SPM pour un scénario de production défini?
  - 2.3 Comment gérer le besoin de reconfigurabilité de la chaîne logistique amont du SPM.

**LE DEUXIEME CHAPITRE** de ce manuscrit a pour objectif de poser les bases scientifiques de notre proposition en regardant d'une part la performance industrielle et, d'autre part, les méthodes de conception des systèmes de production., Nous nous sommes intéressés, dans un premier temps, aux systèmes de production de façon générale. Nous avons identifié les différents paradigmes de production qui ont marqué l'évolution de l'industrialisation. Les systèmes de production reconfigurables permettent d'assurer la réactivité nécessaire en termes de capacité et capabilité tout en garantissant une efficience économique par rapport aux systèmes flexibles par exemple. Ceci caractérise des aspects de reconfigurabilité interne au système de production (usine ou unité flexible). Au regard de la fluctuation et des changements qui caractérisent notre contexte (adaptabilité d'un site à l'autre), l'intégration du concept de reconfigurabilité est nécessaire dans notre démarche mais avec un périmètre plus externe au sens du système de production. Il intègre d'une part la reconfigurabilité interne du système mais aussi une dimension du système de production et de sa chaîne d'approvisionnement pour migrer d'un site d'implantation à un autre. Cette analyse s'appuie sur les concepts d'analyse système des SP et sur la notion de vue : interne, externe, fonctionnelle, décisionnelle, organisationnelle, ressources et informationnelles.

La suite de ce chapitre est dédiée au processus de conception des systèmes de production. Nous avons exploré les démarches de conception de ces systèmes. Une revue de la littérature nous a permis d'identifier un processus de conception composé de quatre phases : une phase

d'identification du besoin, une phase de conception préliminaire, une phase de conception architecturale et une phase de conception détaillée. Des indicateurs représentatifs des questions posées en terme de mobilité et de reconfigurabilité ont été développés dans ce processus de conception.

**LE TROISIEME CHAPITRE** aborde le concept de mobilité de production qui est à deux niveaux : mobilité de modules et mobilité de système. Bien plus qu'une caractéristique désignant une aptitude de mouvement du système, la mobilité appelle à de nouvelles spécificités dans l'analyse et la conception d'un système de production. Nos travaux contribuent à intégrer les différents aspects de la mobilité des systèmes de production existants. Nous ajoutons les dimensions d'évaluation de la mobilité (dans la phase de proposition de la configuration pour le premier site développé dans le chapitre 4) et mobilité sur plusieurs sites (dans la phase de reconfiguration d'une solution premier site à n sites développé dans le chapitre 5) comme critères à évaluer dans le processus de conception. La figure 6-1 ci-dessous représente les critères déjà proposés dans la littérature et nos apports.

Aspects de la Mobilité	Upton 1993	Shi 1998	Miltburg 2005	Stållström and Jackson 2007	(Koren and Shpitalni 2010)	(Rösio 2012)	(Erwin Rauch 2015)	(Fox 2015)	Benama 2015
Analyse stratégique		■	■						■
Analyse Opérationnelle	■			■	■	■	■	■	■
Echelle module					■				■
Echelle système de production				■	■	■			■
Aspects techniques					■	■			■
Aspects Humains						■		■	■
Mobilité géographique				■		■	■	■	■
Dépendance du site d'installation								■	■
<b>Mobilité sur plusieurs sites</b>									■
Méthode de conception							■		■
<b>Evaluation de la mobilité</b>									■

■ mentionné      ■ Illustré par un exemple      ■ Décrit en détail

**Figure 6-1** Nos apports concernant les aspects de la mobilité : évaluation de la mobilité dans le chapitre 4 et mobilité successive sur plusieurs sites dans le chapitre 5.

Cette construction d'indicateurs de mobilité est basée sur une vision et une analyse des phases de vie d'un système mobile de production. Par exemple les phases récurrentes de transports, de montage et démontage et potentiellement de stockage entre 2 sites, complètent les évaluations classiques. Les indicateurs de mobilité pour un site sont construits sur différents critères liés aux modules techniques et modules humains, ainsi que des critères liés aux

différentes phases de vie. Nous avons intégré ces critères dans des outils d'aide à la décision (pour prendre en compte les préférences des décideurs) et dans des fonctions d'agrégation (en adéquation avec le contexte de décision).

**LE CHAPITRE QUATRE** propose une approche de conception du SPM adapté à un site de production. Il développe la proposition faite au chapitre précédent. La démarche part d'une analyse des besoins au niveau stratégique pour affiner et consolider le Cahier Des Charges (CDC). La démarche commence en générant une pré-configuration qui reprend toutes les étapes du processus de réalisation. Il s'ensuit une analyse du "faire ou faire-faire" qui va nous orienter sur : 1) la limite des opérations réalisées en interne de l'unité de production et 2) l'organisation et le choix de la chaîne d'approvisionnement. Nous proposons un modèle d'aide à la décision intégrant le concept de mobilité d'une part et, prenant en compte l'évaluation des performances technico-économiques et une évaluation des risques d'autre part. Les critères pris en compte (en plus de la mobilité) résultent d'une analyse des critères proposés dans la littérature.

Un critère d'intégrabilité est développé pour valider la faisabilité des configurations proposées. Ceci traduit principalement les interopérabilités physiques et contraintes d'interfaces entre les différents modules. Nous regardons également les interopérabilités entre les modules techniques et humains, pour intégrer les aspects de compétences nécessaires et disponibles sur le site.

La figure 6-2 ci-dessous résume l'approche de conception du SPM adaptée pour le contexte d'un seul site de production (figure résumée de la figure 4-2 page 127)

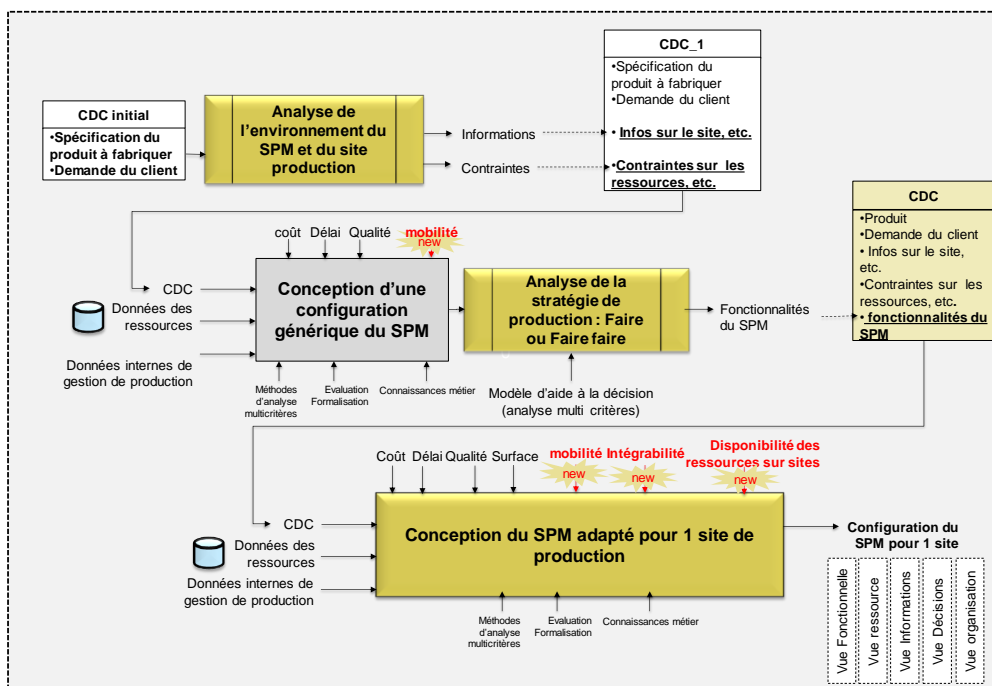


Figure 6-2 schéma récapitulatif de l'approche de conception du SPM adaptée pour le premier site de production

**LE CHAPITRE CINQ** introduit la dimension de mobilité successive multi-site. En partant d'une configuration pour un site, les contraintes multi-sites sont développées. Celles-ci se déclinent à deux niveaux :

- le potentiel d'adaptabilité d'un site à l'autre: on se limite à la modification de deux paramètres de conception : nombre de lignes de production et nombre d'équipes. On cherche ici à minimiser l'effort de reconfigurabilité (traduit au travers d'un modèle de cout de reconfiguration) entre la configuration n-1 et la configuration n du SPM.

- la rentabilité globale qui évalue sur plusieurs sites au travers d'un modèle d'aide à la décision les possibilités de "faire ou faire-faire". Le modèle du chapitre précédent est appliqué à chaque site dans le scénario de production. Un niveau supplémentaire de décision est ajouté, intégrant d'une part l'importance de chaque site pour l'entreprise et, d'autre part, la stratégie de l'entreprise au regard de tous les sites. Ces deux paramètres se retrouvent formalisés dans une fonction d'agrégation (l'opérateur GOWA).

Ce chapitre propose de construire un environnement d'évaluation globale tout en gérant un fort degré d'incertitude sur les données des sites de production. Néanmoins, notre approche n'intègre pas une analyse des incertitudes car notre objectif est de formaliser une démarche de (re)conception du SPM. La prise en compte des incertitudes dans les scénarios de production peut se présenter comme une perspective de nos travaux.

La figure 6-3 ci-dessous reprend l'approche de conception du SPM adaptée pour le contexte multi sites de production (résumé de la figure 5-4 page 223).

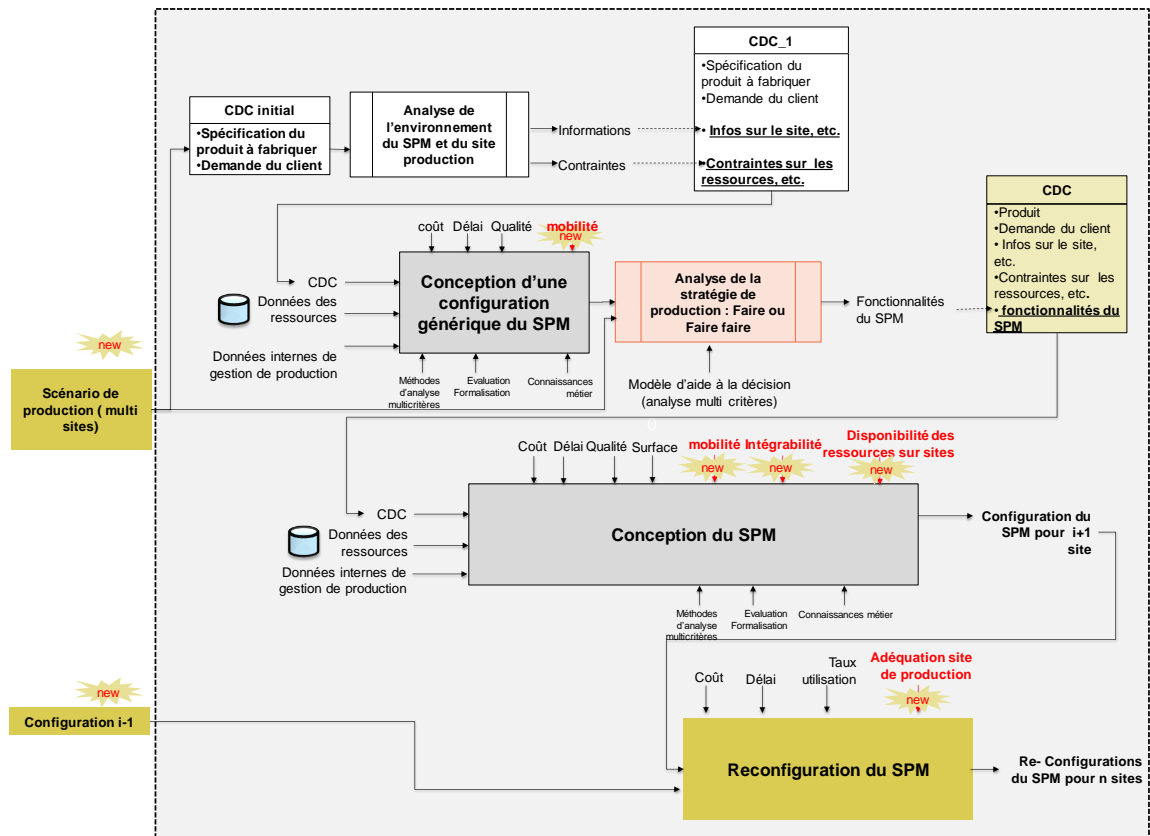


Figure 6-3 schéma récapitulatif de l'approche de conception du SPM adaptée pour le contexte multi sites de production

## 6.3 APPLICATIONS

**Un double usage de l'approche développée :** La problématique de sélection d'une configuration du SPM a été abordée dans le chapitre 4 (cf. § 4.5). A ce titre une approche de conception adaptée pour les SPMs a été exposée. La démarche adoptée s'inscrit dans le cadre où le site de production est imposé par le client. Dans ce cas de figure, c'est la configuration du SPM qui doit être adaptée aux caractéristiques et contraintes du site. Un autre cas de figure peut être imaginé : l'entreprise, propriétaire du SPM, se positionne dans le cas où il y a plusieurs sites de production qui sont envisageables. Dans ce cas, la question que se poserait le décideur est de savoir quel site de production est le mieux adapté pour la configuration existante du SPM dans un objectif de maximisation de la rentabilité ? Ce second cas de figure bien qu'il semble être moins conventionnel que le premier compte tenu de la réalité économique, permet toutefois de mettre en avant un double usage de la méthode proposée qui peut être envisagée moyennant une adaptation de la démarche.

**La quantité des données à manipuler** peut être soulignée également. Dans le but d'alléger les différents modèles utilisés, une analyse de sensibilité pour distinguer les données d'entrée utilisées et les paramètres clés peut être ajoutée.

## 6.4 LIMITES ET PERSPECTIVES



L'analyse des limites et perspectives de nos travaux peut être présentée selon trois aspects :

- L'évaluation de la mobilité du système,
- La conception du SPM pour un site d'implantation,
- La conception du SPM dans un contexte de mobilité successive multi sites.

#### **6.4.1 LIMITES ET PERSPECTIVES CONCERNANT L'EVALUATION DE LA MOBILITE DU SYSTEME**

**La démarche d'interprétation de la mobilité du système** n'est pas évidente : dans notre approche, on se réfère à l'expérience du décideur/concepteur du SPM pour interpréter l'indice de mobilité que nous proposons de quantifier par une valeur entre 0 et 1. La quantification de l'indice de mobilité facilite la comparaison (automatisée) de plusieurs configurations du SPM, mais :

- D'un part cette quantification ne donne pas une signification pratique de cette mobilité (*par exemple : comment interpréter une mobilité de 0.65?*) et, d'autre part,
- D'autre part, les différentes phases d'agrégation et d'interprétation mathématiques présentent l'inconvénient de la perte d'informations : on perd la trace (l'origine) de la mobilité du système: le système est (non) mobile car il est (non) transportable, (non) opérationnel, etc.

En outre, l'indicateur de mobilité peut être amélioré pour :

- d'un côté tenir compte du **potentiel de mobilité** : le système de production peut avoir une mobilité limitée en l'état, mais moyennant un effort cette mobilité peut être améliorée. L'objectif est de quantifier le potentiel, i.e. l'amélioration qui pourrait être apportée à la mobilité du système tout en donnant une idée sur l'effort nécessaire pour atteindre ce potentiel de mobilité. Ces efforts peuvent être exprimée en coût ou délai nécessaires par exemple.
- D'un autre côté pour mieux cerner l'indicateur de mobilité et l'intégrer comme un critère de décision dès la phase de conception du système, une **démarche d'interprétation de la valeur de mobilité** pourrait être proposée.

#### **6.4.2 LIMITES ET PERSPECTIVES CONCERNANT LA CONCEPTION DU SPM POUR UN SITE D'IMPLANTATION**

Le modèle de "faire ou faire-faire" peut être amélioré en intégrant une **évaluation des impacts environnementaux** relatifs à la décision (faire en interne ou externaliser) considérée.

Un indicateur d'intégrabilité a été introduit dans ce manuscrit. La mesure d'intégrabilité permet de renseigner sur la faisabilité d'une configuration par l'analyse de l'adéquation (interopérabilité physique) entre ses différents modules. En se basant sur cet indicateur, une configuration peut être considérée comme faisable si la mesure de l'indicateur d'intégrabilité dépasse un seuil. Cependant, il est difficile d'associer une signification concrète à la mesure de l'intégrabilité. Le choix de la valeur seuil revient au concepteur. En usant de son

expérience, le concepteur peut juger de la valeur du seuil d'intégrabilité à imposer. Une perspective de ce travail peut être la **proposition d'une démarche d'interprétation de l'indicateur d'intégrabilité** d'une configuration du SPM.

**La génération des configurations du SPM peut être intégrée dans un algorithme d'optimisation** multi-objectifs. Cette phase d'optimisation aura pour objectif de chercher la configuration du SPM qui s'adapte aux spécifications d'un site donné. C'est dans cette logique que nous avons veillé à "normaliser" tous les indicateurs de performances proposés pour faciliter une automatisation de la phase de génération des configurations par un accouplement avec un algorithme d'optimisation multi-objectifs (tels que un algorithme NSGAI (Agrawal et al. 1994)) et un indice de performance global dans le cas d'une optimisation mono-objectif (par exemple : un algorithme génétique (Goldberg 1989)) serait envisageable.

#### **6.4.3 LIMITES ET PERSPECTIVES CONCERNANT LA CONCEPTION DU SPM DANS UN CONTEXTE DE MOBILITE SUCCESSIVE MULTI SITES**

Notre approche n'intègre pas une **analyse des incertitudes** car notre objectif a été de formaliser une démarche de (re)conception du SPM. La prise en compte des incertitudes dans les scénarios de production peut se présenter comme une perspective de nos travaux.

Il existe aussi un **aspect dynamique** dont il faut tenir compte. Compte tenu de l'horizon de décision qui peut s'étaler sur plusieurs années, il est nécessaire de considérer l'évolution temporelle des critères tels que le coût de matière première ou la performance<sup>48</sup> des alternatives (internes ou externes). Le besoin d'intégration de cet aspect dynamique des performances du SPM nous conduit à nous poser la question de l'usage qui peut être fait des techniques de modélisation d'entreprise qui sont par ailleurs largement discutées dans la littérature pour la définition d'un cadre de modélisation générique du SPM.

Une réflexion sur **l'adaptation des techniques de modélisation d'entreprise pour la prise en compte du concept de mobilité du système de production** a été ébauchée. Le besoin de modélisation a été exprimé dans un but de facilitation de l'adaptation et la re-conception du système pour tout nouveau site de production. Dans cet objectif, une analyse des différents cadres de modélisation a été proposée en début de ce manuscrit. Cette réflexion vise à analyser dans quelle mesure, il est possible d'intégrer la mobilité dans les cadres de modélisation en entreprise. Nous avons tenté de répondre à cette question en explorant certaines pistes qui sont détaillées dans l'annexe 2 (cf. §10). Nous nous sommes particulièrement intéressés au concept des phases de vie du SPM ainsi qu'à la traduction du concept de mobilité dans les différentes vues de modélisation. Ces investigations méritent d'être approfondies et nous estimons qu'elles pourront faire l'objet de nouveaux travaux.

#### **6.4.4 UNE OUVERTURE VERS LES SYSTEMES PSS (PRODUCT SERVICE SYSTEMS)**

<sup>48</sup> Par exemple, on considère une capacité fixe des fournisseurs, au cours des sites de production, cette capacité est susceptible d'évoluer.

L'offre proposée par l'entreprise pour ses clients en termes de produit ou services a une incidence sur la définition des performances clés du SPM et impacte même la définition du SPM. Dans ce manuscrit, nos propositions ont été faites dans le cas où l'entreprise offre à ses clients un produit fabriqué par une usine mobile. L'analyse de l'offre de l'entreprise en terme de produit ou services ouvre de nouvelles perspectives de nos travaux. Nous citons quelques exemples de perspectives entre autres:

- Une analyse des acteurs concernés par le SPM et des engagements de chacun (propriétaire, opérateur du système, client, etc.),
- Une analyse des différents services qui peuvent être assurés avec un système de production mobile,
- Une analyse des différents modèles économiques orientés produit ou usage,
- Le choix des indicateurs de performances adéquats pour chaque situation (produit, service, système produit-service).



## 7 GLOSSAIRE

---



## A

**Aptitude** : une aptitude décrit une caractéristique ou une habilité technique d'une ressource traduisant sa capacité à être apte à effectuer certaines tâches. (Vernadat 1999)

**Architecture du système** : "*L'architecture décrit l'organisation fondamentale du système représentée d'une part, par ses constituants, leurs interrelations, leurs relations avec l'environnement et d'autre part par les principes guidant sa conception et son évolution.*" (Fiorèse and Meinadier 2012)

## C

**Cadre de modélisation** comporte une architecture de référence permettant de construire un modèle générique ainsi qu'une architecture particulière (modèle spécifique à un cas donné).

**Compétences** : une compétence est une caractéristique d'un individu ou d'un système intelligent. Les compétences concernent la mise en œuvre intégrée d'aptitudes, de traits de personnalité et aussi de savoir, pour mener à bien une mission. On peut distinguer les compétences apprises, c'est à dire un savoir appris et sanctionné par un diplôme et les compétences développées avec l'expérience. Trois catégories de compétences peuvent être distinguées : le savoir, le savoir-faire et le savoir-être (Vernadat 1999).

**Constructs** : composants utilisés pour la description d'une vue de modélisation.

**Cycle de mobilité** : désigne l'ensemble des phases nécessaires pour la mobilisation du SPM sur un site de production. A savoir : transport, montage sur site, production, diagnostique et démontage.

**cycle de production**: désigne la durée d'intervention du SPM sur un site de production.

## E

**Efficacité du système** : traduit le niveau d'atteinte des objectifs fixés. Des compromis ont pu être faits qui ont conduits à ne retenir qu'une partie des objectifs initiaux résultant de la finalité. (Fiorèse et Meinadier 2012).

**Efficience du système** : "traduit le niveau de consommation des ressources nécessaire à l'obtention des résultats. A résultats équivalents une solution système est plus efficiente qu'une autre si elle consomme moins de ressources. La coût global de possession est une des composantes de l'efficience". (Fiorèse et Meinadier 2012)

**Exigences système** (*system requirement*): Exigence technique spécifiant ce que l'on attend d'un système et servant de référence pour sa conception

## I

**Indicateur** : Attribut, caractéristiques et significatif, d'un phénomène et de son évolution, dans le temps ou dans son contexte. Cet attribut peut être de nature quantitative ou qualitative. Notamment utilisé dans les tableaux de bord d'avancement de projet et en évaluation des processus (Fiorèse and Meinadier 2012).

**Indicateur de performance** : "Un indicateur de performance est une donnée quantifiée, qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou système (réel ou simulé) par rapport à une norme, un plan ou un objectif déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'entreprise [Fortuin, 1988] [AFGI, 1992]. Tout indicateur de performance est vu comme un triplé [Bitton, 1990] associant trois paramètres : un objectif, une mesure et une variable essentielle ou variable d'état traduisant la performance (quantité, coût, délai) [Berrah, 2002]." extrait de la thèse de (Sperandio 2005)

**Ingénierie système** (*systems engineering*) : Approche collaborative et interdisciplinaire, fondée sur la science et l'expérience, qui englobe les activités pour concevoir, développer, faire évoluer et vérifier un ensemble de processus, produits et compétences humaines apportant une solution globalement optimisée à des besoins identifiés et acceptable par l'environnement (Fiorèse and Meinadier 2012).

**Interopérabilité** (*Interoperability*): Aptitude de plusieurs systèmes à inter-fonctionner, notamment par échange ou partage de données (Fiorèse and Meinadier 2012).

## M

**Mobilité** : « *n.f.*, du latin *mobilitas*. Propriété, caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction." (Larousse 2015).

**Modèle** est une représentation d'une abstraction d'une partie du monde réel, exprimée dans un langage de représentation.

**Modèle d'entreprise** : représentation de la structure et du comportement d'un système (entreprise)

## O

**Opération fonctionnelle** : est la plus petite unité de fonctionnalité autorisée dans une vue fonctionnelle en modélisation d'entreprise. Elle correspond à un ensemble d'actions élémentaires pouvant être exécutées par les entités fonctionnelles (ressources) de l'entreprise (Vernadat 1999).



## P

**Paradigme** : ce qui depuis Thomas Kuhn (1970) est compris comme une matrice avec ses lois propres. Dans le domaine de la recherche fondamentale ou appliquée, cette matrice doit être comprise comme un système de représentation avec ses propres postulats, ses présupposés et ses assumptions qui délimitent et autorisent une certaine manière de définir un problème, de communiquer à propos de celui-ci, de le comprendre, de le prévoir et même d'anticiper les manières de le résoudre. (Bourdages et Champagne 2012).

**PESTEL** : approche utilisée pour l'analyse de l'environnement général de l'entreprise. C'est un outil d'analyse pour l'évaluation de l'impact du contexte extérieur sur un projet ou mission de l'entreprise mais aussi l'impact de l'entreprise sur son contexte extérieur. On distingue plusieurs facteurs de l'environnement : politique (P), économique (E), socioculturel (S), technologique (T), écologique (E) et légal (L).

**Processus de conception** : mise en œuvre d'outils et de méthodes pour construire des modèles. En tenant compte de : points de vues, niveaux d'abstractions, niveaux de détails,

**Processus opérationnel** : *"un ensemble partiellement ordonné d'activités d'entreprise dont l'exécution a pour but de contribuer à la réalisation d'un des objectifs de l'entreprise."* (Vernadat 1999)

**Produit** : ce qui est (ou sera) fourni à un utilisateur pour répondre à son besoin [AFNOR, 1990] (Sperandio 2005). Dans ce manuscrit le produit désigne le "résultat" obtenu par le système de production mobile.

## S

**Scénario de demande** : constitue un ensemble d'informations (définition du produit, description de la demande du client, caractéristiques du site de production, données de gestion de production) dont la définition est nécessaire pour la conception d'une configuration du SPM.

**Site de production** : site géographique sur lequel l'unité de production mobile va opérer. Le terme *site d'implantation* est parfois utilisé. Dans le contexte de nos travaux un site de production est implicitement associé à une demande de client exprimé par un volume de demande d'un produit particulier.

**Système contributeur** : système nécessaire au système étudié au cours des stades de son cycle de vie. chaque système contributeur a son propre cycle de vie et doit être opérationnel lorsque le système étudié en a besoin (Fiorèse and Meinadier 2012).

**Système de production** : représente l'ensemble des ressources (hommes, machines, méthodes et processus) dont la synergie est organisée pour transformer de la matière première (ou composants) dans le but de créer un produit ou un service.

**Système de systèmes** : Système résultant du fonctionnement collaboratif de systèmes constituants indépendants (Fiorèse et Meinadier 2012).

## T

**Temps d'ouverture** : Temps correspondant à l'amplitude des horaires de travail et incluant les temps d'arrêt de désengagement (nettoyage, formation, essai, pause, maintenance préventive, etc.)

**Takt time** : désigne le rythme de production juste égal aux quantités vendues ((durée demandée par le client/nombre total de produits dans la durée).

## 8 REFERENCES

---

- Abdmouleh, Anis. 2004. « Composants pour la modélisation des processus métier en productique basés sur CIMOSA. » Metz: Université de Metz.
- Abdul-Hamid, Y T, A K Kochhar, et M K Khan. 1999. « An analytic hierarchy process approach to the choice of manufacturing plant layout. » *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 213 (4): 397-406. doi:10.1243/0954405991516868.
- « Agglomération de Bordeaux - Challenge mobilité Aquitaine. » 2015. Consulté le octobre 2. <http://www.challengedelamobilite.com/relais/Agglom%C3%A9ration-de-Bordeaux.1.html>.
- Agrawal, Ram Bhusan, Kalyanmoy Deb, Kalyanmoy Deb, et Ram Bhushan Agrawal. 1994. « Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space. »
- Alfieri, Arianna, Marco Cantamessa, Francesca Montagna, et Elisabetta Raguseo. 2013. « Usage of SoS Methodologies in Production System Design. » *Computers & Industrial Engineering* 64 (2): 562-72. doi:10.1016/j.cie.2012.12.007.
- Almeida-Dias, J., J.R. Figueira, et B. Roy. 2012. « A Multiple Criteria Sorting Method Where Each Category Is Characterized by Several Reference Actions: The Electre Tri-nC Method. » *European Journal of Operational Research* 217 (3): 567-79.
- Arinez, J. F., et D. S. Cochran. 1999. « Application of a Production System Design Framework to Equipment Design. » In *32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*.
- Arinez, Jorge F., et David S. Cochran. 1999. « Integration of Product Design and Production System Design. » In *Integration of Process Knowledge into Design Support Systems*, édité par Hubert Kals et Fred van Houten, 99-108. Springer Netherlands.
- Bellgran, Monica, et Kristina Sèafsten. 2010. *Production Development: Design and Operation of Production Systems*. Springer.
- Bellman, R. E., et L. A. Zadeh. 1970. « Decision-Making in a Fuzzy Environment. » *Management Science* 17 (4): B - 141. doi:10.1287/mnsc.17.4.B141.
- BENAMA, Youssef, Thècle ALIX, et Nicolas PERRY. 2014. « Supporting make or buy decision for reconfigurable manufacturing system, in multi-site context. » In . Ajaccio.
- Bennett, DJ, PL Forrester, et JS Hassard. 1990. « An application of decision process modelling to manufacturing system design. » *Omega* 18 (1): 23-33.
- Bourdages, Jade, et Eric Champagne. 2012. « Penser la mobilité durable au-delà de la planification traditionnelle du transport. » *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 11 (mai).
- Boysen, Nils, Malte Fliedner, et Armin Scholl. 2007. « A classification of assembly line balancing problems. » *European Journal of Operational Research* 183 (2): 674-93.
- Brans, Jean-Pierre, et Bertrand Mareschal. 2005. « Promethee Methods. » In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 163-86. International Series in Operations Research & Management Science 78. Springer New York.
- Camagni, Roberto, Maria Cristina Gibelli, et Paolo Rigamonti. 2002. « Urban mobility and urban form: the social and environmental costs of different patterns of urban expansion. » *Ecological economics* 40 (2): 199-216.
- Chakrabarti, A. 2001. « Sharing in design: categories, importance and issues. » In *Proc. Intl. Conf. on Eng. Design (ICED01)*, 563-70.

- Champagne, Eric, et Paula Negron-Poblete. 2012. « La mobilité urbaine durable : du concept à la réalité. » *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, n° Hors-série 11 (mai). <https://vertigo.revues.org/11779>.
- Chen, David, Guy Doumeingts, et François Vernadat. 2008. « Architectures for enterprise integration and interoperability: Past, present and future. » *Computers in Industry, Enterprise Integration and Interoperability in Manufacturing Systems*, 59 (7): 647-59. doi:10.1016/j.compind.2007.12.016.
- Chen, D., B. Vallespir, et G. Doumeingts. 1997. « GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology. » *Computers in Industry, Co-Operation in Manufacturing Systems, CIM at Work*, 33 (2-3): 387-94.
- Chen, Zhuozhi, et Rob Pooley. 2009. « Rediscovering Zachman Framework Using Ontology from a Requirement Engineering Perspective. » In , 3-8. IEEE. doi:10.1109/COMPSAC.2009.107.
- Chisholm, A. W. J. 1990. « Nomenclature and Definitions for Manufacturing Systems. » *CIRP Annals* 39 (2): 735-42. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsid=19479478>.
- CNRTL. 2015. « PRODUCTION : Etymologie de PRODUCTION. » Consulté le mai 12. <http://www.cnrtl.fr/etymologie/production>.
- Cochran, David S., Jorge F. Arinez, James W. Duda, et Joachim Linck. 2002. « A decomposition approach for manufacturing system design. » *Journal of manufacturing systems* 20 (6): 371-89.
- Collignan, Arnaud. 2011. « Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: Application à une structure aéronautique. » Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Deb, Kalyanmoy, et Kaisa Miettinen. 2008. *Multiobjective Optimization: Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer Science & Business Media.
- Décret n°77-1043. 1977. 77-1043.
- Deif, Ahmed M., et Waguih ElMaraghy. 2007. « Investigating Optimal Capacity Scalability Scheduling in a Reconfigurable Manufacturing System. » *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32 (5-6): 557-62.
- Derringer, George, et Ronald Suich. 1980. « Simultaneous Optimization of Several Response Variables. » *Journal of Quality Technology*.
- Doumeingts, G., et Y. Ducq. 2001. « Enterprise Modelling Techniques to Improve Efficiency of Enterprises. » *Production Planning & Control* 12 (2): 146-63.
- Doumeingts, G, Y Ducq, B Vallespir, et S Kleinhans. 2000. « Production management and enterprise modelling. » *Computers in Industry* 42 (2-3): 245-63.
- Doumeingts, Guy. 1984. « Méthode GRAI: méthode de conception des systèmes en productique. » Université de Bordeaux I.
- Doumeingts, Guy, Bruno Vallespir, Didier Darricau, et Michel Roboam. 1987. « Design methodology for advanced manufacturing systems. » *Computers in Industry* 9 (4): 271-96.
- Dowlatshahi, S. 1996. « The role of logistics in concurrent engineering. » *International Journal of Production Economics* 44 (3): 189-99.
- Duda, James Wallace. 2000. « a decomposition based approach to linking strategy performance measurement and manufacturing system design. » Ph.D, Massachusetts institute of technology.

- Dyer, James S. 2005. « Maut — Multiattribute Utility Theory. » In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 265-92. International Series in Operations Research & Management Science 78. Springer New York.
- Dyer, Jeffrey H., et Harbir Singh. 1998. « The Relational View: Cooperative Strategy and Sources of Interorganizational Competitive Advantage. » *Academy of Management Review* 23 (4): 660-79.
- ElMaraghy, W. H., et R. J. Urbanic. 2004. « Assessment of Manufacturing Operational Complexity. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 53 (1): 401-6.
- ElMaraghy, Hoda A. 1993. « Evolution and Future Perspectives of CAPP. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 42 (2): 739-51.
- . 2005. « Flexible and Reconfigurable Manufacturing Systems Paradigms. » *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (4): 261-76.
- . 2006. « Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. » *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 17 (4): 261-76.
- ElMaraghy, Hoda A., et H.-P. Wiendahl. 2009. « Changeability – An Introduction. » In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, édité par Hoda A. ElMaraghy, 3-24. Springer Series in Advanced Manufacturing. Springer London.
- Erwin Rauch, Patrick Dallasega. 2015. « Mobile On-site Factories – scalable and distributed manufacturing systems for the construction industry. »
- ESPRIT Consortium AMICE, éd. 1993. *CIMOSA: Open System Architecture for CIM*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Ferreboeuf, Claude. 2000. « Coût d'obtention de la qualité. » *Base documentaire Technique de l'ingénieur*.
- Figueira, José, Vincent Mousseau, et Bernard Roy. 2005. « Electre Methods. » In *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 133-53. International Series in Operations Research & Management Science 78. Springer New York.
- Fiorèse, Serge, et Jean-Pierre Meinadier. 2012. *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*. AFIS. Cépaduès Éditions.
- Flores, Alberto Jose. 2005. « Contribution aux méthodes de Conception modulaire de produits et processus Industriels. » INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.
- Fox, Stephen. 2015. « Moveable factories: How to enable sustainable widespread manufacturing by local people in regions without manufacturing skills and infrastructure. » *Technology in Society* 42 (août): 49-60.
- Gero, John S. 1990. « Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design. » *AI Mag.* 11 (4): 26-36.
- Gero, John S., et Udo Kannengiesser. 2004. « The situated function–behaviour–structure framework. » *Design Studies* 25 (4): 373-91. doi:10.1016/j.destud.2003.10.010.
- Gerwin, Donald. 1993. « Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. » *Management Science* 39 (4): 395-410.
- Goldberg, David E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. 1st éd. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Groover, Mikell P. 2007. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. 3rd éd. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Press.

- GRP. 1999. « La Modélisation d'Entreprise : le point de vue productique. » Document de référence du GT5 « Modélisation d'Entreprise » du GRP version 1.1.
- Gupta, D., et J. A. Buzacott. 1989. « A framework for understanding flexibility of manufacturing systems. » *Journal of Manufacturing Systems* 8 (2): 89-97.
- Harrington, E.C. 1965. « The desirability function. » *Industrial Quality Control* 21 (10): 494-98.
- Hartshorne, Charles H., et Paul Weiss. 1932. « Collected Papers of Charles Sanders Peirce, Volumes I and II: Principles of Philosophy and Elements of Logic. » Harvard University Press. <http://www.hup.harvard.edu/catalog.php?isbn=9780674138001>.
- Hata, T., S. Kato, et F. Kimura. 2001. « Design of product modularity for life cycle management. » In *Proceedings EcoDesign 2001: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, 2001*, 93-96.
- Henderson, Rebecca M., et Kim B. Clark. 1990. « Architectural Innovation: The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms. » *Administrative Science Quarterly* 35 (1): 9-30.
- Houshmand, Mahmoud, et Bizhan Jamshidnezhad. 2006. « An extended model of design process of lean production systems by means of process variables. » *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22 (1): 1-16.
- Ho, William, Xiaowei Xu, et Prasanta K. Dey. 2010. « Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. » *European Journal of Operational Research* 202 (1): 16-24.
- Huang, Chun-Che, et A. Kusiak. 1998. « Modularity in design of products and systems. » *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 28 (1): 66-77.
- Hwang, Ching-Lai, Young-Jou Lai, et Ting-Yun Liu. 1993. « A new approach for multiple objective decision making. » *Computers & Operations Research* 20 (8): 889-99.
- IFIP-IFAC. 1999. « Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology. »
- Jackson, Mats, Magnus Wiktorsson, et Monica Bellgran. 2008. « Factory-in-a-box— Demonstrating the next generation manufacturing provider. » In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, 341-46. Springer.
- Jackson, Mats, et Abedullah Zaman. 2007. « Factory-In-a-Box—Mobile Production Capacity on Demand. » *International Journal of Modern Engineering* 8 (1): 12-26.
- Johnson, P. Fraser, Robert D. Klassen, Michiel R. Leenders, et Harold E. Fearon. 2002. « Determinants of purchasing team usage in the supply chain. » *Journal of Operations Management* 20 (1): 77-89. doi:10.1016/S0272-6963(01)00078-X.
- Jones, D. F, S. K Mirrazavi, et M Tamiz. 2002. « Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art. » *European Journal of Operational Research* 137 (1): 1-9.
- Kiritsis, Dimitris, et Michel porchet. 1996. « A generic Petri net model for dynamic process planning and sequence optimization. » *Advances in Engineering Software*.
- Kleinhans, S., B. Vallespir, et G. Doumeingts. 1998. « A Rule-Based Support System to Make or Buy Decision. » In *Strategic Management of the Manufacturing Value Chain*, édité par Umit S. Bititci et Allan S. Carrie, 391-400. IFIP — The International Federation for Information Processing 2. Springer US.

- Koren, Y. 2006. « General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems. » In *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*, 27-45..
- Koren, Yoram. 2002. « vision, principles and impact of reconfigurable manufacturing systems. »
- . 2010. « System Configuration Analysis. » In *The Global Manufacturing Revolution*, 253-80. John Wiley & Sons, Inc.
- Koren, Yoram, Uwe Heisel, Francesco Jovane, Toshimichi Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, et H. Van Brussel. 1999. « Reconfigurable manufacturing systems. » *CIRP Annals-Manufacturing Technology* 48 (2): 527-40.
- Koren, Yoram, et Moshe Shpitalni. 2010. « Design of reconfigurable manufacturing systems. » *Journal of Manufacturing Systems* 29 (4): 130-41.
- Korhonen, Pekka, et Jyrki Wallenius. 1988. « A Pareto Race. » *Naval Research Logistics (NRL)* 35 (6): 615-23. doi:10.1002/1520-6750(198812)35:6<615::AID-NAV3220350608>3.0.CO;2-K.
- Kosanke, K., F. Vernadat, et M. Zelm. 2015. « Means to enable enterprise interoperation: CIMOSA Object Capability Profiles and CIMOSA Collaboration View. » *Annual Reviews in Control* 39: 94-101. doi:10.1016/j.arcontrol.2015.03.009.
- Koste, L. 1999. « A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. » *Journal of Operations Management* 18 (1): 75-93.
- Kraljic, Peter. 1983. « Purchasing must become supply management. » *Harvard business review* 61 (5): 109-17.
- Kühnle, Hermann. 2010. « Distributed Manufacturing: Paradigms, Concepts, Solutions and Examples. » In *Distributed Manufacturing*, 1-9. Springer London.
- Labrousse, Michel. 2004. « PROPOSITION D'UN MODELE CONCEPTUEL UNIFIE POUR LA GESTION DYNAMIQUE DES CONNAISSANCES D'ENTREPRISE.pdf. » Université de Nantes.
- Larousse. 2015. « Définitions : mobilité - Dictionnaire de français Larousse. » Consulté le octobre 2. <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/mobilit%C3%A9/51890>.
- Lemaire, Maurice. 2014. *Mécanique et incertain*. ISTE Editions. London: ISTE.
- Le Moigne, Jean-Louis. 1994. *La théorie du système général: théorie de la modélisation*. jeanlouis le moigne-ae mcx.
- Li, Deng-Feng. 2011. « The GOWA operator based approach to multiattribute decision making using intuitionistic fuzzy sets. » *Mathematical and Computer Modelling* 53 (5–6): 1182-96. doi:10.1016/j.mcm.2010.11.088.
- Maier, Mark W. 1998. « Architecting Principles for Systems-of-Systems. » *Systems Engineering* 1 (4): 267-84.
- . 2009. *The Art of Systems Architecting, Third Edition*. 3 edition. Boca Raton: CRC Press.
- Maler-Speredelozzi, V., Y. Koren, et S.J. Hu. 2003. « Convertibility Measures for Manufacturing Systems. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 52 (1): 367-70.
- Matt, Dominik T., Erwin Rauch, et Patrick Dallasega. 2015. « Trends towards Distributed Manufacturing Systems and Modern Forms for their Design. » *Procedia CIRP*, 9th



- CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14, 33: 185-90.
- McIvor, Ronan T., et Paul K. Humphreys. 2000. « A case-based reasoning approach to the make or buy decision. » *Integrated Manufacturing Systems* 11 (5): 295-310. <http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=850840&show=abstract>.
- McIvor, R. T., P. K. Humphreys, et W. E. McAleer. 1997. « A strategic model for the formulation of an effective make or buy decision. » *Management Decision* 35 (2): 169-78.
- McKinzie, K., et J. W. Barnes. 2004. « A review of strategic mobility models supporting the defense transportation system. » *Mathematical and Computer Modelling, Defense transportation: Algorithms, models, and applications for the 21st century*, 39 (6-8): 839-68.
- Mehrabi, Mostafa G., A. Galip Ulsoy, et Yoram Koren. 2000. « Reconfigurable manufacturing systems: key to future manufacturing. » *Journal of Intelligent Manufacturing* 11 (4): 403-19.
- Michel Roboam, Lucas Pun. 1989. « Utility of design methodology for advanced manufacturing systems. » *Computer Integrated Manufacturing Systems* 2 (1): 4-10.
- Miller, Thomas Dedenroth, Per Erik Elgård Pedersen, Thomas Dedenroth Miller, et Per Erik Elgård Pedersen. 1998. *Defining Modules, Modularity and Modularization*. Evolution of the Concept in a Historical Perspective. IKS.
- Miltenburg, John. 2005. *Manufacturing Strategy: How to Formulate and Implement a Winning Plan, Second Edition*. Productivity Press.
- Mintzberg, Henry. 1982. « Structure et dynamique des organisations. »
- Mkaouar Hachicha, Raoudha. 2012. « Contribution à la modélisation et résolution du problème d'affectation sous contraintes de compétences et préférences. » Université Paris 8.
- Moschuris, Socrates J. 2008. « Organizational participants in the make-or-buy process. » *Industrial Marketing Management* 37 (2): 143-53.
- Neumann, John von, et Oskar Morgenstern. 1944. *Theory of games and economic behaviour*.
- Newcomb, P. J., B. Bras, et D. W. Rosen. 1998. « Implications of Modularity on Product Design for the Life Cycle. » *Journal of Mechanical Design* 120 (3): 483-90.
- Nigel Slack. 1987. « The Flexibility of Manufacturing Systems. » *International Journal of Operations & Production Management* 7 (4): 35-45.
- Noran, Ovidiu. 2003. « An analysis of the Zachman framework for enterprise architecture from the GERAM perspective. » *Annual Reviews in Control* 27 (2): 163-83.
- Nyhuis, Peter, Tobias Heinen, et Michael Brieke. 2007. « Adequate and Economic Factory Transformability and the Effects on Logistical Performance. » *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (3): 286-307. doi:10.1007/s10696-007-9027-3.
- Olsson, Erik, Mikael Hedelind, et Mobeyen Ussin Ahmed. 2007. « Experience reuse between mobile production modules-an enabler for the factory-in-a-box concept. » In . Gothenburg, Sweden.
- Öncü, A. Aykut, M. Atilla Oner, et Nuri Başoğlu. 2003. « Make or Buy Analysis for Local Manufacture or Import Decisions in Defense System Procurements Using AHP: The Case of Turkey. » In *Proceedings of PICMET*, 2.

- Padillo, Jose M., et Moustapha Diaby. 1999. « A multiple-criteria decision methodology for the make-or-buy problem. » *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis édition.
- Pahl, Gerhard, W. Beitz, Jörg Feldhusen, et Karl-Heinrich Grote. 2007. *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer Science & Business Media.
- Panetto, Hervé, et Arturo Molina. 2008. « Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues. » *Computers in Industry, Enterprise Integration and Interoperability in Manufacturing Systems*, 59 (7): 641-46.
- Park, Gyung-Jin. 2007. *Analytic methods for design practice*. Springer Science & Business Media.
- Platts, K. W., D. R. Probert, et Laura Canez. 2002. « Make vs. buy decisions: A process incorporating multi-attribute decision-making. » *International Journal of Production Economics* 77 (3): 247-57.
- Porter, Michael E. 1980. *Competitive Strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors*. Free Press.
- Porter, Michel. 1986. *AVANTAGE CONCURRENTIEL COMMENT DEVANCER SES CONCURRENTS ET MAINTENIR SON AVANTAGE*. PARIS: INTEREDITIONS.
- Probert. 1997. *Developing a Make or Buy Strategy for Manufacturing Business*. Institution of Engineering and Technology.
- Probert, D.R. 1996. « The practical development of a make or buy strategy: the issue of process positioning. » *Integrated Manufacturing Systems* 7 (2): 44-51.
- Pun, Lucas. 1987. « Situational modelling of knowledge and reasoning. » In . Dubrovnic, Yougoslavia.
- Putnik, G., A. Sluga, H. ElMaraghy, R. Teti, Y. Koren, T. Tolio, et B. Hon. 2013. « Scalability in manufacturing systems design and operation: State-of-the-art and future developments roadmap. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 62 (2): 751-74.
- PwC. 2009. « Transportation & Logistics 2030. Volume 1 : How will supply chains evolve in an energy-constrained, low carbon world? »
- Quirante, Thomas. 2012. « Modelling and numerical optimization methods for decision support in robust embodiment design of products and processes. » Bordeaux 1.
- Raunick, D. A., et A. G. Fisher. 1972. « A probabilistic make-buy model. » *Journal of Purchasing*.
- Rogers, G. G., et L. Bottaci. 1997. « Modular Production Systems: A New Manufacturing Paradigm. » *Journal of Intelligent Manufacturing* 8 (2): 147-56.
- Rogers, Graham G. 1990. « Modular Production Systems : A Motion Control Scheme for Actuators. » Thesis, © Graham George Rogers. <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/11009>.
- Rösiö, Carin. 2012. « Supporting the design of reconfigurable production systems. » Jönköping University. <http://hj.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:591325>.
- . 2013. « Reconfigurable production system design – theoretical and practical challenges. » *Journal of Manufacturing Technology Management* 24 (7): 998-1018.
- Roy, Bernard, et Roman Słowiński. 2013. « Questions Guiding the Choice of a Multicriteria Decision Aiding Method. » *EURO Journal on Decision Processes* 1 (1-2): 69-97.
- Saaty, Thomas L. 1977. « A scaling method for priorities in hierarchical structures. » *Journal of Mathematical Psychology* 15 (3): 234-81. doi:10.1016/0022-2496(77)90033-5.

- Saaty, Thomas L. 1990. « How to make a decision: The analytic hierarchy process », *European Journal of Operational Research* édition.
- Säfssten, Kristina. 2002. « Evaluation of assembly systems : an exploratory study of evaluation situations /. » Linköping University.
- Salveson. 1955. « The assembly line balancing problem. » *Journal of Industrial Engineering* 6 (3): 18-25.
- Schuh, G., M. Lenders, C. Nussbaum, et D. Kupke. 2009. « Design for changeability. » In *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*, 251-66. Springer.
- Scott, Michael J. 1998. « Formalizing negotiation in engineering design. » California Institute of Technology. <http://www.design.caltech.edu/Research/Imprecise/Papers/98s.pdf>.
- Scott, Michael J., et Erik K. Antonsson. 2000. « Using indifference points in engineering decisions. » In *Proceedings of ASME Design Engineering Technical Conferences, Baltimore, USA*. [http://design.caltech.edu/Research/Imprecise/Reading\\_List/Ch10\\_00b.pdf](http://design.caltech.edu/Research/Imprecise/Reading_List/Ch10_00b.pdf).
- Shi, Y. 1998. « International manufacturing networks—to develop global competitive capabilities. » *Journal of Operations Management* 16 (2-3): 195-214.
- Simon, Herbert A. 1960. *The new science of management decision*. Vol. xii. The Ford distinguished lectures. New York, NY, US: Harper & Brothers.
- Singh, Amol. 2014. « Supplier evaluation and demand allocation among suppliers in a supply chain. » *Journal of Purchasing and Supply Management* 20 (3): 167-76.
- Sperandio, Séverine. 2005. « Usage de la modélisation multi-vue d'entreprise pour la conduite des systèmes de production. » Université Sciences et Technologies-Bordeaux I.
- Spicer, Patrick, et Hector J. Carlo. 2006. « Integrating Reconfiguration Cost Into the Design of Multi-Period Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems. » *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 129 (1): 202-10.
- Spicer \*, P., D. Yip-Hoi, et Y. Koren. 2005. « Scalable reconfigurable equipment design principles. » *International Journal of Production Research* 43 (22): 4839-52.
- Stecke, Kathryn E. 1983. « Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for Flexible Manufacturing Systems. » *Management Science* 29 (3): 273-88.
- Stillström, Carin, et Mats Jackson. 2007. « The concept of mobile manufacturing. » *Journal of Manufacturing Systems* 26 (3-4): 188-93.
- Suh, Nam P. 1990. *The Principles of Design*. Oxford University Press.
- . 1995. « Design and operation of large systems. » *Journal of Manufacturing Systems* 14 (3): 203-13.
- Suh, Nam P., David S. Cochran, et Paulo C. Lima. 1998. « Manufacturing System Design. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 (2): 627-39.
- Tesfamariam, Daniel, et Bengt Lindberg. 2005. « Aggregate analysis of manufacturing systems using system dynamics and ANP. » *Computers & Industrial Engineering* 49 (1): 98-117.
- Thiéart, Raymond-Alain, et Jean-Marc Xuereb. 2009. *Stratégies: Concepts, méthodes, mise en oeuvre*. Dunod.
- Tolio, T., A. Matta, et F. Jovane. 1998. « A Method for Performance Evaluation of Automated Flow Lines. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 (1): 373-76.

- Tomiya, T., P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, Ch. Kind, et F. Kimura. 2009. « Design methodologies: Industrial and educational applications. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2): 543-65
- Treacy, Michael, et Frederik Derk Wiersema. 1997. *The Discipline of Market Leaders: Choose Your Customers, Narrow Your Focus, Dominate Your Market*. Basic Books.
- Tsukune, H., M. Tsukamoto, T. Matsushita, F. Tomita, K. Okada, T. Ogasawara, K. Takase, et T. Yuba. 1993. « Modular Manufacturing. » *Journal of Intelligent Manufacturing* 4 (2): 163-81.
- Ulich, Eberhard, Heinz Schüpbach, Axel Schilling, et Julia K. Kuark. 1990. « Concepts and procedures of work psychology for the analysis, evaluation and design of advanced manufacturing systems: A case study. » *International Journal of Industrial Ergonomics* 5 (1): 47-57.
- Ulrich, Karl. 1994. « Fundamentals of Product Modularity. » In *Management of Design*, édité par Sriram Dasu et Charles Eastman, 219-31. Springer Netherlands.
- Upton, David M. 1995. « Flexibility as process mobility: The management of plant capabilities for quick response manufacturing. » *Journal of Operations Management* 12 (3-4): 205-24.
- Vallespir, Bruno. 2012. « La modélisation d'entreprise. » présenté à Ecole de modélisation d'entreprise, Arcachon, octobre 24.
- Van de Water, Henny, et Heleen P. Van Peet. 2006. « A decision support model based on the Analytic Hierarchy Process for the Make or Buy decision in manufacturing. » *Journal of Purchasing and Supply Management* 12 (5): 258-71.
- Vaughn, Amanda, Pradeep Fernandes, et J. Tom Shields. 2002. « Manufacturing System Design Framework Manual. » <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/81902>.
- Vernadat, François. 1999. *Techniques de modélisation en entreprise: applications aux processus opérationnels*. Economica.
- . 2014. « Enterprise Modeling in the context of Enterprise Engineering: State of the art and outlook. » *International Journal of Production Management and Engineering* 2 (2): 57.
- Vernadat, Francois B. 2003. « Enterprise Modelling and Integration. » In *Enterprise Inter- and Intra-Organizational Integration*, édité par Kurt Kosanke, Roland Jochem, James G. Nell, et Angel Ortiz Bas, 25-33. IFIP — The International Federation for Information Processing 108. Springer US.
- Vielhaber, Michael, et Pascal Stoffels. 2014. « Product Development vs. Production Development. » *Procedia CIRP*, 24th CIRP Design Conference, 21: 252-57.
- Wagner, Stephan M., et Christoph Bode. 2008. « An empirical examination of supply chain performance along several dimensions of risk. » *Journal of business logistics* 29 (1): 307-25. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.2158-1592.2008.tb00081.x/full>.
- Walker, Gordon. 1988. « Strategic Sourcing, Vertical Integration, and Transaction Costs. » *Interfaces* 18 (3): 62-73.
- Wernerfelt, Birger. 1984. « A Resource-Based View of the Firm. » *Strategic Management Journal* 5 (2): 171-80. doi:10.1002/smj.4250050207.

- Wiendahl, H.-P., H.A. ElMaraghy, P. Nyhuis, M.F. Zäh, H.-H. Wiendahl, N. Duffie, et M. Brieke. 2007. « Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. » *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 56 (2): 783-809.
- Wiendahl, H.P., et C.L. Heger. 2011. « Justifying Changeability. A Methodical Approach to Achieving Cost Effectiveness. » *Journal for Manufacturing Science and Production* 6 (1-2): 33-40.
- Williamson, Oliver E. 1981. « The Economics of Organization: The Transaction Cost Approach. » *American Journal of Sociology* 87 (3): 548-77.
- Williams, Theodore J. 1994. « The Purdue enterprise reference architecture. » *Computers in Industry* 24 (2-3): 141-58.
- Williams, Theodore J., et Hong Li. 1999. « PERA and GERAM—enterprise Reference Architectures in Enterprise Integration. » In *Information Infrastructure Systems for Manufacturing II*, édité par John J. Mills et Fumihiko Kimura, 3-30. IFIP — The International Federation for Information Processing 16. Springer US.
- Williams, T. J., P. Bernus, J. Brosvic, D. Chen, G. Doumeingts, L. Nemes, J. L. Nevins, B. Vallespir, J. Vlietstra, et D. Zoetekouw. 1994. « Architectures for integrating manufacturing activities and enterprises. » *Computers in Industry* 24 (2-3): 111-39.
- Wu, Bin. 1994. *Manufacturing Systems Design and Analysis*. 1994 edition. London: Springer.
- Xiaobo, Zhao, Wang Jiancai, et Luo Zhenbi. 2000. « A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 1: A framework. » *International Journal of Production Research* 38 (10): 2273-85.
- Xiaobo, Zhao, Jiancai Wang, et Zhenbi Luo. 2000. « A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 2: Optimal configurations. » *International Journal of Production Research* 38 (12): 2829-42.
- . 2001a. « A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system Part 3: Optimal selection policy. » *International Journal of Production Research* 39 (4): 747-58.
- . 2001b. « A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system - Part 4: Performance measure. » *International Journal of Production Research* 39 (6): 1113-26.
- Yager, Ronald R. 2004. « Generalized OWA Aggregation Operators. » *Fuzzy Optimization and Decision Making* 3 (1): 93-107.
- Youssef, Ayman M. A., et Hoda A. ElMaraghy. 2006. « Assessment of Manufacturing Systems Reconfiguration Smoothness. » *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 30 (1-2): 174-93.
- . 2007. « Optimal Configuration Selection for Reconfigurable Manufacturing Systems. » *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2): 67-106.
- Zachman, John A. 1987. « A Framework for Information Systems Architecture. » *IBM Syst. J.* 26 (3): 276-92.
- Zaidat, Ali. 2005. « Spécification d'un cadre d'ingénierie pour les réseaux d'organisations. » Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Zamirowski, Erik J., et Kevin N. Otto. 1999. « Identifying product family architecture modularity using function and variety heuristics. » In *11th International Conference on Design Theory and Methodology*, ASME, Las Vegas.

---

# ANNEXE

## 1

### 9 LE CAS D'APPLICATION SOLR<sup>2</sup> : UNE USINE MOBILE POUR LE SECTEUR DE L'ENERGIE SOLAIRE

---

## *Sommaire*

<b>9 LE CAS D'APPLICATION SOLR<sup>2</sup> : UNE USINE MOBILE POUR LE SECTEUR DE L'ÉNERGIE SOLAIRE.....</b>	<b>279</b>
9.1 INTRODUCTION GENERALE A L'ANNEXE 1 .....	283
9.2 LE PROJET SOLR <sup>2</sup> .....	283
9.2.1 Préambule .....	283
9.2.2 SolR <sup>2</sup> : un projet collaboratif de recherche.....	283
9.2.3 Une usine mobile pour fabriquer sur site et installer des champs solaires.....	284
9.2.4 Justification économique de l'usine mobile.....	285
9.3 CONCEPTION D'UNE USINE MOBILE POUR UN SITE IDENTIFIE.....	286
9.3.1 Le cahier des charges initial .....	286
9.3.2 L'analyse de l'environnement de l'usine mobile (UM).....	289
9.3.3 Le cahier des charges (CDC_1) de l'UM.....	290
9.3.4 La conception d'une configuration générique du SPM .....	309
9.3.5 L'analyse du faire ou faire faire un cas d'application.....	311

## *Liste des illustrations*

Figure 9-1 Positionnement des six thèses dans le projet SolR <sup>2</sup> (source document interne du Projet SolR <sup>2</sup> ).....	284
Figure 9-2 application de l'approche de conception du SPM à la conception de l'UM.....	286
Figure 9-3 exemple de champ solaire thermodynamique à miroir de Fresnel .....	287
Figure 9-4 présentation du produit réflecteur, fabriqué par le SPM .....	287
Figure 9-5 spécification du cahier des charges initial pour la conception de l'UM .....	289
Figure 9-6 Pendant l'exploitation, l'UM a besoin de systèmes contributeurs .....	290
Figure 9-7 Expression du besoin de l'UM.....	291
Figure 9-8 Analyse des phases de vie de l'UM .....	292
Figure 9-9 Analyse de la phase utilisation de l'UM (niveau A3).....	292
Figure 9-10 exemple de gamme des opérations nécessaires pour l'obtention du produit réflecteur.....	309
Figure 9-11 exemple d'affectation de ressources .....	309
Figure 9-12 Esquisse d'une configuration générique de l'usine mobile .....	310
Figure 9-13 illustration d'une configuration générique du SPM.....	311
Figure 9-14 structure du démonstrateur d'analyse de la décision de faire ou faire faire.....	312
Figure 9-15 Le composant "membrure inférieure" proposé pour l'analyse faire ou faire faire .....	313
Figure 9-16 données d'entrée sur le produit à analyser .....	313
Figure 9-17 Grille de notation pour la disponibilité de la qualification.....	313
Figure 9-18 données d'entrée sur le site d'implantation .....	314
Figure 9-19 Ensemble des données nécessaires sur les alternatives de production.....	314
Figure 9-20 Données d'entrée sur la gestion de production .....	315



---

Figure 9-21 préférences du décideur concernant l'objectif de coût.....	315
Figure 9-22 données d'entrée relatives à l'évaluation de l'objectif de capacité technique ...	316
Figure 9-23 données d'entrée liées à l'évaluation de l'objectif technico durable.....	316
Figure 9-24 données d'entrée liées à l'évaluation de la performance locale.....	316
Tableau 9-1 Facteurs de l'environnement de l'UM.....	289



## 9.1 INTRODUCTION A L'ANNEXE 1

Cette annexe a pour objectif d'introduire le cas d'application SolR<sup>2</sup>. En s'appuyant sur ce cas, nous allons présenter un démonstrateur de recherche grâce auxquels nous avons mis en application la démarche de conception du SPM qui a été exposée au fil des chapitres précédents.

Nous allons dans un premier temps présenter le contexte du projet SolR<sup>2</sup>, dans lequel il était sujet de concevoir une usine mobile pour fabriquer et installer localement des composants de centrales solaires thermodynamiques. Ensuite, nous aborderons le volet conception de l'usine mobile qui nous conduira à détailler le cahier de charges élaboré dans le cadre de ce projet et permettra de mettre en application l'ensemble des outils et démarches détaillés dans les chapitres 3, 4 et 5.

Cette annexe, certes, a vocation de démontrer l'applicabilité des modèles présentés précédemment, mais au-delà de cela nous visons également à justifier les hypothèses et propositions que nous avons pu formuler dans les chapitres précédents.

Dans ce qui précédait, on utilisait le terme générique de système de production mobile (SPM). A présent et pour désigner spécifiquement le cas de SolR<sup>2</sup> nous utiliserons le terme d' « usine mobile (UM) ».

## 9.2 LE PROJET SOLR<sup>2</sup>

### 9.2.1 PREAMBULE

Dans cette annexe nous serons amenés à présenter des données et informations industrielles afin d'appuyer nos propos. Nous souhaitons mettre en garde le lecteur que, bien que ces données et informations soient réalistes, elles ne sont toutefois, pour des raisons de confidentialité imposée par notre partenaire industriel, pas celles qui ont été considérées dans le démonstrateur physique qui a été mis en place.

### 9.2.2 SOLR<sup>2</sup> : UN PROJET COLLABORATIF DE RECHERCHE

Le projet SolR<sup>2</sup> est un projet collaboratif de recherche et développement porté par ASTF un industriel de la région Aquitaine. Ce projet de recherche regroupe trois partenaires industriels, trois laboratoires de recherche et bénéficie d'un support financier du conseil régional d'Aquitaine. Le projet SolR<sup>2</sup> a résulté en six projets de thèses dont le positionnement est présenté dans la figure 9-1.

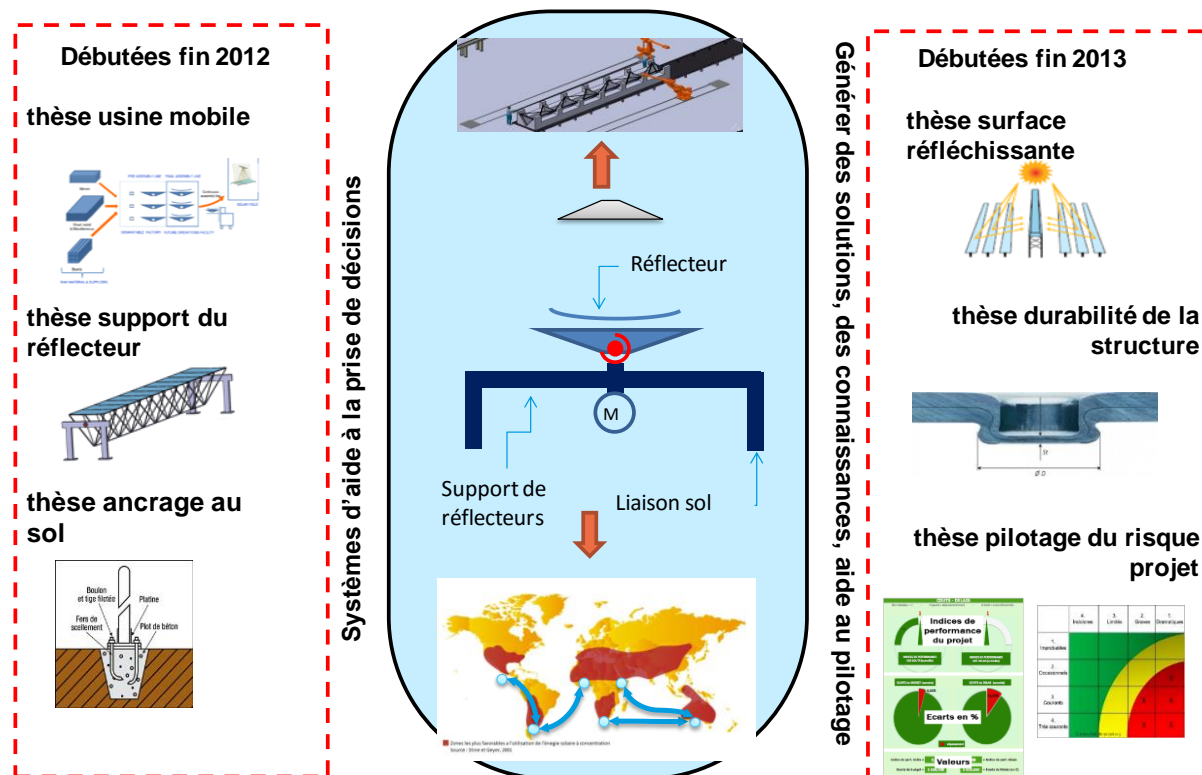


Figure 9-1 Positionnement des six thèses dans le projet SolR<sup>2</sup> (source document interne du Projet SolR<sup>2</sup>).

Deux objectifs industriels ont été identifiés dans le cadre du projet SolR<sup>2</sup> :

- objectif 1 : développer un champ solaire thermodynamique à miroirs de Fresnel à faible coût.
- objectif 2 : démontrer la capabilité d'industrialisation à grande échelle des produits développés, en utilisant le concept d'usine mobile.

Nos travaux s'inscrivent donc naturellement dans le cadre du deuxième objectif du projet SolR<sup>2</sup>.

### 9.2.3 UNE USINE MOBILE POUR FABRIQUER SUR SITE ET INSTALLER DES CHAMPS SOLAIRES

En plus de la vocation de démontrer la faisabilité d'industrialisation des champs solaires thermodynamiques à grande échelle, l'usine mobile doit assurer un coût de production minimal. Dans le cadre du projet SolR<sup>2</sup>, il est également question de réaliser un démonstrateur physique de l'usine mobile. Ce démonstrateur regroupe les modules critiques de l'usine mobile complète. Nos activités de recherche sont liées au développement de l'usine mobile complète. Pour présenter le contexte industriel lié à nos travaux nous proposons de revenir sur les hypothèses qui ont servi pour la justification économique de la solution usine mobile puis nous présenterons le produit à fabriquer, enfin nous discuterons du cahier des charges tel qu'il a été exprimé initialement par l'industriel.

## 9.2.4 JUSTIFICATION ECONOMIQUE DE L'USINE MOBILE.

La justification du recours au concept d'usine mobile pour la fabrication des composants de la centrale solaire trouve son essence dans le calcul des coûts logistiques. Les calculs préliminaires établis par l'industriel ont établi que les coûts logistiques nécessaires dans le cas d'une production par une usine fixe localisée en France sont 7 fois supérieures (cf. l'encadré qui suit) aux coûts logistiques nécessaires en utilisant une usine mobile. En effet, les produits à fabriquer se caractérisent par une faible densité, i.e. un grand encombrement et une faible masse. Une présentation du produit est donnée par la suite (cf. § 9.3.1.1). En utilisant une usine mobile, il suffit de transporter de la matière première compacte qui nécessite moins de conteneur pour l'acheminer jusque site d'implantation. De plus le transport de la matière première (ou des produits semi finis) permettrait de s'affranchir des risques de transport d'un produit sensible à haute valeur ajoutée (risques de casse de miroirs, variation des exigences géométriques, etc.).

Par conséquent, notre partenaire industriel a conclu que le recours au concept d'usine mobile serait plus intéressant économiquement (puisque l'investissement dans les modules mobiles peut être rentabilisé sur plusieurs commandes) et stratégiquement (puisque la création d'emploi locaux peut être un avantage concurrentiel pour ses clients.)

### *Exemple :*

*Dans le cas du concept classique d'usine fixe de production, Pour l'acheminement de 20000 produits il est nécessaire d'utiliser 6667 conteneurs 40'. En supposant un coût moyen de transport d'un conteneur de 1000€. Le coût nécessaire pour acheminer les produits à partir de leur usine de fabrication jusqu'au site d'implantation, s'élève à 6.6M€. Le concept d'usine mobile nécessite d'utiliser ~250 conteneurs 40' (pour l'acheminement de la matière première et des moyens de productions. En gardant la même hypothèse de coût moyen de transport d'un conteneur 40' de l'ordre de 1000€, les coûts logistiques sont de l'ordre de 250000 €.*

*En ce qui concerne les coûts de fabrication, le concept de l'usine mobile présente certains avantages :*

- *une main d'œuvre opérationnelle moins chère qu'en France (en n'oubliant pas un coût d'encadrement plus chère du fait du recours à des expatriés)*
- *non besoin de mobilisation d'un foncier : le foncier est nécessaire uniquement pendant la phase de production (il est moins cher voire gratuit dans les zones désertiques).*

*Le besoin en investissement matériel il se trouve équivalent pour les deux concepts d'usines (sédentaire vs mobile) puisque les mêmes ressources sont nécessaires. Cependant, les coûts d'exploitation dans le cas de l'usine mobile sont contrebalancés par les gains sur les coûts logistiques.*

Cette justification est donnée à titre informatif. Nous considérons que la mobilité du système de production est une contrainte (imposée par notre partenaire industriel) de notre cahier de charges, nous ne cherchons ni à la remettre en cause ni à la justifier.

Dans le paragraphe qui suit, nous proposons d'appliquer notre approche de conception de SPM pour concevoir l'UM.

### 9.3 CONCEPTION D'UNE USINE MOBILE POUR UN SITE IDENTIFIE

En s'appuyant sur l'approche de conception du SPM présentée dans le chapitre 4 (cf. figure 4-2), nous allons détailler la conception de l'usine mobile. Le point de départ est le cahier des charges. Le cahier des charges initial comporte une description du produit à fabriquer et la demande du client à respecter, qui a été traduite par une cadence théorique. Afin d'enrichir ce cahier des charges une analyse de l'environnement de l'UM et du site de production doit être conduite. Nous l'aborderons dans la section suivante.

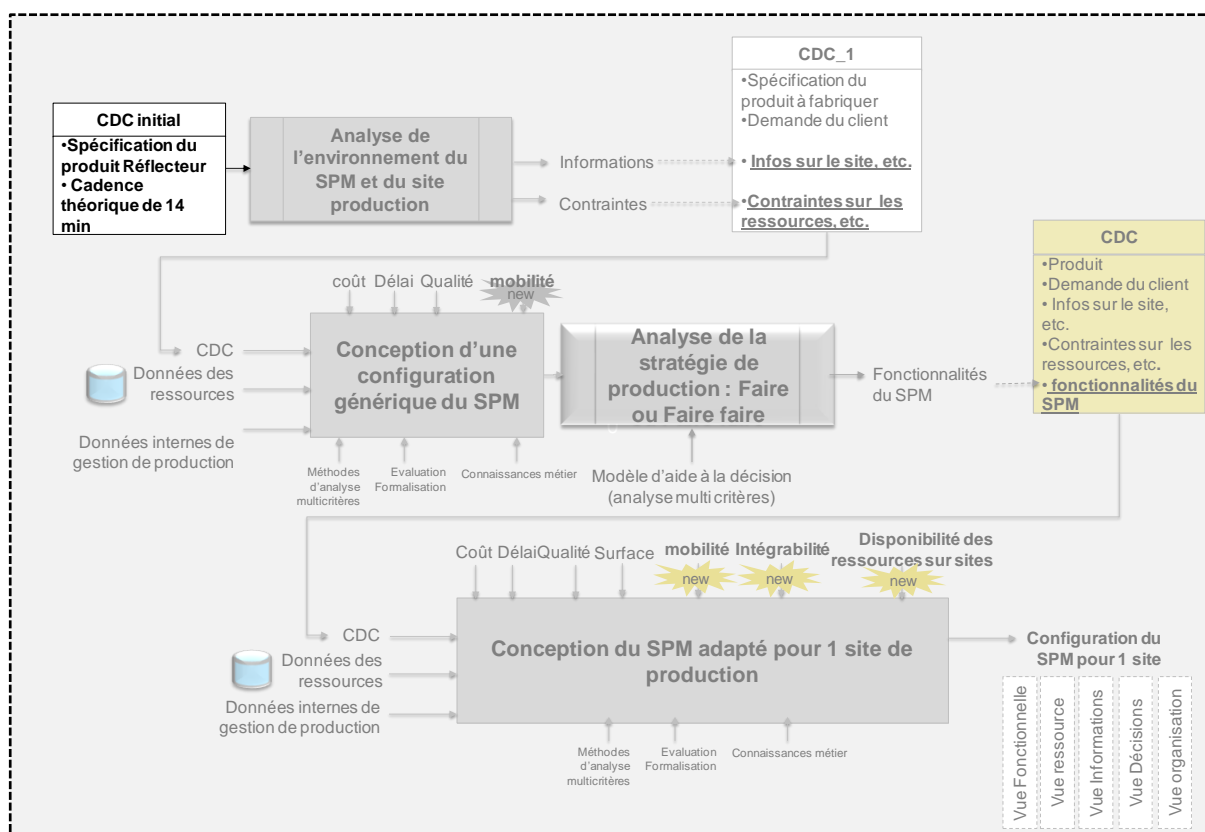


Figure 9-2 application de l'approche de conception du SPM à la conception de l'UM

#### 9.3.1 LE CAHIER DES CHARGES INITIAL

Le cahier des charges initial de l'UM contient des indications sur les spécifications du produit à fabriquer et la demande du client.

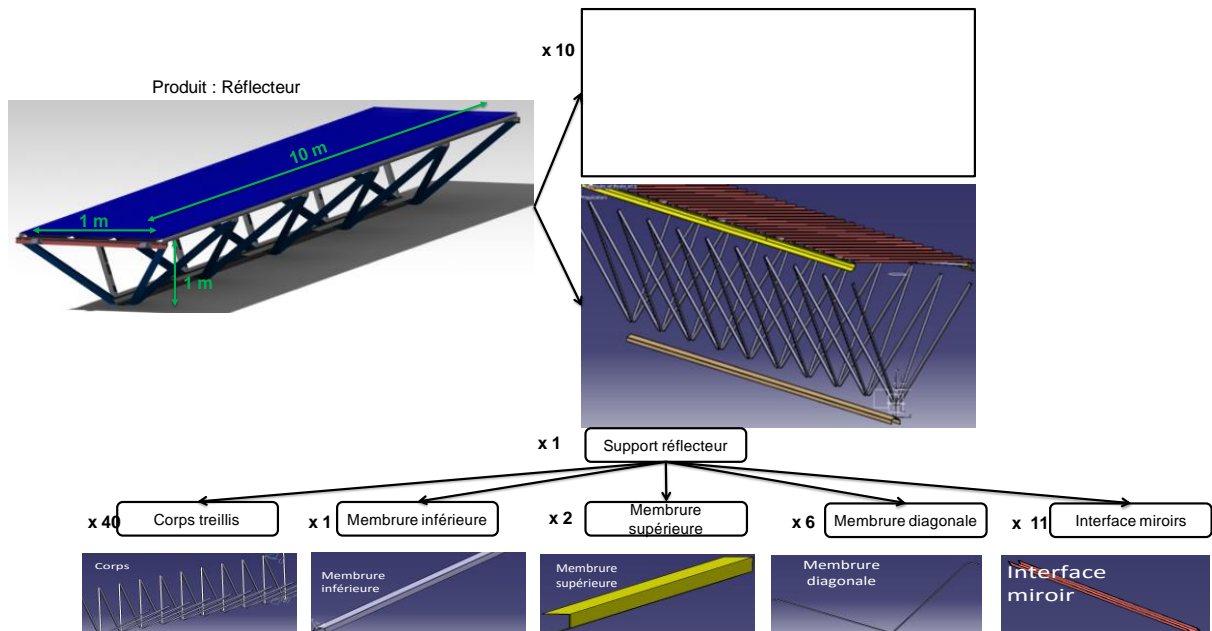
##### 9.3.1.1 LE PRODUIT A FABRIQUER

L'usine mobile doit produire et installer sur site deux composants majeurs du champ solaire (cf. figure 9-3) : le réflecteur et le récepteur. Pour des raisons de confidentialité sur le récepteur, nos travaux se sont limités à la seule considération du réflecteur. Dans la suite nous nous intéresserons spécifiquement à l'industrialisation du Réflecteur que nous appellerons 'le produit'.



**Figure 9-3 exemple de champ solaire thermodynamique à miroir de Fresnel**  
(source: <http://www.astf-alcen.com/fr/applications/energie>)

Le produit (Réflecteur) se compose d'une base métallique et d'une surface réfléchissante (cf. figure 9-4). La surface réfléchissante, composée à partir de miroirs légèrement incurvés, est assemblée par collage sur la base métallique (qu'on appellera support du réflecteur). Les miroirs sont produits par un fournisseur externe et livrés directement sur le site de production. Le support réflecteur est assemblé à partir de plusieurs composants primaires. La figure 9-4



**Figure 9-4 présentation du produit réflecteur, fabriqué par le SPM**

Le produit à fabriquer se distingue par ses dimensions importantes (10m\*1m\*1m), sa faible densité et sa sensibilité aux chocs de transport notamment la partie surface réfléchissante qui se base sur l'utilisation de miroirs.

L'ensemble des opérations nécessaires pour l'obtention du réflecteur sont recensées dans figure 9-10.

### 9.3.1.2 LA DEMANDE DU CLIENT

Dans le cadre du projet SolR<sup>2</sup>, l'usine mobile est encore au stade du développement. Il n'y a pas encore de client identifié et confirmé. La conception de l'usine mobile se base alors sur les données d'un client potentiel qui sont obtenues en se basant sur une étude du marché et sur les derniers projets des concurrents qui sont en phase de commercialisation.

En partant de ces hypothèses, une taille de champs solaire à produire et installer ainsi qu'une durée pour le faire ont été fixées. Il a été décidé de s'intéresser à des champs solaires d'une surface réfléchissante de 200 000 m<sup>2</sup> à produire et installer en 8 mois.

La taille du champ solaire nécessite donc de produire et installer 20 000 produits, en 200 jours ouverts et un fonctionnement en 3 équipes par jours. Pour honorer cette demande, il est nécessaire d'adopter une cadence théorique de production de (67) :

$$\text{Avec cadence}_{\text{théorique}} : \frac{200*3*8*60}{20000} = 14,4\text{min} \quad (67)$$



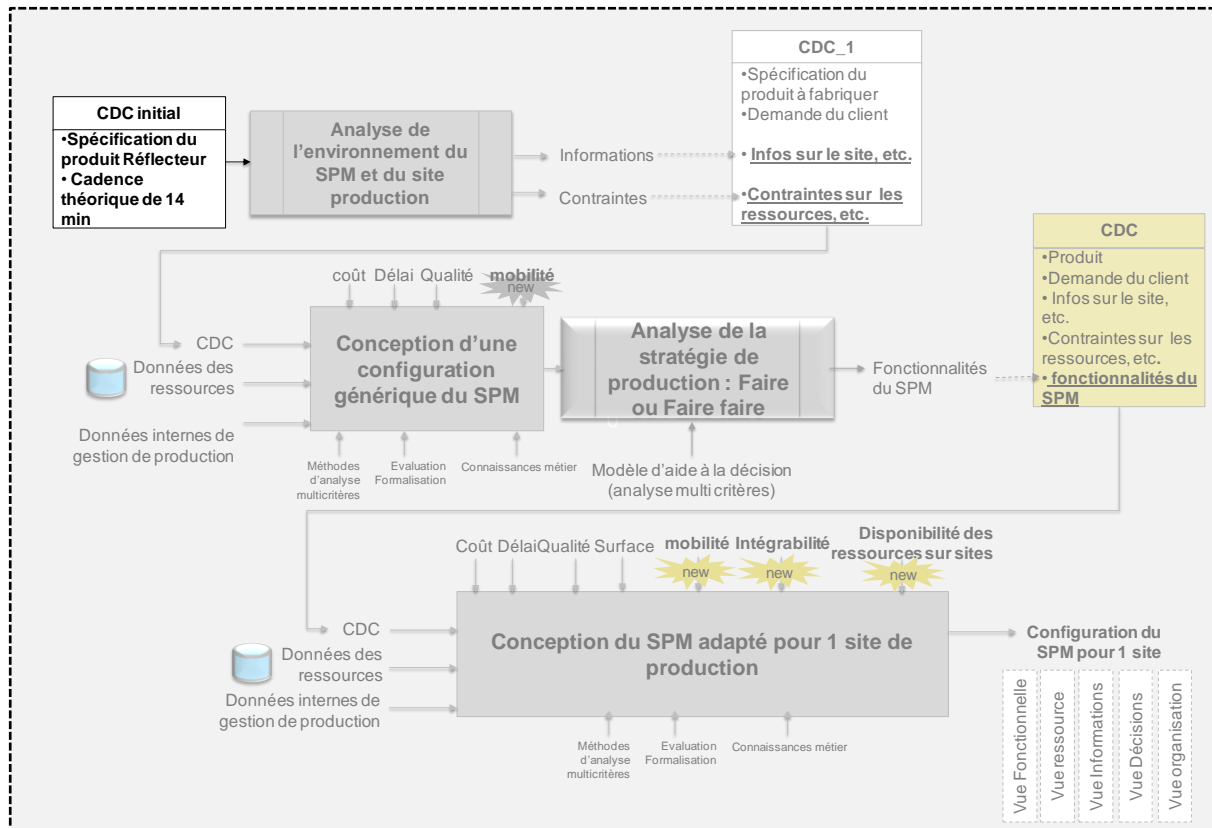


Figure 9-5 spécification du cahier des charges initial pour la conception de l'UM

### 9.3.2 L'ANALYSE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'USINE MOBILE (UM)

Le site de production identifié se situe à proximité de la ville de Ouarzazate dans à l'Est du Maroc. L'analyse de l'environnement permet de spécifier la localisation du site, son environnement naturel (climat, températures, ensoleillement, humidité, pluviométrie, neige, grêle, foudre, zone inondable, érosion, vents, ensablement, altitude, conditions sismiques, risque incendie, etc.)

Tableau 9-1 Facteurs de l'environnement de l'UM

Contexte	Catégorie	Eléments
<b>Eléments impactant directement l'UM</b>	<i>Le site est client du SPM</i>	20000 produits, 200 jours, Coût objectif non communiqué, durabilité des produits sur 25 ans, etc.
	<i>Le site est fournisseur du SPM</i>	Niveau de qualification minimal, compétences nécessaires : chargement et conduite de machines, manutention et contrôle visuel.
	<i>Le site impose des contraintes</i>	Localisation : Ouarzazate, contraintes climatiques : température, ensablement, humidité, etc.
<b>Eléments impactant indirectement l'UM</b>	<i>Facteurs politiques</i>	Stabilité politique du pays : très bonne, niveau de sécurité dans la région : très bon, etc.
	<i>Facteurs économiques</i>	Coût de la matière première (acier) : 0.6 €/kg, coût de dédouanement : 200€/conteneur 40',

	coût de transport : , coût de l'électricité : 0.06€/KWh.
<i>Facteurs socioculturels</i>	création d'emploi local, qualité de la main d'œuvre : élevée formation, syndicalisation, etc.
<i>Facteurs technologiques</i>	disponibilité des ressources nécessaires pour l'exploitation et la maintenance du SPM : élevée
<i>Facteurs Ecologiques</i>	Filière de Recyclage, gestion de déchets, développement durable, etc.
<i>Facteurs légaux et législatifs</i>	Code de travail, fiscalité, etc.

En plus de cette analyse de l'environnement de l'UM et du site de production, il est nécessaire de conduire une analyse des systèmes contributeurs. Ces systèmes sont synthétisés dans la figure suivante.

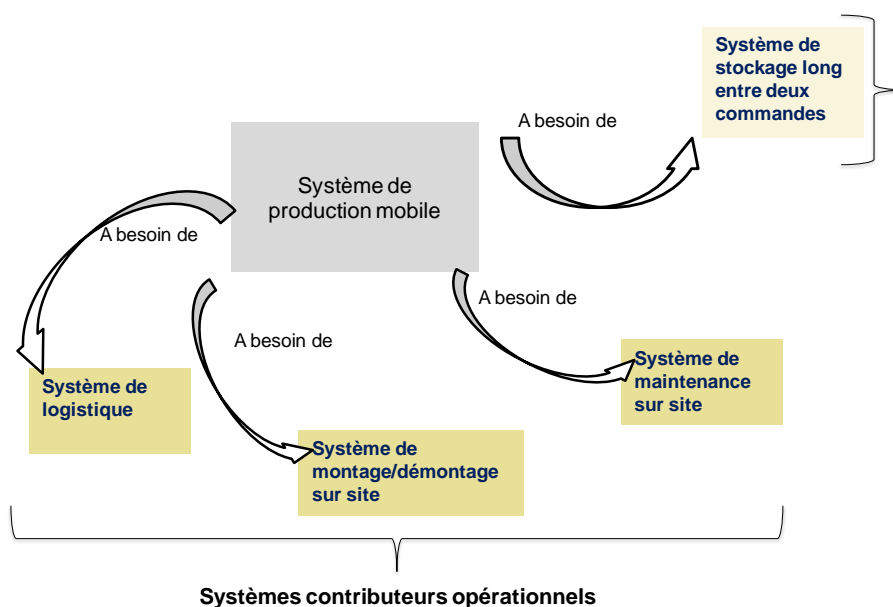


Figure 9-6 Pendant l'exploitation, l'UM a besoin de systèmes contributeurs

Cette analyse de l'environnement de l'UM conduit) la définition du cahier des charges (CDC\_1) de l'UM.

### 9.3.3 LE CAHIER DES CHARGES (CDC\_1) DE L'UM

La définition du cahier des charges (version CDC\_1) se base sur analyse fonctionnelle de l'UM. Cette analyse fonctionnelle commence d'abord par l'analyse du besoin de l'UM. Ensuite, une analyse du cycle de vie de l'UM est conduite. Puis par phase de vie, le cahier des charges définissant les exigences et contraintes de conception de l'UM, est défini.

#### 9.3.3.1 ANALYSE SADT

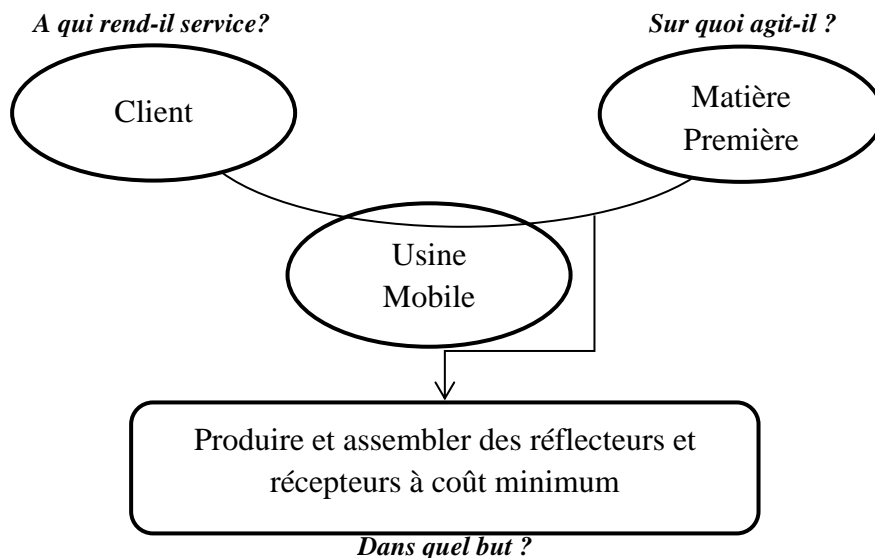


Figure 9-7 Expression du besoin de l'UM

<b><i>Le système</i></b>	Usine Mobile
<b><i>A qui le système rend-il service ?</i></b>	Au Client ( <u>A définir</u> )
<b><i>Dans quel but ?</i></b>	Fabriquer localement et installer les réflecteurs et les récepteurs à coût minimum.
<b><i>Sur quoi le système agit-il ?</i></b>	Matières premières, énergie
<b><i>Pourquoi le système existe-t-il ?</i></b>	Le système permet de produire des éléments de centrales thermodynamique ( réflecteurs+récepteurs) à bas coût.
<b><i>Qu'est ce qui pourrait faire évoluer le besoin ?</i></b>	Modification des paramètres de conception des Réflecteurs et des récepteurs Evolution des technologies de production.
<b><i>Qu'est ce qui pourrait faire disparaître le besoin ?</i></b>	Développement d'un nouveau système de production plus rentable.

### 9.3.3.2 CYCLE DE VIE DE L'USINE MOBILE

Pendant son cycle de vie, l'usine mobile passe par trois macro phases de vie qui sont représentées dans la figure 9-8 et qui sont : la phase de développement de l'UM, la phase d'utilisation et la phase de fin de vie.

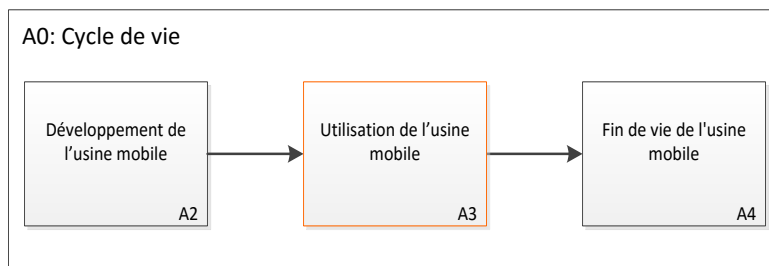


Figure 9-8 Analyse des phases de vie de l'UM

On s’attachera par la suite à l’analyse de la phase d’utilisation de l’usine. Nous proposons de focaliser notre analyse sur chaque phase de vie dans l’objectif d’en analyser les exigences et contraintes conduisant à la définition du cahier des charges (CDC\_1).

### 9.3.3.3 ANALYSE FONCTIONNELLE DE LA PHASE D'UTILISATION DE L'UM:

- Hypothèses:
  - a. Avant le transfert de l'usine sur un nouveau site d'implantation, L'usine mobile est stockée dans un site identifié (base fixe). Pendant cette phase d’immobilisation, des interventions de maintenance "lourde" sont réalisés. (changement de machines en fin de vie, intégration nouvelles machine,...)
  - b. La base d’immobilisation peut être le site d’implantation : en attendant le transfert sur un nouveau site, l'usine peut rester sur le 1er site.

A3 :Utilisation

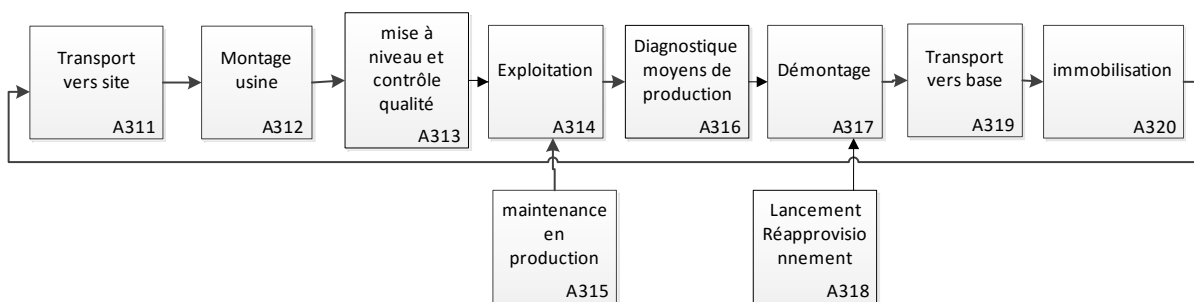
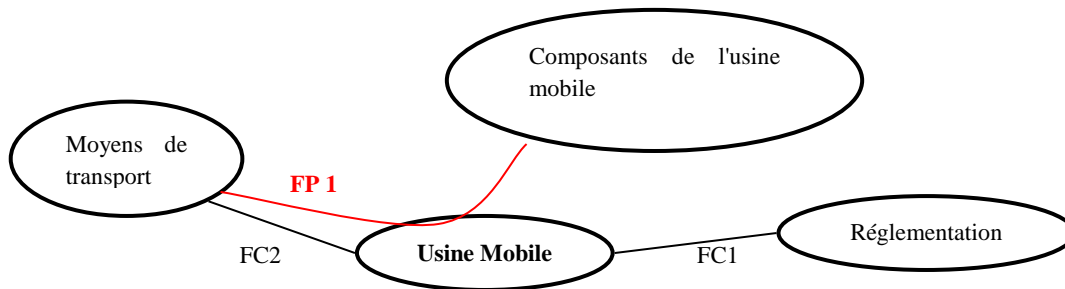


Figure 9-9 Analyse de la phase utilisation de l'UM (niveau A3)

#### 9.3.3.3.1 PHASE A311: TRANSPORT VERS SITE

- diagramme des interactions

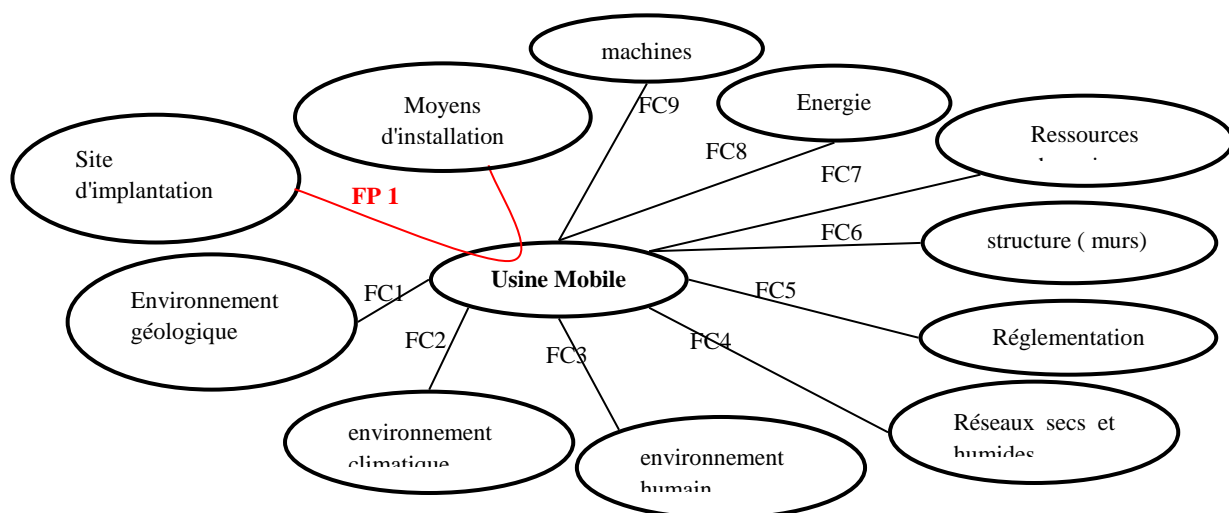


▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
FP 1	Assurer l'acheminement de l'usine mobile sur les sites d'implantation	- Transporter l'usine par des moyens standards	moyen de transport des machines	Containers 20' / 40'		
		Respecter les conditions de transport des machines				Le transport est un service qui peut être externalisé mais risqué
FC 1	Respecter les réglementations et normes en vigueur	Respecter la réglementation douanière locale				Critère totalement site dépendant
FC 2	S'adapter aux moyens de transports		Coûts transports			
			accessibilité			

9.3.3.3.2 PHASE A312: MONTAGE USINE SUR SITE

▪ diagramme des interactions



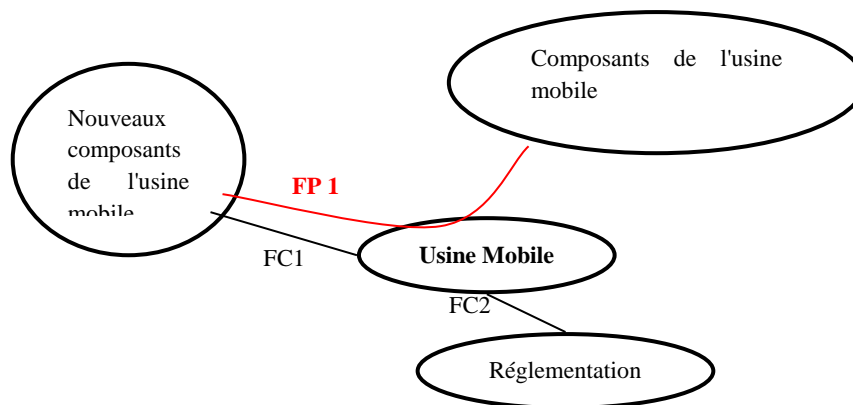
▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP 1</b>	Installer l'usine mobile sur le site d'implantation	Assurer le montage de l'usine	Délai installation	1 mois		
		S'adapter aux moyens d'installation				
<b>FC1</b>	S'adapter aux contraintes géologiques	Préparer le sol	Pente sol			
<b>FC2</b>	S'adapter à l'environnement climatique	Respecter les contraintes de durabilité				
<b>FC3</b>	S'adapter à l'environnement humain	Assurer la sécurité du périmètre de l'usine				
<b>FC4</b>	Assurer la connexion aux réseaux secs et humides	Assurer la connexion au réseau électrique				
		Assurer la connexion au réseau d'eau				
<b>FC5</b>	Respecter les réglementations et	Respecter les normes de				

	normes en vigueur	sécurité				
		Respecter la réglementation d'installation des usines				
<b>FC6</b>	Utiliser des structures démontables	Utiliser des containers	Type structure	Containers 20' / 40'		Utiliser les containers
			Nombre container nécessaire			
<b>FC7</b>	Utiliser main d'œuvre locale					Coût horaire?
<b>FC8</b>	Assurer la disponibilité Energie		Nature énergie  Puissances consommées			Pendant la durée d'installation
<b>FC9</b>	Assurer le stockage des machines					

9.3.3.3 PHASE A313: CONTROLE ET MISE A NIVEAU

- diagramme des interactions



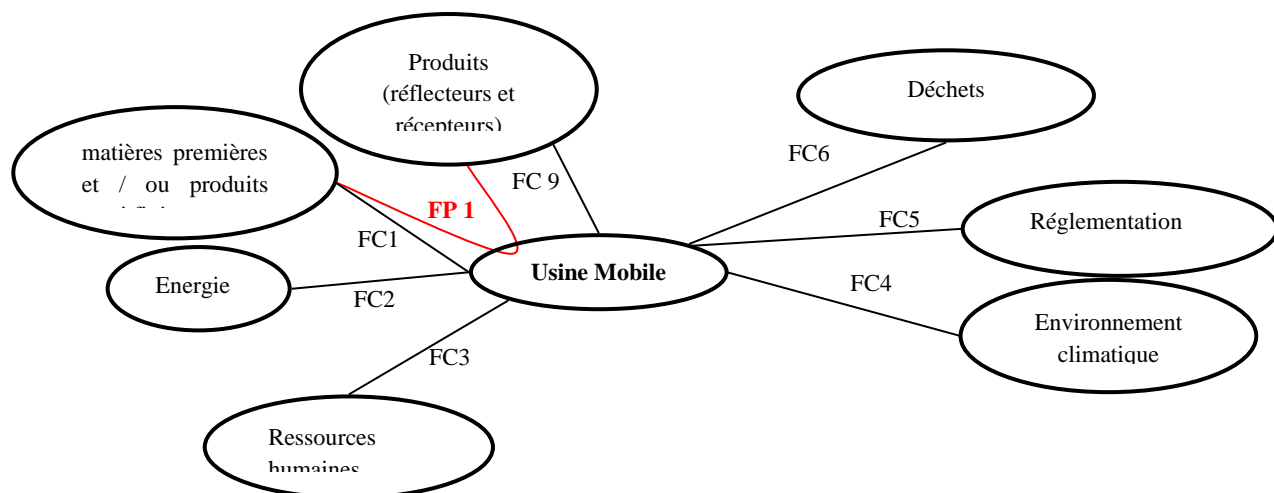
- Cahier des charges

Fonction	Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques

<b>FP1</b>	Intégrer les nouveaux composants niveau des nouveaux composants		Délai d'installation	1 mois		
<b>FC1</b>	Assurer l'approvisionnement des nouveaux composants					
<b>FC2</b>	Respecter les réglementations en vigueur					

9.3.3.4 PHASE A314: UTILISATION SUR SITE 1/2 : PRODUCTION SUR SITE

- diagramme des interactions



- Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performanc e	Flexibilit é	remarques
<b>FP 1</b>	Fabriquer des produits	Fabriquer des réflecteurs	Durée de vie (cycle d'utilisation)	7 cycles		Equivalent à 7 centrales
			Volume par site	20000		200000 m <sup>2</sup> qui est équivalent à une centrale de 20 MW
			Matériau: support réflecteur	Acier ou Aluminium		
			Matériau:	verre		



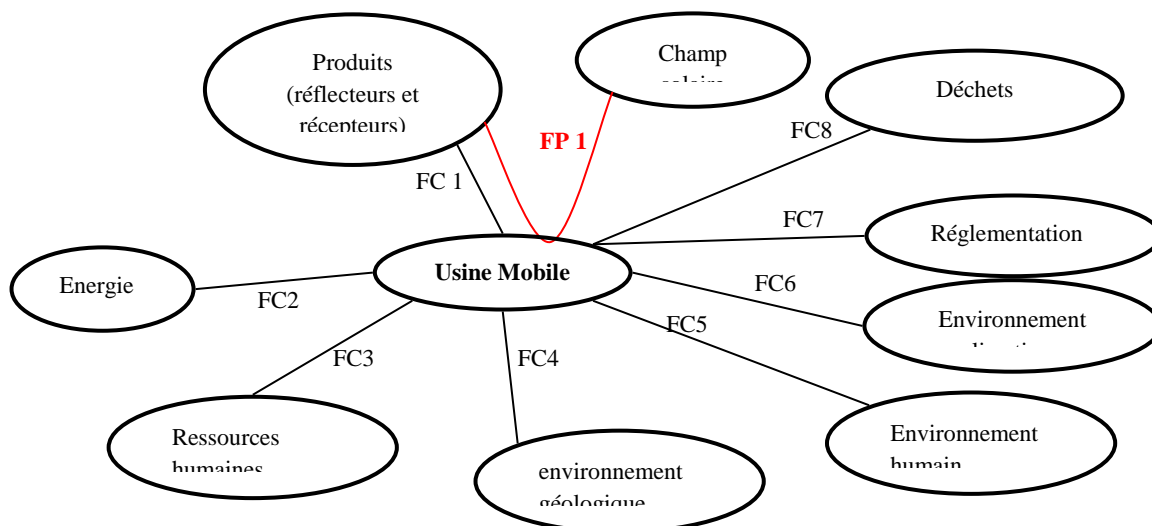
			surface réfléchissante			
			Longueur	10 m		
			Largeur	1 m		
			Précision profil réflecteur fabriqué	1 mm/m		
			Précision forme réflecteur	0.2mm/m		
			Taux de chute de matière			
			Cadence théorique	14 min		Taux de disponibilité 100% , correspond à une durée de production de 8 mois, conséquence d'un objectif d'installation d'une centrale / année.
			Taux de disponibilité / site	70%-80% (en fin de cycle de production)		20% cause arrêt maintenance 10% défaillance RH - L'évolution 70% à 80% par apprentissage
		Fabriquer des récepteurs	Données récepteur à compléter			
<b>FC 1</b>	<i>Assurer la disponibilité de Matière première</i>	Assurer disponibilité MP	Rupture MP	Nulle		Dimensionner les stocks et l'entrepôt de stockage en fonction du niveau de rupture acceptable
		Respecter les conditions de stockage MP				Voir les recommandations pour chaque MP
<b>FC 2</b>	<i>Assurer la disponibilité de l'énergie</i>	Quantité	Nature:			On ne met pas de contraintes de quantité : tenir compte du besoin en fonction de la période

						de production
		Type d'énergie				A dimensionner en fonction des process
<b>FC 3</b>	<i>Utiliser main d'œuvre locale</i>	Minimiser la dépendance à la qualification opérateurs				Distinguer les qualifications selon opérations : manutention chargement/déchargement.  Qualification personnel logistique interne
		Assurer la gestion des opérateurs (formation, management)  Team Alsolen	Ratio / équipe ( 8H)	10 personnes Team Alsolen : 3 personnes/équipe 8H : 1 responsable production, 1 responsable installation, 1 coordinateur équipes. 1 responsable usine.		Faire le bilan des tâches team Alsolen pour voir si il ya adéquation avec la charge  Compétences locales impliquées dans le pilotage des équipes (interface culturelle) et qui sera intégrée dans la post-gestion du champ solaire
			Durée de travail	8H/jour		
				6/7 jours		
			Durée des congés	xx jours		
			Coût des ressources	70 €/Heure		
						proximité zones population
<b>FC 6</b>	<i>S'adapter aux réglementations et normes en vigueur</i>	S'adapter aux normes de sécurité				Définir les normes  Définir les opérations à risque  En fonction du site d'implantation

		S'adapter aux normes environnementales (intégrer la valorisation des déchets)				
<b>FC 7</b>	<i>S'adapter à l'environnement climatique</i>	Assurer la durabilité de l'usine				
		Etre opérationnelle dans les températures ambiantes des sites	Température ambiante extérieure	-10° à 50°		Décliner en fonction des contraintes des process  Température de l'environnement
			Température d'usage	15° à 40°		
		Vent				
<b>FC 9</b>	<i>S'adapter aux contraintes des produits</i>	S'adapter aux contraintes de stockage des produits				
		S'adapter à l'évolution des produits				Usine flexible  EN fonction du volume à produire  En fonction du site : l'aspect de la qualité de la route ( aspect responsabilité et décision)
		Assurer la maintenance des produits				

#### 9.3.3.3.5 PHASE A314: UTILISATION SUR SITE 2/2 : INSTALLATION SUR SITE

- diagramme des interactions



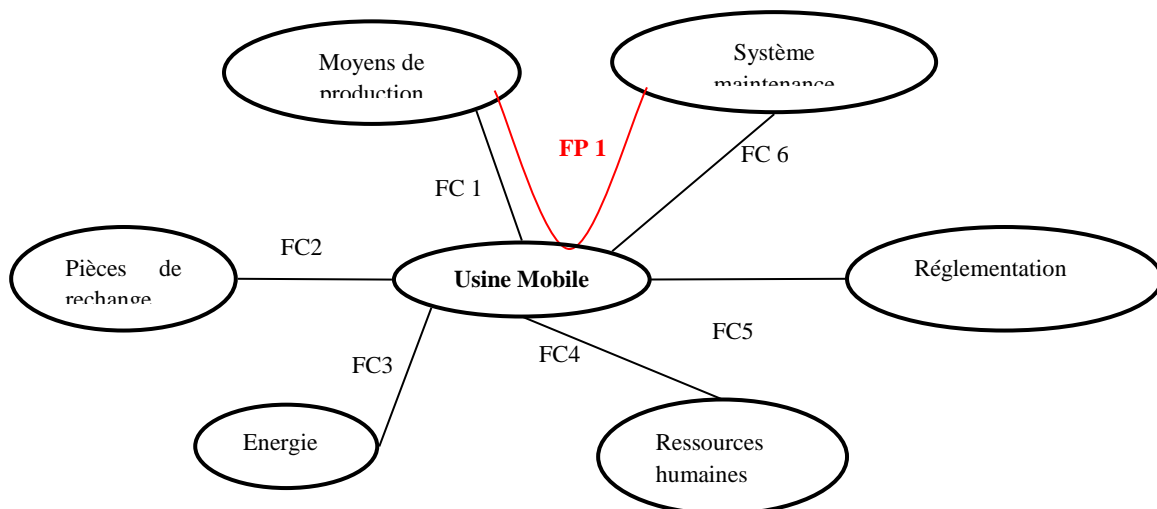
▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP2</b>	Installer des réflecteurs et des récepteurs sur le champ solaire	Installer réflecteur	Précision positionnement réflecteur installé			
			cadence	15 min		Avec un taux de disponibilité de 100%
		Installer récepteur				
<b>FC1</b>	<i>Assurer la disponibilité des produits</i>	Assurer les conditions de stockage sur site				
		Respecter les conditions de transport sur site				
		Respecter les contraintes d'installation sur site				
		Assurer la maintenance des produits				Changement de miroirs brisés?
<b>FC2</b>	<i>Assurer la disponibilité de</i>		Nature:			On ne met pas de contraintes

	<i>l'énergie</i>					de quantité
<b>FC3</b>	<i>Utiliser main d'œuvre locale</i>	Simplifier les gammes d'installation				
		Assurer la gestion des opérateurs (formation, management)				"Noyau dur"
<b>FC4</b>	<i>S'adapter aux contraintes géologiques du site</i>	S'adapter aux contraintes de circulation sur le site (nature sol)				Pendant l'installation des produits Mobilité sur site
<b>FC 5</b>	<i>S'adapter à l'environnement humain</i>	Assurer la sécurité du périmètre de l'usine				
		S'adapter au milieu culturel				proximité zones population
<b>FC 6</b>	<i>S'adapter aux réglementations et normes en vigueur</i>	S'adapter aux normes de sécurité				
		S'adapter aux normes environnementales				
<b>FC 7</b>	<i>S'adapter à l'environnement climatique</i>	Assurer la durabilité du produit				
		Etre opérationnelle dans les températures ambiantes des sites	Température ambiante	-10° à 60°		
<b>FC 8</b>	<i>Valoriser les déchets.</i>					

#### 9.3.3.3.6 PHASE A315: MAINTENANCE SUR SITE

- diagramme des interactions



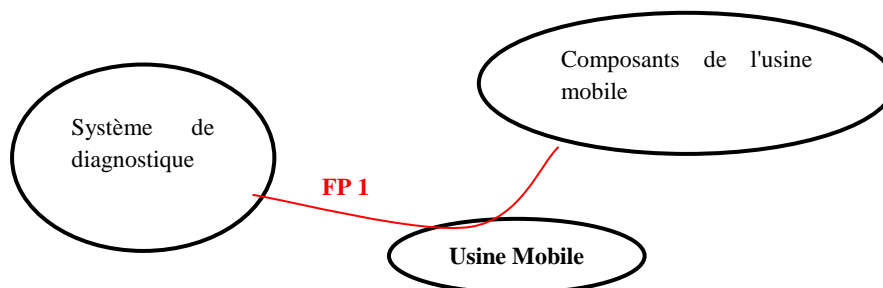
▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP 1</b>	Assurer la disponibilité des moyens de production		Taux de disponibilité			
<b>FC 1</b>	Assurer la maintenance des machines	Assurer l'accessibilité aux machines				
		Assurer la maintenabilité des machines				
<b>FC 2</b>	Assurer la disponibilité des pièces de rechange (PR)	Assurer l'approvisionnement des PR				
		Assurer le stockage des PR				
		Respecter les conditions de stockage des PR				
<b>FC 3</b>	Assurer la disponibilité de l'énergie	- Assurer la disponibilité des sources d'énergie nécessaire				(Eau, elec, carburant,...)

		Assurer la disponibilité de la quantité d'énergie pendant les interventions				
<b>FC 4</b>	<i>Assurer la maintenance par le personnel sur site</i>	Définir les niveaux de maintenance				
		Former les opérateurs				" Noyau dur"
<b>FC 5</b>	<i>Respecter les réglementations et normes en vigueur</i>	Respecter les normes de sécurité				
<b>FC 6</b>	<i>S'adapter au système de maintenance</i>	Prévoir un système de maintenance				

9.3.3.3.7 PHASE A316: DIAGNOSTIQUE SUR SITE

- diagramme des interactions

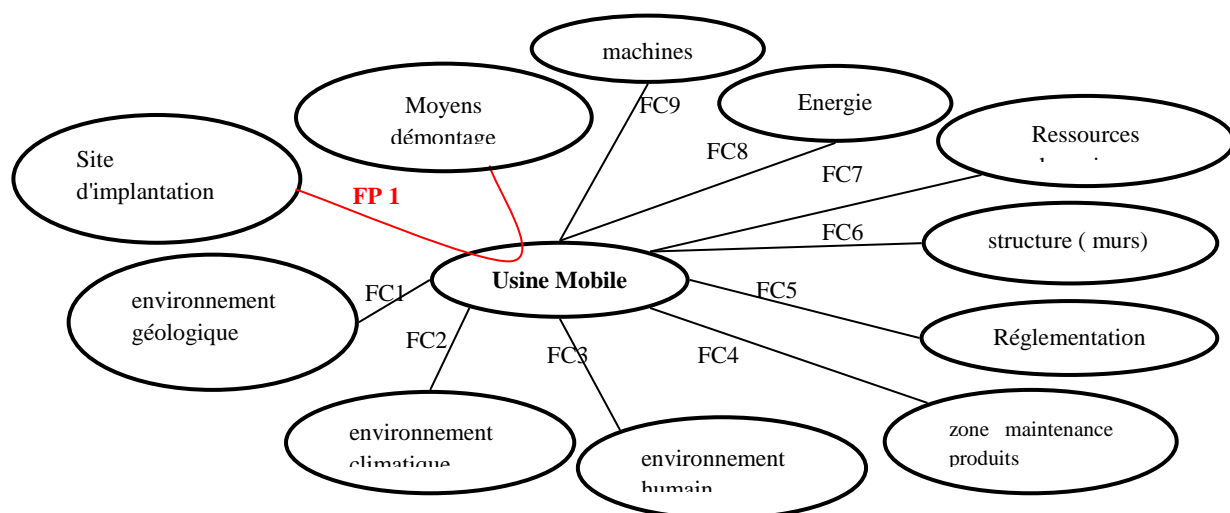


- Cahier des charges

Fonction	Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP1</b>	Réaliser un diagnostic de l'état des moyens de l'usine mobile				

9.3.3.3.8 PHASE A317: DEMONTAGE SUR SITE

- diagramme des interactions



▪ Cahier des charges

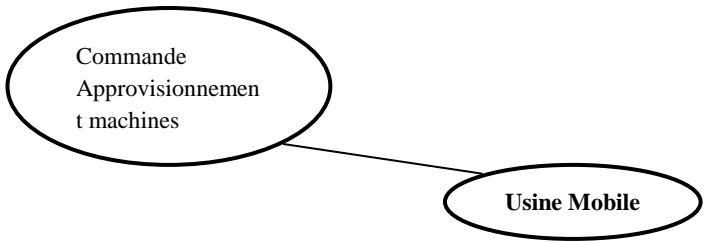
Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP1</b>	Démonter l'usine mobile	Assurer la démontrabilité Usine mobile				
		S'adapter aux moyens de démontage				
		Respecter les délais de démontage	Délai	1 mois		
<b>FC1</b>	S'adapter aux contraintes géologiques du site d'implantation					Contraintes état du champ après départ usine
<b>FC2</b>	S'adapter à l'environnement climatique					
<b>FC3</b>	S'adapter à l'environnement humain					
<b>FC4</b>	Mettre en place une zone maintenance produits	Prévoir une zone maintenance produits				
<b>FC5</b>	Respecter les réglementations et normes en vigueur	Respecter les normes de sécurité				
		Respecter les normes de démontage usine				



		Respecter les normes environnementales				
<b>FC6</b>	Démonter les structures usine	Avoir une structure démontable				
<b>FC7</b>	Utiliser main d'œuvre locale					Pendant phase démontage?
<b>FC8</b>	Assurer la disponibilité Energie	Prévoir le besoin en énergie				
<b>FC9</b>	Assurer le conditionnement des machines	Respecter les contraintes de conditionnement machine				

9.3.3.3.9 PHASE A315: APPROVISIONNEMENT SUR SITE

- diagramme des interactions

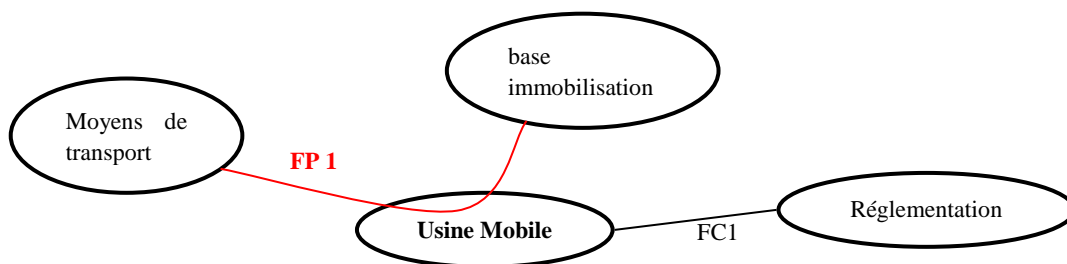


- Cahier des charges

Fonction	Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FC1</b>	Lancer les commandes d'approvisionnement des machines				

9.3.3.3.10 PHASE A321: TRANSPORT VERS BASE IMMOBILISATION

- diagramme des interactions

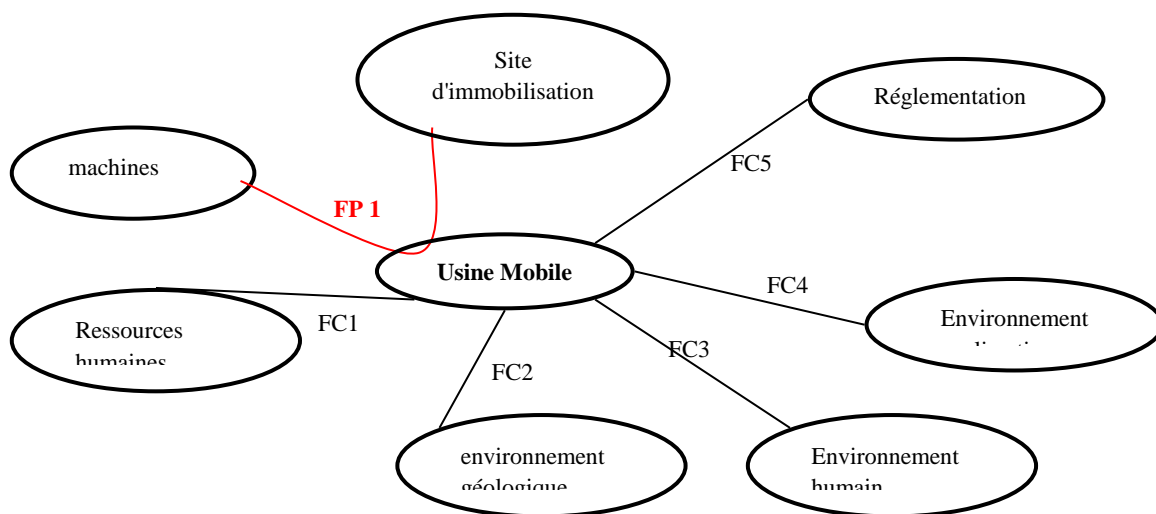


▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
FP 1	Assurer l'acheminement de l'usine mobile sur la base de d'immobilisation usine	- Transporter l'usine par des moyens standard	moyen de transport des machines	Containers 20' / 40'		
		Respecter les conditions de transport des machines				
FC 1	Respecter les réglementations et normes en vigueur					

9.3.3.3.11 PHASE A322: IMMOBILISATION USINE (STOCKAGE LONG)

▪ diagramme des interactions

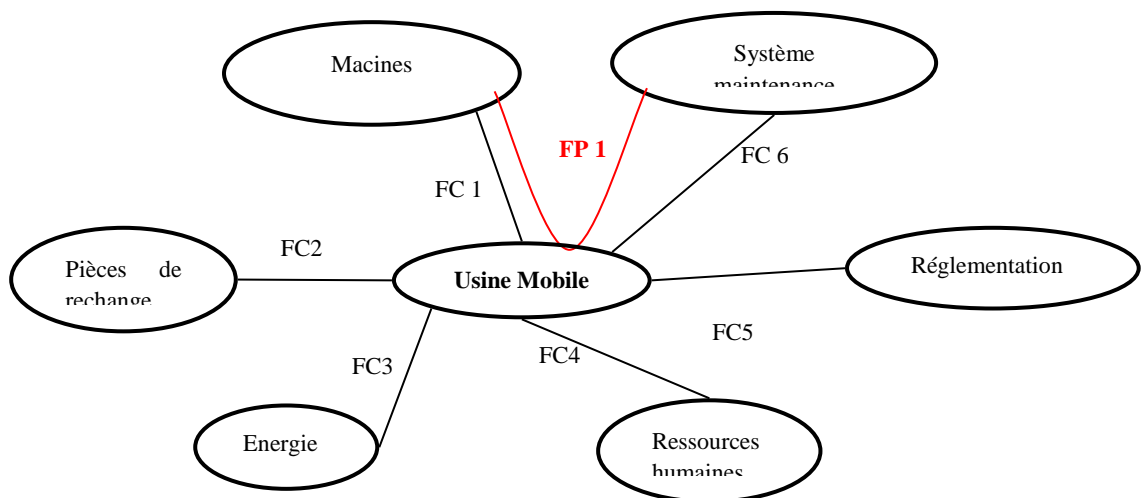


▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP 1</b>	Assurer le stockage de l'usine	Assurer le stockage de l'usine				
		Respecter les conditions de stockage des machines				
<b>FC 1</b>	<i>Ressources Humaines</i>					
<b>FC 2</b>	<i>S'adapter aux contraintes géologiques sur base immobilisation</i>					
<b>FC 3</b>	<i>S'adapter à l'environnement humain</i>					
<b>FC 4</b>	<i>S'adapter à l'environnement climatique</i>					
<b>FC 5</b>	<i>Respecter les réglementations et normes en vigueur</i>	Respecter les normes de sécurité				

9.3.3.3.12 PHASE A323: MAINTENANCE USINE ( PHASE IMMOBILISATION)

▪ diagramme des interactions



▪ Cahier des charges

Fonction		Sous fonction	critère	Performance	Flexibilité	remarques
<b>FP1</b>	Assurer la disponibilité des moyens de production		Taux de disponibilité			100% ?
<b>FC1</b>	Assurer la maintenance des machines	Assurer l'accessibilité aux machines				
		Assurer la maintenabilité des machines				
<b>FC2</b>	<i>Assurer la disponibilité des pièces de rechange (PR)</i>	Assurer l'approvisionnement des PR				
		Assurer le stockage des PR				
		Respecter les conditions de stockage des PR				
<b>FC3</b>	<i>Assurer la disponibilité de l'énergie</i>	- Assurer la disponibilité des sources d'énergie nécessaire				(Eau, elec, carburant,...)
		Assurer la disponibilité de la quantité d'énergie pendant les interventions				
<b>FC4</b>	<i>Assurer la maintenance par le personnel sur site</i>	Définir les niveaux de maintenance				
		Former les opérateurs				" Noyau dur"
<b>FC5</b>	<i>Respecter les réglementations et normes en vigueur</i>	Respecter les normes de sécurité				
<b>FC6</b>	<i>S'adapter au système de maintenance</i>	Prévoir un système de maintenance				

### 9.3.4 LA CONCEPTION D'UNE CONFIGURATION GÉNÉRIQUE DU SPM

Sur la base du cahier des charges (CDC\_1) présenté dans la section précédente, nous aborderons à présent la conception d'une configuration générique de l'UM. Cette conception vise à proposer une configuration initiale de l'UM recensant toutes les opérations et ressources nécessaires pour fabriquer le produit sur le site du client.

Le point de départ est la gamme de fabrication du produit (Réflecteur). On définit le processus des activités conduisant à l'obtention du produit final. Cet enchaînement est présenté dans la figure 9-10.

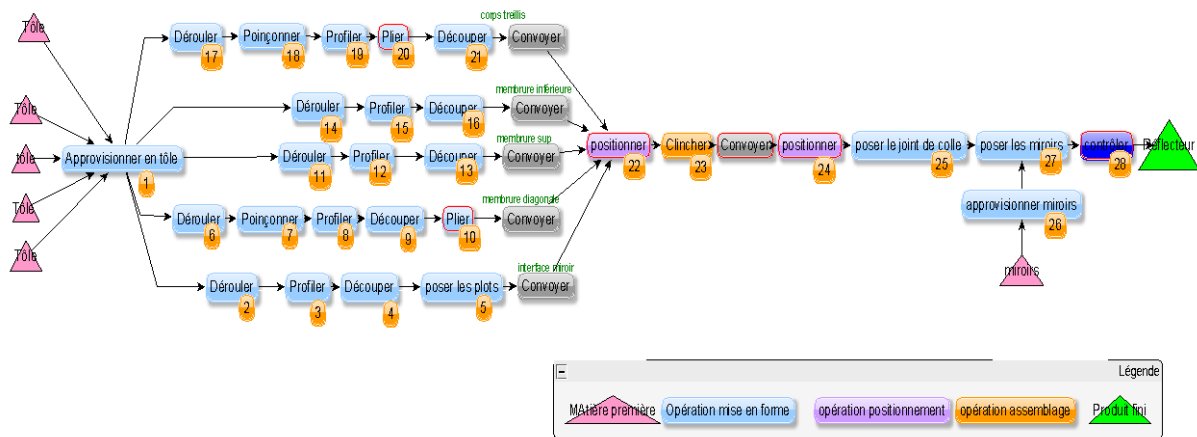


Figure 9-10 exemple de gamme des opérations nécessaires pour l'obtention du produit réflecteur

Dans ce processus de fabrication on distingue quatre types d'activités : activité de mise en forme, activité de positionnement, activité d'assemblage et activité de contrôle. Chacune de ces activités peut être assurée par une ou plusieurs ressources (humaines ou techniques) possibles. A chacune de ces activités de fabrication, une ressource est affectée (cf. figure 9-11), on définit ainsi une configuration de l'architecture interne de l'usine mobile.

Phase						Ressource		
Réf pha	Phase	Réf opérat	Opération	Illustration	Description		ce machi	c
Obtention membrure diagonale								
6	Dérouler					poinçonneuse automatique		2
7	Poinçonner					poinçonneuse automatique		2
8	Former	6,1	Former			poinçonneuse autom poste de clinchage au Devidoir		0,5
9	Plier W					outilage de positionn Découpe à la soie Découpe jet d'eau découpe laser		0,05
10	Découper				Découpe à longueur	cisaille automatique		2
	convoyer							

Figure 9-11 exemple d'affectation de ressources

Du moment où le concepteur choisit la ressource nécessaire pour accomplir l'activité en question, l'étape suivante concerne la détermination du nombre de ressources nécessaires. Pour cela, on se base sur la cadence nécessaire pour répondre à la demande du client.

Pour une activité donnée, le nombre de ressources nécessaires ( $N_{\text{ressource}}$ ) est donné par la formule (68) :

$$N_{\text{ressource}} : \text{Ent}\left(\frac{\text{cadence}_{\text{ressource}}}{\text{cadence}_{\text{nécessaire}}}\right) \tag{68}$$

Où l'opérateur *Ent* définit le nombre entier supérieur de la fraction calculée,

$\text{cadence}_{\text{nécessaire}}$  Représente la cadence requise par l'usine mobile pour satisfaire la demande.

Par exemple, pour l'activité 7 "Poinçonner" la ressource "poinçonneuse automatique" est choisie. Cette ressource a une cadence ( $\text{cadence}_{\text{ressource}}$ ) de 1 minute/produit. La cadence nécessaire pour l'usine mobile est de 14 min. Le nombre de « poinçonneuses automatiques » nécessaire est alors de **1** poinçonneuse.

En déterminant les types de ressources nécessaires ainsi que leurs nombres requis, on peut esquisser une première configuration de l'usine mobile qui permet de satisfaire l'objectif de délai. Cette première configuration est alors appelée « Configuration générique ». La figure 9-12 ci-dessous permet de spécifier l'ensemble des opérations nécessaires pour l'obtention du produit Réflecteur ainsi qu'un choix des ressources permettant de satisfaire chacune des opérations de fabrication.

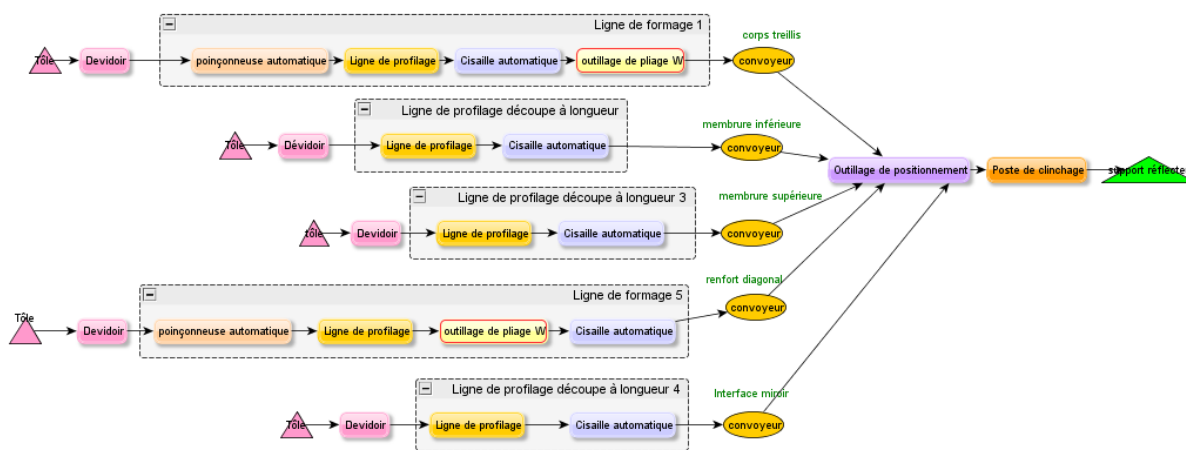


Figure 9-12 Esquisse d'une configuration générique de l'usine mobile

La configuration générique donne accès à un ensemble de données qui permettront d'évaluer des indicateurs de performance préliminaires (bien que non affinés) tels que les délais de réponse, les coûts d'obtention du produit final ou le respect des exigences de qualité (spécifications géométriques, efficacité optique, etc.). Ces indicateurs peuvent être utilisés d'ores et déjà, à ce stade, pour assister les décideurs, dans un processus de négociation avec un client par exemple, dans le choix de concepts de solutions.

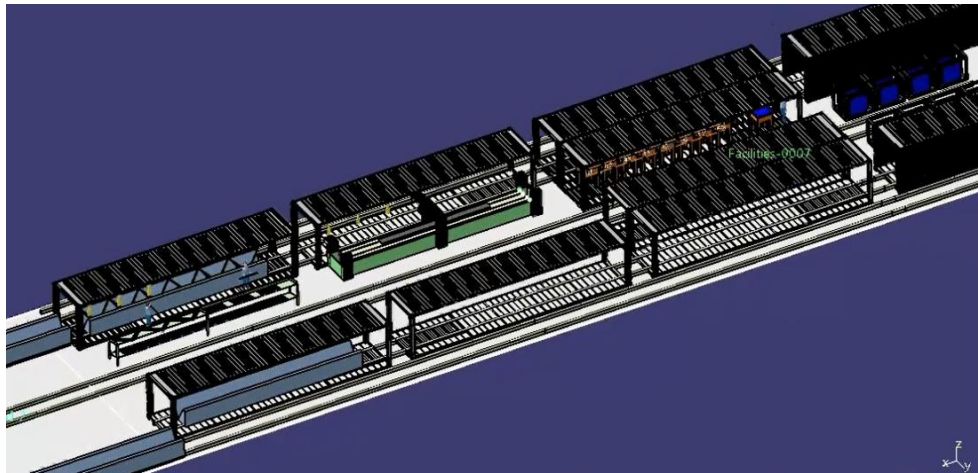


Figure 9-13 illustration d'une configuration générique du SPM

En fonction des spécifications du site d'implantation, toutes les opérations de fabrications ne peuvent être réalisées, pour des contraintes techniques ou économiques, sur le site final. Une analyse de ce qu'il serait possible de faire sur site ou ce qui serait opportun d'externaliser, s'impose.

### 9.3.5 L'ANALYSE DU FAIRE OU FAIRE FAIRE UN CAS D'APPLICATION

L'analyse de la stratégie de production de l'usine mobile permet de renseigner sur ce que l'UM doit être capable d'assurer en interne comme opérations et ce qu'il est nécessaire d'externaliser. Cette analyse vient affiner le Cahier des charges de conception de l'UM en permettant de se concentrer uniquement sur ce qui doit être compris dans l'usine.

La démarche d'analyse que nous suggérons a été détaillée précédemment dans le chapitre 4 (cf. § 4.4.). Dans cette partie nous proposons de la mettre en application. Nous allons choisir un composant, ensuite nous décrivons l'ensemble des alternatives (internes et externes) permettant de l'obtenir ainsi que leurs informations. Puis nous allons présenter le démonstrateur de recherche mis en place. Enfin nous analyserons les résultats.

#### 9.3.5.1 LA STRUCTURE DE L'OUTIL

Le démonstrateur de recherche est implémenté sous Matlab. Afin de faciliter sa prise en main, une interface avec Microsoft Excel a été mise en place. L'utilisateur charge les données d'entrées d'entrée sur une feuille Excel. Cette feuille permet de renseigner :

- des données sur le composant ou produit à analyser;
- des données sur le site d'implantation;
- des données sur les fournisseurs externes;
- des données de gestion de production (correspondant à l'alternative usine mobile);
- les préférences du décideur et,
- les paramètres (ou constantes) du modèle.

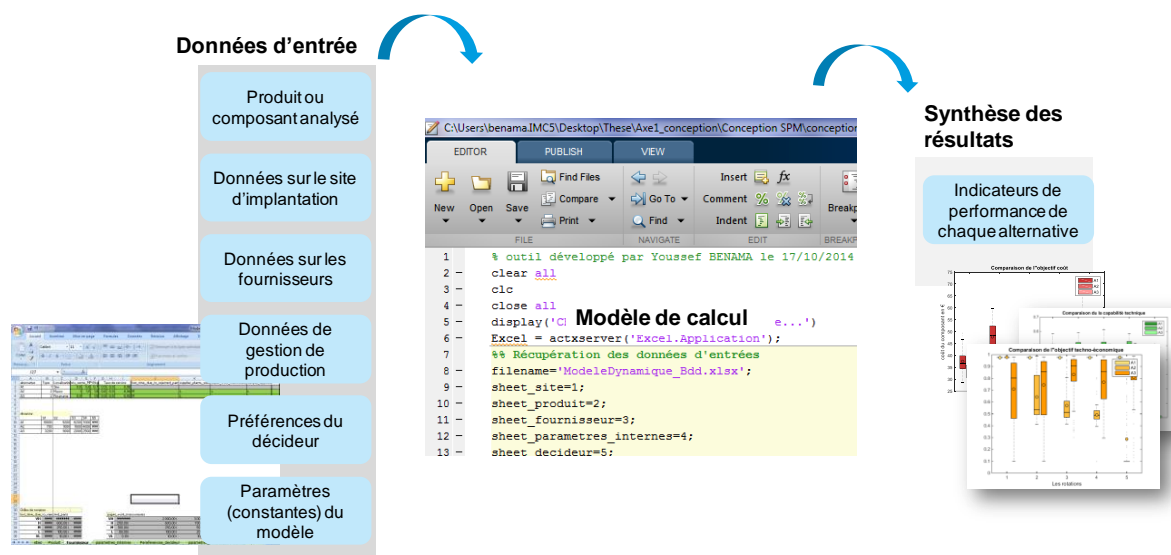


Figure 9-14 structure du démonstrateur d'analyse de la décision de faire ou faire faire

Cette interface de données d'entrée permet d'alimenter le modèle de calcul implémenté sous Matlab. Après le traitement, les résultats sont automatiquement chargés, sous forme de graphique, en utilisant l'interface graphique de matlab (génération automatique sans intervention de l'utilisateur). L'utilisateur peut également choisir d'afficher les résultats bruts, sous forme de matrice.

### 9.3.5.2 DE LA PRISE EN COMPTE DE L'INCERTITUDE SUR LES DONNEES D'ENTREE.

A un stade préliminaire d'étude, certaines données sont méconnues. Pour essayer de tenir compte de cette réalité, nous avons intégré un intervalle d'incertitude sur ces données. La modélisation de cette incertitude est faite de deux façons.

- *En utilisant une modélisation triangulaire* : la donnée est exprimée par une valeur minimale, valeur moyenne (la plus probable) et une valeur maximale. Cette donnée peut par exemple correspondre à une valeur de coût qui serait incertaine mais pour laquelle on peut donner un intervalle de variation.
- *En utilisant une échelle sémantique* qui renvoie sur une variable triangulaire. la donnée incertaine peut être qualifié par très faible, faible, moyen, important ou très important. Par exemple, la disponibilité de l'énergie sur un site peut être qualifiée en utilisant une variable sémantique de l'échelle précitée.

La propagation de l'incertitude dans le modèle est réalisée en procédant à un tirage aléatoire pour chaque donnée et on calcule les différentes sorties (indicateurs de performance) en utilisant la valeur tirée pour chaque donnée d'entrée. Cette procédure est rejouée sur  $n$  itérations. A chaque itération, on mémorise les différentes sorties. A la fin des  $n$  itérations, on reproduit les différentes sorties pour l'exprimer sous forme d'un intervalle.

Dans la suite on propose simuler l'analyse d'un composant du produit réflecteur.

### 9.3.5.3 LES DONNEES D'ENTREE



9.3.5.3.1 LE COMPOSANT ANALYSE

Le composant qu'on se propose d'analyser est la membrure inférieure du réflecteur (cf. figure 9-15). Ce composant joue un rôle central dans la garantie de la rigidité du réflecteur. La membrure inférieure est obtenue à partir des opérations de pliage et de découpage.

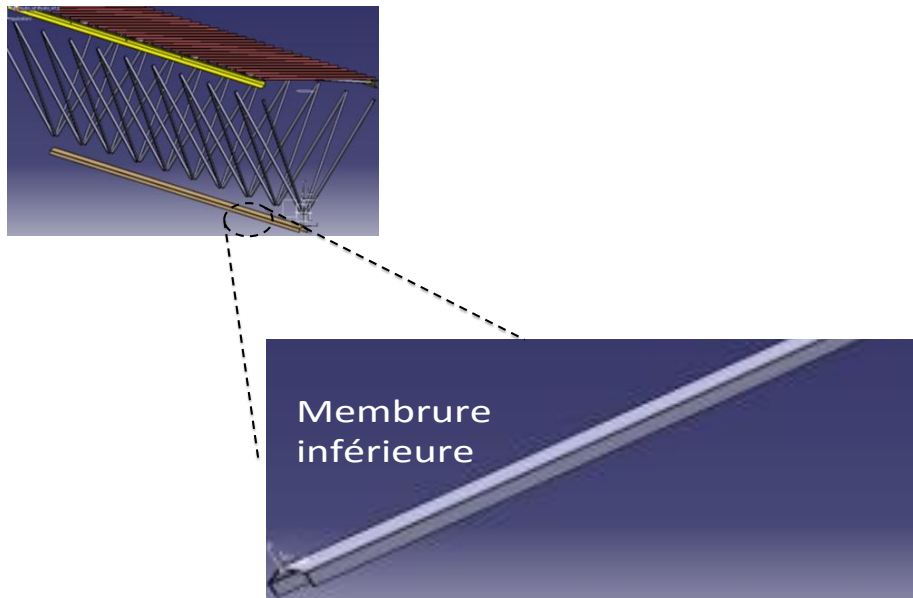


Figure 9-15 Le composant "membrure inférieure" proposé pour l'analyse faire ou faire faire

Chaque réflecteur contient une seule membrure inférieure dont la masse est de 20 kg approximativement. Les données à renseigner sur le composant sont (figure 9-16) :

	Désignation	Qte_produit	masse_produit
Produit	membrure inférieure	1	20

Figure 9-16 données d'entrée sur le produit à analyser

9.3.5.3.2 DONNEES SUR LE SITE D'IMPLANTATION

Le site d'implantation est localisé au Maroc. Pour ce site il est sujet de produire 60 000 réflecteurs dans un délai de 400 jours. Les taxes douanières sur l'importation des matières premières sont incertaines. Pour cela on utilise une modélisation triangulaire : [100€, 200€, 250€] pour un conteneur 40'. De plus la disponibilité de la qualification et de l'énergie nécessaires pour le fonctionnement d'une usine mobile ne peuvent être estimées que qualitativement. Nous utilisons une échelle sémantique. Cette échelle sémantique est ensuite traduite en des valeurs comprises entre 1 et 9, comme illustrée dans la figure 9-17.

Grilles de notation : disponibilité de qualification				
Très importa	<b>VH</b>	7	8	9
Important	<b>H</b>	5	7	8
Moyen	<b>M</b>	3	5	7
Faible	<b>L</b>	2	3	5
Très faible	<b>VL</b>	1	2	3

Figure 9-17 Grille de notation pour la disponibilité de la qualification

Les données d'entrée qu'il faut renseigner sur le site d'implantation sont indiquées dans la figure 9-18

	Localisation	volume	délat	frais douane par conteneur(A1,A2,A3)			qualification_availability	energy_availability
S1	Maroc	60000	400	100	200	250	H	H

Figure 9-18 données d'entrée sur le site d'implantation

### 9.3.5.3.3 LES DONNEES SUR LES ALTERNATIVES DE PRODUCTION

En plus de l'usine mobile, on admet qu'il existe deux fournisseurs externes capables de produire le composant "membrure inférieure". L'un des deux fournisseurs est situé proche du site d'implantation. L'autre fournisseur est localisé dans l'Europe de l'Est. Au total on compte trois alternatives de production de la membrure inférieure : A1 : usine mobile, A2 : fournisseur au Maroc et A3 : fournisseur en Roumanie.

Les données nécessaires sur chaque alternative concernent d'une part les facteurs de coûts et d'autre part les capacités techniques. Selon les informations disponibles sur chaque donnée et leur maturité, on peut soit quantifier la dite donnée soit la qualifier. La figure récapitule l'ensemble des données nécessaires.

alternative	Localisation	prix vente MP (€/kg)			Taux de service		
A1	Site	0,6	0,6	0,7	0,9	0,94	0,96
A2	Maroc	1	1,5	1,8	0,8	0,9	0,94
A3	Roumanie	0,9	1	1,5	0,85	0,9	0,92

#### Coûts additionnels

alternative	Localisation	Coûts additionnels			
		lost time due to rejected parts	supplier plants visits	paper work inaccuracies	sample approval
A1	Site				
A2	Maroc	M	L	L	L
A3	Roumanie	M	L	L	L

alternative	Localisation	manufacturing capability			technical_support	design_capability	investment_onRD	speed_of_development	npi_rate
A1	Site								
A2	Maroc	90	96	100	H	H	M	M	
A3	Roumanie	90	96	100	M	H	M	H	

Figure 9-19 Ensemble des données nécessaires sur les alternatives de production

### 9.3.5.3.4 DONNEES DE GESTION DE PRODUCTION

Les données de gestion de production sont des informations internes de l'entreprise. Ces informations concernent des coûts, des hypothèses de conception de l'usine mobile (comme le taux de contrôle ou la mobilité du procédé qui serait utilisé pour la production de la *membrure inférieure* ou encore le nombre de postes nécessaires.

		S1
Taux_controle_reception		100%
		100%
		100%
charge_conteneur (tonnes)		26
cout_retouche		15,00 €
cout_controle_reception		1,00 €
process mobility		5
fournisseur_qualifie		5
nbre_poste		2
cout_1poste_cycle	min	10 000,00 €
	prob	80 000,00 €
	max	100 000,00 €
cout_stockage_matière		2%

Figure 9-20 Données d'entrée sur la gestion de production

#### 9.3.5.3.5 PREFERENCES DU DECIDEUR

Les préférences du décideur concernent d'un côté les paramètres des différentes fonctions d'agrégation ou de satisfaction utilisées dans le modèle et d'un autre côté, les pondérations traduisant l'importance des critères associés à ces pondérations. Les données d'entrée nécessaire ont été regroupées par type d'indicateur de performance :

Dans ce paragraphe, les différents paramètres ont été présentés lors de la présentation du modèle de décision dans le chapitre 4. Un renvoi vers les paragraphes concernés est donné à l'occasion. Dans ce qui suit, on présente les valeurs qui ont été utilisés dans la simulation.

- Objectif de coût

Les données concernent les paramètres de la fonction de satisfaction (cf. page 168).

Objectif coût	
	S1
SL	40
AC	60
dSL	0,9
dAC	0,1

Figure 9-21 préférences du décideur concernant l'objectif de coût.

- Objectif de capacité technique

Les données nécessaires concernent le paramétrage de la fonction de satisfaction, et les différentes pondérations des fonctions d'agrégation (cf page 169).

Objectif capacité technique externe	
manufacturing_capabilities_dSL	0,9
manufacturing_capabilities_dAC	0,2
s_technical_capability	-20

capabilité technique						
poids_attributs_capabilite_extern	0,3335	0,3	0,1	0,1	0,08325	0,08325
poids_capabilite_interne_site_implanta	0,5	0,5				
capabilite_interne_poids_capacite_app	0,2	0,8				
ponderation_capabilite_interne	0,375	0,125	0,5			

Figure 9-22 données d'entrée relatives à l'évaluation de l'objectif de capacité technique

- Objectif technico-durable (OTD)

Les données nécessaires concernent les pondérations utilisées dans la fonction d'agrégation et le paramètre de la stratégie d'agrégation (s\_OTD) (cf. page 163)

OTD : Objectif Technico-durable	
ponderation_OTD	
	Valeur_pour_!
cout	0,635
capabilite_technique	0,287
objectif_socio_economic	0,078
s_OTD	108

Figure 9-23 données d'entrée liées à l'évaluation de l'objectif technico durable.

- Performance locale (EPL)

Les données concernent les paramètres de la fonction de satisfaction (cf. page 176).

EPL : Evaluation de la performance locale	
ponderation_EPL	
	Valeur_pour_!
Objectif_technico_durable	0,5
Objectif de maitrise de risque	0,5
s_EPL	-20

Figure 9-24 données d'entrée liées à l'évaluation de la performance locale

### 9.3.5.4 RESULTAT DE L'ANALYSE

Notre approche vise à fournir au décideur un tableau de bord qui lui permet d'évaluer les différentes alternatives de "faire ou faire faire". Le décideur peut envisager de comparer les différentes alternatives en se basant sur l'analyse de chaque objectif de performance (coût, risque, technique, etc.) (cf. figure 9-25). Selon le nombre d'alternatives à comparer, la capacité humaine peut être limitée pour prendre une décision basée sur plusieurs critères. Dans ce cas, l'analyse de la performance agrégée (LPE) fournit un autre niveau d'analyse dans le but de procéder à un classement des alternatives analysées.

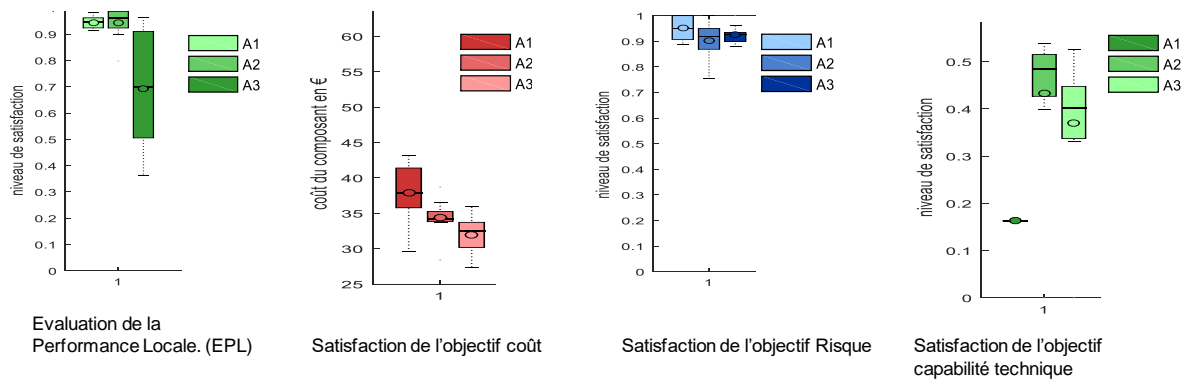


Figure 9-25 Illustration du tableau de bord fourini au décideur pour l'assister dans la décision de faire ou faire faire.

### Interprétation des résultats

Dans la lecture et l'interprétation des résultats de la simulation effectuée, nous nous intéresserons à deux mesures : la moyenne et l'étendu de l'intervalle de variation. Le décideur a la possibilité de procéder à un classement des 3 alternatives en se focalisant sur la performance moyenne. Mais une attention particulière devrait être réservée à la variation de la performance. Dans un contexte industriel, une alternative qui assure une performance acceptable avec un faible risque de variation peut être préférée à une autre alternative qui promettrait une meilleure performance mais avec un grand risque de variation.

- **L'analyse de la performance locale (EPL) :** au global, l'alternative A1 (usine mobile) semble être meilleure que les deux autres alternatives. Cette performance est d'abord due à la satisfaction (automatique) de l'indicateur socio-économique. Puisque par définition, l'usine mobile fait appel à la main d'œuvre locale, condition nécessaire pour satisfaire l'indicateur socio-économique. De plus, l'étendu des variations de la performance dans le cas de l'usine mobile est meilleure que dans le cas des alternatives « externaliser ». Ceci peut s'expliquer par la maîtrise et l'accès facile aux différentes informations requises.
- **L'analyse de l'objectif de coût :** l'offre du fournisseur low cost (A3) est naturellement la plus importante d'un point de vue coût. Concernant l'usine mobile, on s'est placé dans le cas où le site analysé correspond à la première commande de l'UM. Dans ce, cas les coûts d'investissement sont importants. En outre, il faut tenir compte aussi de l'approvisionnement de matière première et les différents coûts

inhérents (en fonction de la localisation du fournisseur de matière première. Dans notre simulation, on a supposé qu'il est localisé en Chine).

- **L'analyse de l'objectif de maîtrise des risques** : l'alternative A1 (usine mobile) affiche une performance meilleure que les deux autres alternatives

---

ANNEXE

2

10 VERS UNE INTEGRATION DU CONCEPT DE MOBILITE DU  
SYSTEME DE PRODUCTION DANS LES METHODES DE  
MODELISATION EN ENTREPRISE

---





Dans cette annexe on s'intéresse à l'usage qui peut être fait des outils de modélisation en entreprise pour la gestion de la mobilité successive multi sites du système de production. Dans une approche de conception de systèmes de production mobiles successivement sur plusieurs sites, la modélisation du système de production peut être utile au concepteur pour raisonner sur les différents scénarios de reconfiguration du SPM et pré évaluer leur impact sur les performances globales du système. On évoquera d'abord le besoin d'une modélisation générique du SPM. Ensuite, au regard des exigences qu'on a pu identifier, on justifiera le choix d'un formalisme de modélisation en entreprise. Enfin, On proposera des réflexions pour la considération de la mobilité dans la modélisation du système. Avant de conclure cet annexe.

## **10.1 LE BESOIN D'UNE MODELISATION GENERIQUE DU SYSTEME DE PRODUCTION**

La gestion de la mobilité successive du SPM sur plusieurs sites nécessite donc une re-conception/reconfiguration récurrente du SPM. A la différence de la conception pour le premier site où le point de départ de la conception est le cahier des charges fonctionnel, i.e. il n'existait pas de version antérieure du SPM, la notion de re-conception part d'une configuration initiale comme point de départ de la démarche d'analyse. Pour atteindre la nouvelle configuration adéquate, il est nécessaire d'identifier quels sont les éléments (de la configuration initiale) qui peuvent être sujet à un changement d'un site à un autre et qui sont ceux qui demeurent invariant formant ainsi une structure fixe du SPM. La re-conception porte uniquement sur les composants ou modules du SPM qui doivent être adaptés en fonction du contexte du site de production. On définit ainsi deux catégories de composants du SPM : des variables contextuelles et des invariants. En plus de l'identification des invariants et variables contextuelles du SPM, il est nécessaire de comprendre quels éléments de l'environnement du SPM induisent un changement<sup>49</sup>.

La gestion de cet aspect dynamique (d'un site à un autre) de la conception du SPM nécessite d'instaurer un modèle générique du système de production. Ce modèle générique sera "instancié" en fonction des données de l'environnement du site de production sur lequel le SPM doit être projeté<sup>50</sup>. La modélisation du système de production mobile à reconcevoir peut être en effet utile pour le concepteur pour raisonner sur différents scénarios de modification du SPM et pré évaluer leur impact sur les performances globales du système. En particulier, la modélisation multi vues permet de pallier à la complexité excessive d'une représentation exhaustive du SPM en considérant celui-ci selon plusieurs points de vue.

<sup>49</sup> par exemple une variable du SPM est le nombre de lignes de production (ajout ou suppression). Cette variable dépend d'un facteur de l'environnement externe qui est le volume de la demande

<sup>50</sup> Le terme est emprunté au domaine militaire où on parle de projection d'équipes sur des théâtres d'intervention.

Par la suite nous aborderons l'usage des techniques de modélisations en entreprise pour les systèmes de production mobiles. L'offre en outils et techniques de modélisation en entreprise étant abondante dans littérature, il est nécessaire dans un premier temps de fixer un cadre de modélisation pour mener notre raisonnement.

## 10.2 LE CHOIX DU FORMALISME DE MODELISATION

« *La modélisation en entreprise a pour objet la construction de modèles d'une partie déterminée d'une entreprise pour en expliquer la structure et le fonctionnement ou pour en analyser le comportement* » (Vernadat, 1999). Le chapitre 2 a présenté les cadres de modélisation en entreprise les plus répandus dans la littérature. Dans ce paragraphe nous allons procéder au choix du cadre qui pourrait être adapté pour notre problématique. Pour faire, nous allons d'abord exprimer nos exigences, ensuite nous allons comparer les différents cadres au regard des exigences exprimées. Enfin, nous décidons du cadre le plus adapté.

Le cadre de modélisation générique du SPM doit permettre au concepteur/décideur de générer, évaluer et choisir une configuration du SPM en fonction des informations et objectifs exprimés vis-vis d'un site de production et en tenant compte de la configuration existante du SPM. Au regard des exigences de la mobilité successive multi sites du SPM présentées précédemment (cf. §5.3.2), le cadre de modélisation doit fournir ces fonctions :

- Prendre en compte les aspects humains
- Prendre en compte les aspects organisationnels
- S'appuyer sur un modèle de référence
- Considérer les phases de vie du SPM
- Fournir une représentation multi-vues : fonctionnelles, ressources, informationnelles, décisionnelles et organisationnelles du système
- Utiliser un modèle formel : dans un objectif de formalisation et d'automatisation de l'évaluation des performances du SPM.
- Prendre en compte les spécificités de mobilité : En effet, nous considérons que la modélisation de la mobilité du système de production doit considérer deux aspects :
  - un aspect statique de la mobilité qui concerne les attributs intrinsèques des modules du SPM qui permettent de rendre chaque module mobile ou qui permettent d'évaluer le degré de mobilité. Ces attributs doivent apparaître dans la description des modules (par exemple le poids du module ou le nombre de cycle de mobilité).
  - Un aspect de mobilité dynamique qui prend en compte les exigences de la mobilité successive multi sites. Cet aspect concerne les exigences évoquées dans le paragraphe précédent (cf. § 5.3.2).

Le tableau 10-1 présente un comparatif des quatre cadres de modélisation au regard des critères susmentionnés. Cependant, aucun des cadres de modélisation analysés ne fournit une réponse disponible et complète pour la modélisation de systèmes de production mobiles. L'analyse de notre besoin de modélisation présentée dans le tableau 10-1 montre que le cadre

de modélisation GERAM couvre l'essentiel des aspects identifiés comme indispensable pour l'instauration d'un modèle générique du SPM. GERAM de part sa vocation comme une norme généralisant les principaux cadres de modélisation, fournit un cadre assez complet qui peut être adapté à notre besoin de modélisation. Son architecture de référence GERA présente les concepts génériques utiles pour l'ingénierie de l'entreprise. L'axe des vues considère toute partie de l'entreprise selon quatre types de vues : fonctionnelle, informationnelle, organisationnelle ou de ressource. Dans cette architecture on reconnaît aussi les trois composantes de PERA (partie commande, partie humaine et partie opérative) qui placent la prise en compte des aspects humains au cœur de l'architecture.

Tableau 10-1 Comparaison des méthodes de modélisations au regard des critères correspondant à notre besoin

Aspects du modèle générique	Zachman	GIM	CIMOSA	PERA	GERAM
C1 Modèle de référence	■	■	■		■
C2 Modélisation multi vues	■	■	■	■	■
C3 Aspects humains		■	■	■	■
C4 Aspects organisationnels			■		■
C5 Couverture du cycle de vie du SPM		■		■	■
C6 Modèle formel			■		■
C7 Prise en compte des spécificités de mobilité					

Répond partiellement au critère
  Répond au critère

Notre proposition du modèle générique va se baser sur l'adaptation du cadre de GERAM afin de pouvoir considérer les spécificités de la mobilité du système de production. Nous allons dans un premier lieu examiner les différentes vues de modélisation nécessaires du SPM. Ensuite nous allons analyser dans quelle mesure il est possible d'adapter le cadre de modélisation de GERAM pour prendre en compte le concept de mobilité.

### 10.3 VERS UNE PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LES OUTILS DE MODELISATION DES SYSTEMES DE PRODUCTION

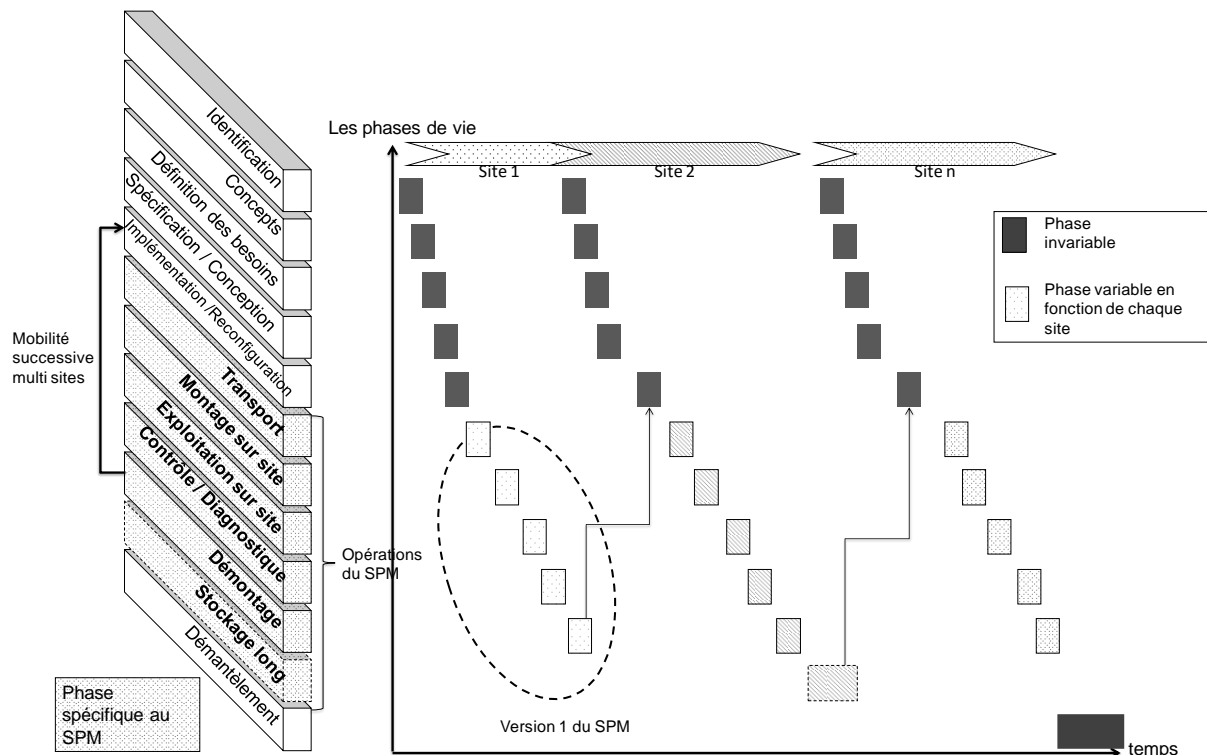
Afin de réduire la complexité des modèles issus du système, le cadre de référence GERA fournit le concept de vues qui permet de décrire les processus opérationnels comme un modèle intégré, mais qui va permettre de les présenter à l'utilisateur en différents sous-ensemble (vues du modèle) du modèle intégré (IFIP-IFAC, 1999). Une description de ces vues a été présentée dans le chapitre 2 (cf. § 2.5). Nous allons les présenter dans ce paragraphe, au risque de nous répéter, dans un objectif d'analyse en vue d'une application / adaptation pour les systèmes de production mobiles.

### 10.3.1 LES PHASES DE VIE DU SPM

L'une des premières particularités identifiées pour les SPM par rapport aux systèmes de production classiques ou sédentaires, est la nécessité de considérer d'autres phases de vie en particulier pendant l'exploitation sur site. Ces phases de vie ont été présentées et justifiées dans le chapitre 3 (cf. § 3.3.3.1). Elles concernent les phases de : transport, montage sur site, exploitation sur site, contrôle et diagnostique, démontage sur site et au besoin une phase de stockage. Chacune des phases imposent des contraintes dans la conception et la gestion du SPM.

Par ailleurs, la mobilité successive multi sites du SPM nécessite de considérer une "itération" des phases concernées. Comme on l'a mentionné précédemment (cf. § 5.4), la mobilité successive du SPM appelle particulièrement à un besoin d'adaptation / reconfiguration du SPM d'un site à un autre. En effet dans ce contexte de mobilité récurrente on distingue deux types de phases (figure 10-1) :

- des *phases invariables* dont les activités vont être similaires indépendamment du site de production. Par exemple, dans la phase d'identification il est sujet d'analyser le besoin et l'environnement du site de production. Le processus d'analyse est similaire d'un site à autre. Les phases invariables identifiées concernent les phases de : *identification, concepts, définition des besoins, spécification / conception, Implémentation /reconfiguration et démantèlement.*
- des *phases variables* d'un site à un autre qui vont dépendre d'un côté des caractéristiques du site de production et d'un autre côté de la configuration du SPM. A titre d'exemple, la phase de transport dépendra d'une part de la configuration du SPM dans la mesure où il est nécessaire d'identifier qu'est qui va être transporté, avec quelles contraintes et dans quels volumes et d'autre part des caractéristiques du site de production comme la localisation géographique ou les infrastructures existantes qui auront un exemple sur le choix des modes de transport. Parmi les *phases de vie variables* on cite les phases de : *transport, montage sur site, exploitation sur site, contrôle/diagnostique, démontage et stockage long.*



**Figure 10-1** Prise en compte des phases de vie du SPM et de la gestion de mobilité successive du SPM dans la description du cycle de vie de GERA

La Figure 10-1 a aussi pour objectif de mettre en exergue une conséquence de la mobilité successive multi site du SPM : le chevauchement des phases de vie. En effet, chaque site de production exige une nouvelle version (configuration) du SPM. De ce fait, l'entreprise aurait à gérer deux versions (configurations) du SPM : une configuration physique qui est en exploitation sur un site de production et une autre configuration virtuelle qui correspond à celle qui est encore au cours d'étude pour la préparation du prochain site de production. L'étude de la nouvelle configuration virtuelle (celle nécessaire pour le site  $i+1$ ) va se baser sur les retours d'expérience accumulés sur les sites précédents. D'où un besoin de capitalisation des connaissances car, comme le souligne Vernadat (1999) "L'avantage le plus important résultant de la modélisation en entreprise provient certainement du pouvoir de capitalisation de connaissances sur l'entreprise par l'élaboration de modèles. Ces modèles permettent de représenter les aspects essentiels d'une entreprise dans une forme compréhensible par un grand nombre d'utilisateurs de cette entreprise.". Il s'agit en effet de recalculer les modèles au fur et à mesure des sites pour servir de base aux activités de reconception futures.

### 10.3.2 LA MODELISATION FONCTIONNELLE DU SPM

La vue fonctionnelle synthétise une description fonctionnelle du système. Elle inclut des modèles fonctionnels, des modèles de processus et des modèles décisionnels. Ces modèles possèdent différentes *puissances expressives* selon les questions auxquelles ces modèles peuvent répondre (IFIP-IFAC, 1999). Pour la modélisation des aspects fonctionnels du système, GERAM ne prescrit pas un formalisme unique. Il laisse la possibilité à l'analyste/concepteur pour choisir le formalisme le plus adapté à ses pratiques et besoins. Ainsi pour la représentation de la vue fonctionnelle plusieurs modèles sont disponibles (IFIP-

IFAC, 1999) : CIMOSA pour les modèles fonctionnels, La grille GRAI et les réseaux GRAI pour représenter les centres de décision. Les réseaux de Petri pour représenter les réseaux de processus, entre autres.

Par ailleurs, la vue fonctionnelle permet de distinguer deux aspects du système : ses fonctionnalités et son comportement (IFIP-IFAC, 1999). Les fonctionnalités décrivent l'ensemble des activités que doit fournir le SPM sur le site de production. Les fonctionnalités du système de production peuvent être incarnées par la notion de tâches à réaliser (Vernadat, 1999). D'un point de vue interne du SPM, cela correspond à l'ensemble des opérations de production nécessaires pour l'obtention du produit. Ces opérations sont définies en fonction de ce que le SPM doit produire sur chaque site de production. Les fonctionnalités du SPM peuvent être variables d'un site à un autre. Cette variabilité fonctionnelle est en partie dépendante (la conséquence) de l'analyse de "*faire ou faire faire*" présentée dans la section précédente (cf.§ 5.4.2).

*Les fonctionnalités du SPM est une variable contextuelle qui est définie en fonction de l'analyse de "faire ou faire faire" pour chaque site de production*

Le comportement de l'entreprise décrit dans quel ordre sont exécutées les tâches. Le comportement est représenté par la notion de processus qui illustre l'enchaînement logique d'activités dans le temps afin de réaliser un but (Vernadat, 1999). « *Un processus opérationnel est un ensemble partiellement ordonné d'activités d'entreprise dont l'exécution a pour but de contribuer à la réalisation d'un des objectifs de l'entreprise* ».

### 10.3.3 LA MODELISATION DES RESSOURCES DU SPM

"*Une ressource est une entité (humaine ou technique), qui, lorsqu'elle est disponible, joue un rôle dans réalisation d'une certaine catégorie de tâches*" (Vernadat, 1999). Les ressources intervenants dans le SPM ont été considérés sous trois formes de modules : techniques (ou matériels) , humains et informationnels. En ce qui concerne la modélisation des ressources Vernadat (1999) note que "*contrairement [à la vue fonction], peu de méthodes de modélisation bien établies existent pour la vue des ressources*". La méthodologie CIMOSA fut l'une des premières approches à proposer un cadre formel pour la description des ressources de l'entreprises (Vernadat, 1999). La description des ressources peut être considéré selon deux types :

- un *modèle de données* présentant les principaux attributs nécessaires à la description de la plupart des types de ressources. On peut lister : Attributs généraux, capacité et charge, attributs relatifs à la gestion, attributs relatifs à la fiabilité, attributs concernant les aptitudes, attributs relatifs aux opérations fonctionnelles.
- un *modèle dynamique* décrivant la logique de fonctionnement de la ressource dans le temps. L'utilisation de ce modèle peut être justifiée dans le cas d'études de simulation d'ordonnancement ou supervision par exemple. Les méthodes de description de ce modèle varie selon le cas d'application : équation différentielle, GRAFCET, réseaux de Pétri, etc.

Afin de prendre en compte le concept de mobilité du système de production, le *modèle de données* des ressources peut être complété par quatre attributs identifiés comme nécessaire pour la prise en compte de la mobilité des ressources (Figure 10-2) :

- *attributs de transport* : caractérisent la transportabilité de la ressource tels que le poids et dimensions de la ressource et le niveau de résistance aux contraintes de transports.
- *attributs relatifs au montage/démontage sur site* : concernent les attributs nécessaire pour définir la « montabilité » de la ressource sur le site de production, tels que le nombre de cycles de mobilité (maximal), les ressources matérielles et humaines nécessaires pendant la phase de montage sur site ou le temps de montage/démontage requis.
- *attributs relatifs à la production* : caractérisent les conditions nécessaires pour l'exploitation de la ressource pendant la phase de production sur site. Ces attributs peuvent définir les besoins en ressources humaines (nombre, compétences) et l'énergie nécessaire.
- *attributs relatifs à la maintenance* : concernent les conditions nécessaires pour assurer la maintenance de la ressource sur site, tels que les ressources matérielles et humaines nécessaire ou la disponibilité de pièces de rechange.

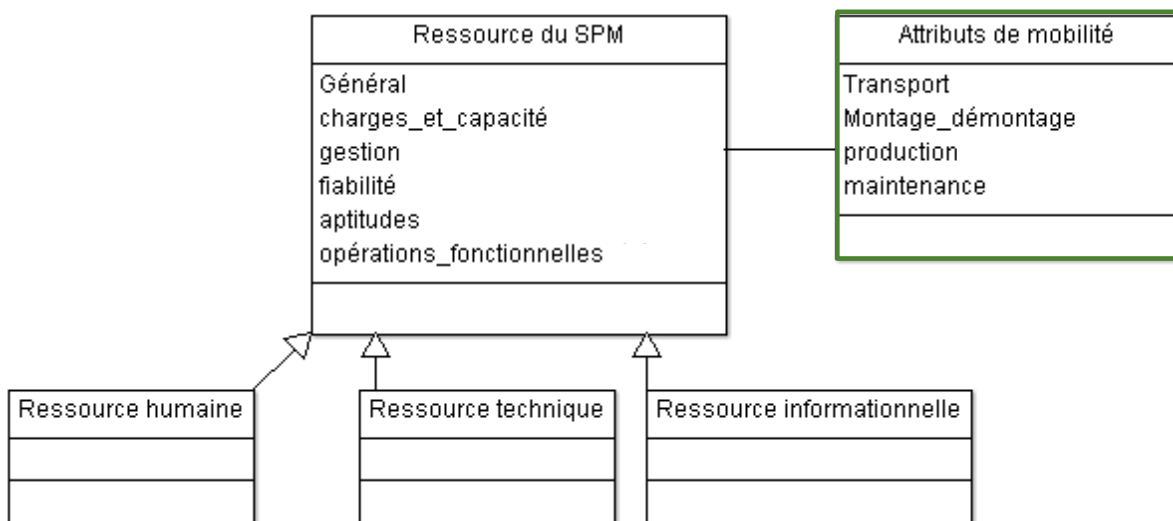


Figure 10-2 Augmentation de la modélisation des ressources du SPM par la prise en compte des attributs de mobilité

### 10.3.4 LA MODELISATION DES ASPECTS INFORMATIONNELS DU SPM

La vue informationnelle collecte l'ensemble des connaissances à propos des objets de l'entreprise (IFIP-IFAC, 1999). Le langage de modélisation peut être adapté selon le niveau d'analyse : "au niveau de modélisation des besoins ou niveau de l'utilisateur final, il est suffisant d'utiliser un langage de haut niveau centré sur le concept d'objet [comme UML ou SysML]. Par contre, au niveau des spécifications ou niveau conceptuel, il est d'usage d'utiliser des langages de description des données plus détaillés [comme IDEF1x ou plus généralement le modèle entité-relation] en vue de la conception des bases de données servant à gérer les données d'entreprises" (Vernadat, 1999).

Loin de prétendre cerner tous les aspects informationnels transitant dans un système d'information d'une entreprise, la Figure 10-3 illustre un aperçu d'une tentative de formalisation d'un modèle conceptuel mettant en avant les aspects informationnels spécifiques au contexte de système de production mobile. Dans notre description du SPM, on s'est attaché à la formalisation de deux types d'aspects informationnels :

- Les *données d'entrées* nécessaires pour la conception du SPM ou la gestion des reconfigurations. Le choix de ces données est établi à partir du bilan de différentes données utilisées dans les modèles exposés dans nos travaux. On distingue ainsi :
  - *Les données du site de production* décrivant l'ensemble des aspects définissant le site de production, on citera dans un premier lieu la demande du client car, rappelons-le, dans notre contexte on associe un client du SPM à un site production spécifique. En addition, un site de production est caractérisé par une localisation géographique et enfin un contexte particulier défini grâce à une analyse des environnements politiques, économiques, sociales, technologiques, écologiques et légales.
  - *Les données sur le produit à fabriquer* présentant une description de la nomenclature et des spécifications du produit.
  - *Les données de gestion de production* qui synthétisent l'ensemble des décisions et hypothèses considérés pour la gestion de la production, telles que le temps d'ouverture par équipe ou la fiabilité du système du SPM.
  - *Les données issues de la stratégie de l'entreprise* qui se traduisent d'un côté par les préférences du (ou des) décideur(s). A titre d'exemple on peut citer l'ensemble des préférences pour la priorisation des objectifs de performance. Et d'un autre côté, elles concernent les décisions et hypothèses issues de la stratégie de l'entreprise, telles que le choix des stratégies de bases ou les niveaux de rémunérations adoptés (servant pour les évaluations économiques).
  - *Les données technologiques* sur les ressources utilisées dans la description des configurations du SPM issues de bases de données ou de catalogues de fournisseurs.
  - *Les paramètres du modèle* qui ont été considérés à une étape donnée comme des paramètres invariables.
  - Et *les données sur les fournisseurs* recensant l'ensemble des informations nécessaires pour l'évaluation des décisions telles que la décision de "faire ou faire faire".
- Les *indicateurs de performances* nécessaires ont été considérés selon les trois niveaux classiques de décision à savoir : stratégique, tactique et opérationnel. Dans notre contexte, on associe le niveau de décision stratégique à l'échelle de mobilité successive multi sites du SPM, le niveau tactique est associé à l'échelle d'un site de production et enfin le niveau opérationnel concerne la définition d'une configuration du SPM. A chacun de ces niveaux, des indicateurs de performance ont été définies.

On note que la description de la vue information se veut être générique et évolutive : à ce stade on a identifié les informations et indicateurs qui nous semblent les plus pertinents, mais



---

cette description peut évoluer ou être adaptée en fonction des retours d'expérience accumulés d'un site de production à un autre.

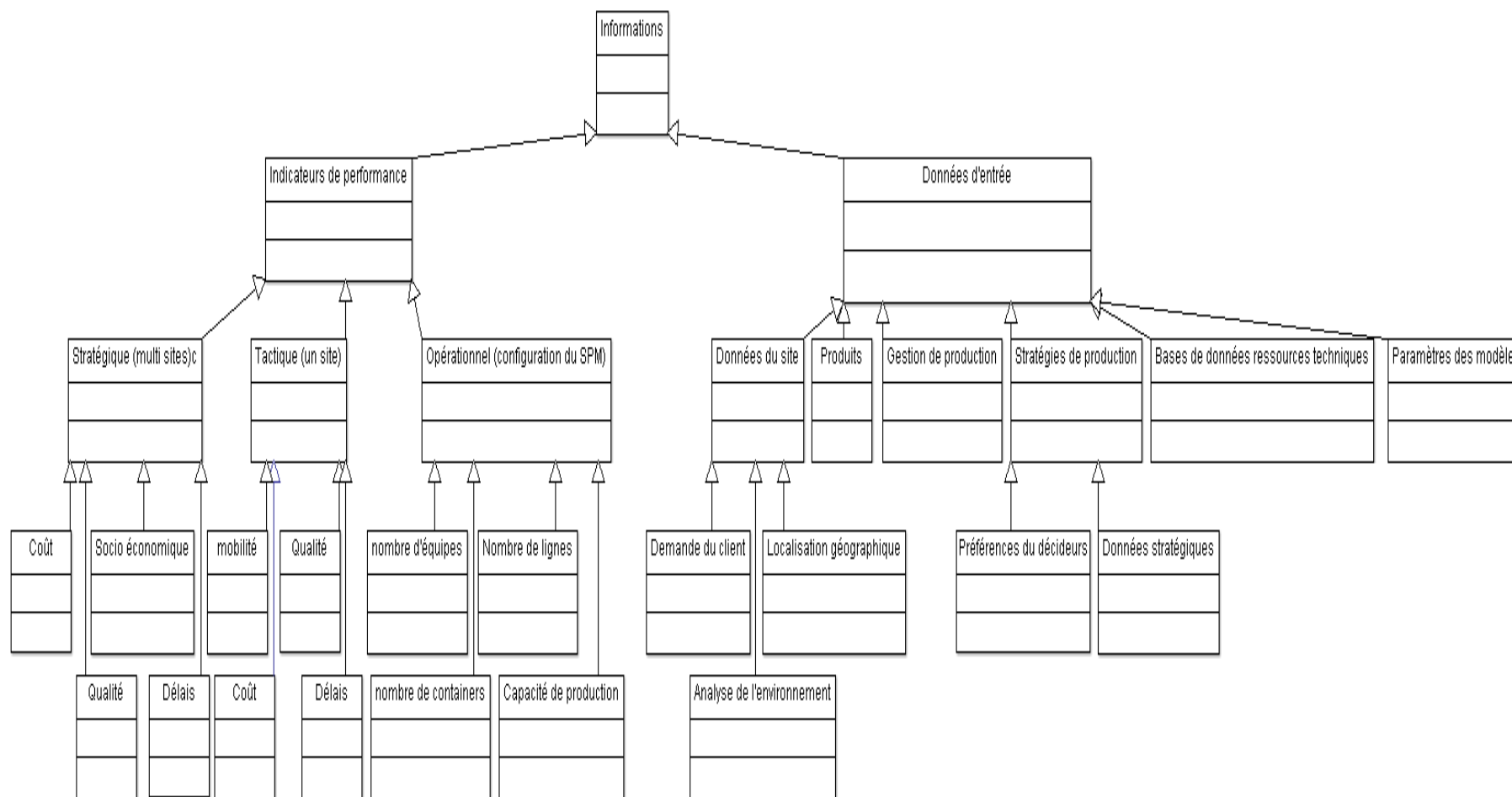


Figure 10-3 extrait d'un schéma conceptuel des aspects informations dans la description du SPM

### 10.3.5 LA MODELISATION ORGANISATIONNELLE DU SPM

La vue organisationnelle représente les responsabilités et autorités de toutes les entités identifiées dans les autres vues (IFIP-IFAC, 1999). "*Il s'agit de décrire une structure organisationnelle définissant le nombre de niveaux de décision, les centres de décision associés à chaque niveau en termes de postes, unités et départements, et les responsabilités et autorités affectées à chaque centre pour permettre à l'entreprise d'atteindre le niveau de performance désiré pour réaliser ses objectifs*" (Vernadat, 1999).

La gestion des aspects organisationnels a été identifiée comme l'une des exigences majeures de la mobilité successive multi sites du SPM (cf. § 5.3.2.3). En effet, le besoin de faire appel à des équipes locaux dans un objectif de favorisation d'un développement socioéconomique local ou tout simplement dans une vision de recherche d'avantages économiques profitant d'une main d'œuvre locale peu chère, pose en contrepartie un défi récurrent de gestion et d'intégrations de ces équipes dans le SPM.

La modélisation des aspects organisationnels du SPM peut contribuer à la facilitation de la gestion de ce défi, par l'intégration des contraintes socioculturelles spécifiques à chaque site de production, en plus de l'appréciation de l'impact d'une organisation définie (choix d'équipes locaux) sur la performance du SPM (coût, qualité, délai, etc) et si nécessaire l'identification des actions envisageables pour améliorer cette performance (formations adéquates par exemple).

Toutefois, un manque se fait sentir en termes de méthodes formalisées et universelles pour la description des structures organisationnelles. La méthode CIMOSA fournit deux éléments pour combler ce manque (Vernadat, 1999) : l'unité organisation et la cellule organisationnelle.

Mintzberg (1982) considère essentiellement deux étapes dans la construction d'une structure organisationnelle:

- la *définition de la structure organisationnelle* : dans une logique de décomposition, le travail à faire est divisée en tâches, ces tâches sont ensuite regroupées pour former des postes, qui à leur tour sont regrouper pour former des services, puis des départements, etc. La *structure organisationnelle* définit l'organigramme de l'entreprise qui donne une description des entités organisationnelles et rapports qu'elles ont entre elles. (Vernadat, 1999) définit recense trois formes de représentation de la structure organisationnelle: la forme fonctionnelle, la forme divisionnelle et la forme matricielle.
- la *coordination du travail* : "*correspond à un ensemble de mécanismes permettant aux entités organisationnelles de s'informer mutuellement, de se consulter ou de décider ensemble pour gérer les tâches en fonction des objectifs à atteindre et de la complexité de l'organisation*". Plusieurs mécanismes de coordination peuvent être distingués : la coordination par ajustement mutuel, la coordination par supervision directe, la coordination par supervision hiérarchique et la coordination par standardisation des objectifs. La choix du mécanisme de coordination dépend de la structure organisationnelle adoptée.

En s'intéressant à la description de la structure organisationnelle du SPM, l'aspect d'adaptabilité organisationnelle peut être pris en compte par la mise en place d'une organisation constituée de deux types de structures :

- une *structure fixe* d'un site à un autre. Cette structure formée par un "noyau" de responsables expérimentés est chargée de la gestion du SPM. Cette structure fixe aura également pour mission d'encadrer et de former les équipes recrutées localement.
- une *structure adaptable* d'un site à un autre. Cette structure est composée d'une part des opérateurs recrutés localement pour contribuer au fonctionnement du SPM et d'une autre, d'une équipe de personnels qualifiés recrutée également localement afin de servir d'interface entre le Top management, qui seront majoritairement des "expatriés", et les équipes locales. Cette équipe de personnels qualifiés, par sa maîtrise des spécificités du contexte socioculturel du site de production, aura pour objectif d'assurer le niveau de coordination nécessaire dans la structure organisationnelle.

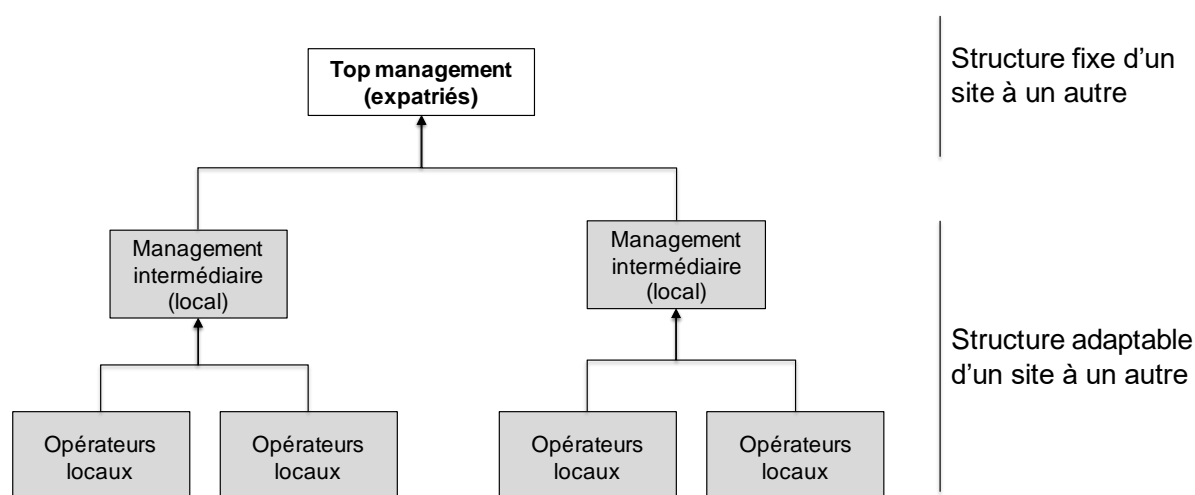


Figure 10-4 suggestion d'une structure organisationnelle du SPM adaptable en fonction du contexte du site de production.

Enfin, la notion de compétence requise et disponible (introduite par exemple dans le chapitre 4, cf. § 4.5.2.3) a toute son importance dans la description d'une structure organisationnelle adaptable. En effet, c'est par une bonne évaluation des compétences requises qu'on pourra identifier les besoins en formation ou en embauche au moment de l'adaptation de l'organisation des ressources pour un nouveau contexte de site de production.

## 10.4 CONCLUSION SUR LA PRISE EN COMPTE DE LA MOBILITE DANS LA MODELISATION DU SPM

L'objectif de cette annexe a été de conduire une réflexion sur la prise en compte des aspects de mobilité du système de production dans la modélisation du système. Le besoin de modélisation a été exprimé dans un but de faciliter l'adaptation et la re-conception du système pour tout nouveau site de production. Après une analyse des différents cadres de modélisation, notre choix a porté sur le cadre de modélisation GERAM qui fournit une

proposition couvrant les principaux besoins de modélisation. Cependant GERAM ne spécifie pas de "constructs" spécifiques au cas de système de production mobile. Notre proposition s'est axée donc sur la suggestion de quelques aspects d'adaptation du cadre de modélisation pour tenir compte des exigences de la mobilité du système de production. En l'occurrence, nous avons justifiés le besoin d'adaptation de la représentation du cycle de vie du système pour tenir compte des phases de vie opérationnelles spécifiques aux SPMs. Dans un deuxième temps, nous nous sommes intéressées aux quatre vues principales de modélisation à savoir : la vue fonctionnelle, la vue ressource , la vue informationnelle et la vue organisationnelle. Pour chacune de ces vues, une discussion a été menée pour savoir comment l'aspect mobilité peut être traduit dans chacune de ces vues.

ANNEXE  
3

11 ANNEXES 3

---

## 11.1 ANNEXE 3.1

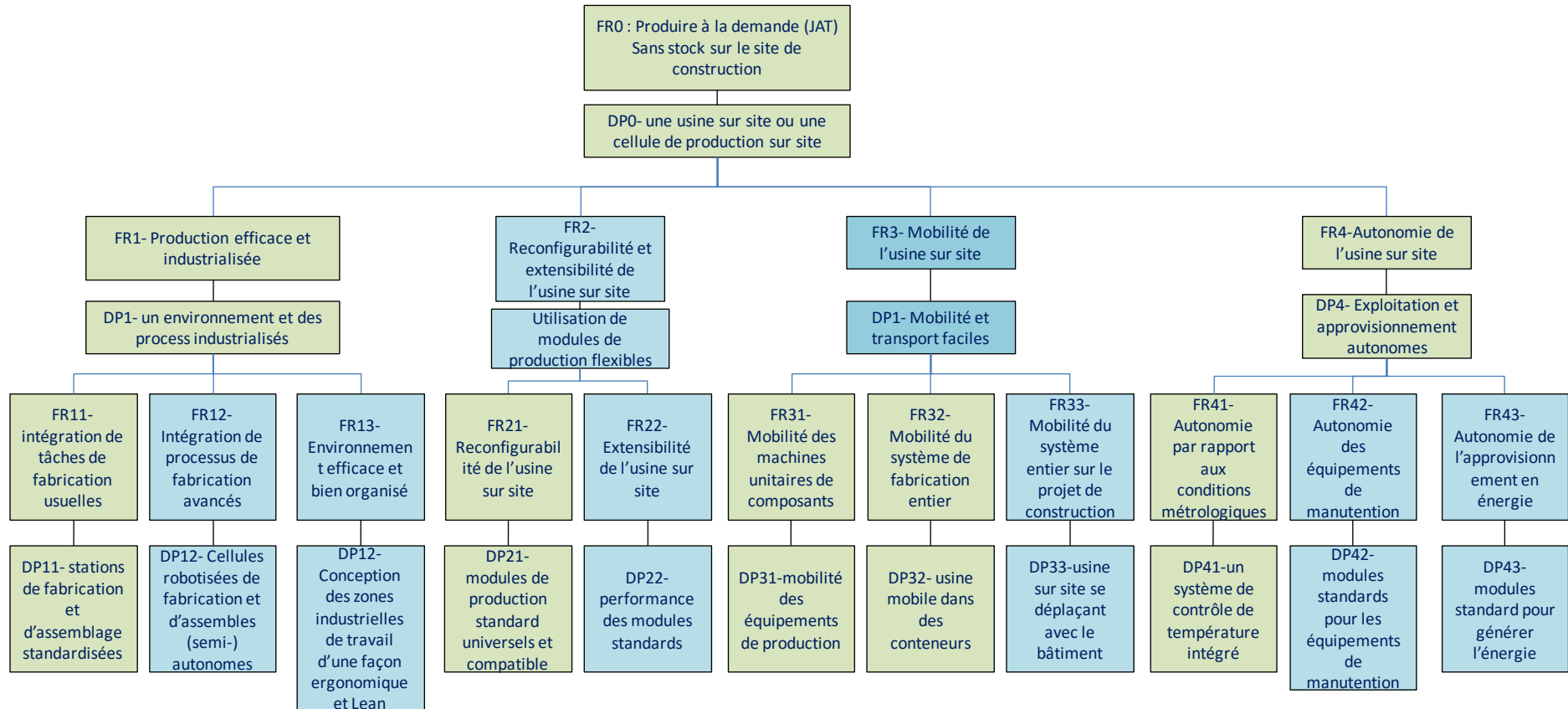


Figure 11-1 modèle de AD pour l'usine mobile présenté par (Erwin, 2015)

## 11.1.1 LA DEFINITION DES CONSTRUCTS DE CIMOSA

### EVENT

*Identifier:* EV-xxx

*Name:* name of the event

*Description:* text

*Source:* "External" or identifier/name of a resource or an enterprise activity

*Triggers:* list [1,n] of business processes

*Object View:* one-or-zero object view attached to the event

*Predicate:* Boolean expression defining the happening condition of the event

*Timestamp:* time at which the event occurrence will happen

### BUSINESS PROCESS

*Identifier:* BP-xxx

*Name:* name of the business process

*Description:* text

*Objectives:* to be fulfilled by the process

*Constraints:* to be met by the process

*Declarative rules:* list [0,n] of business rules

*Triggering events:* list [0,n] of events

*Process Behavior:* non-empty set of

*WHEN (condition) DO action* rules

*Ending statuses:* set [1,n] of ending statuses

*Comprises:* list[1,n] of sub-processes or activities used in this process

*Where-Used:* list [0,n] of processes employing this process

### ENTERPRISE ACTIVITY

*Identifier:* EA-xxx

*Name:* name of the enterprise activity

*Description:* text

*Objectives:* to be fulfilled by the activity

*Constraints:* to be met by the activity

*Declarative rules:* list [0,n] of business rules

*Required Capabilities:* list [1,n] of capability sets defining required capabilities

#### INPUTS:

*Function:* list [0,n] of object views

*Control:* list [0,n] of information object views

*Resource:* list [1,n] of resources

#### OUTPUTS:

*Function:* list [0,n] of object views

*Control:* list [0,n] of generated events

*Resource:* information on resource status

*Activity Behavior:* {pre-conditions, sequence of functional operations, post-conditions}

*Ending Statuses:* set [0,n] of all possible ending statuses for this activity



*Where-Used*: list [1,n] of processes employing this activity

### Information View

#### OBJECT VIEW

*Identifier*: OV-xxx

*Name*: name of the object view

*Description*: text

*Leading Object*: one enterprise object

*Related Objects*: list [0,n] of enterprise objects

*Properties*: list [1,n] of object properties in the form:

*property\_name*: *data type*

#### ENTERPRISE OBJECT

*Identifier*: EO-xxx

*Name*: name of the enterprise object

*Description*: text

*Is-a*: zero-or-one enterprise object

*Part-of*: list [0,n] of enterprise objects

*Properties*: list [1,n] of object properties in the form:

*property\_name*: *data type*

### Resource/Infrastructure View

#### RESOURCE

*Identifier*: FE-xxx or CP-xxx

*Name*: name of the resource

*Description*: text

*Class*: “Functional Entity” or “Component” or “Resource Set” or “Resource Cell”

*Cardinality*: number of occurrences of this class

*Object View*: object view containing descriptive information about the resource (e.g. availability, capacity, location, RTBF, MTTR...)

*Capabilities*: list [1,n] of capability sets

*Operations*: list [1,n] of functional operations defined as:

*FO-name (IN parameters, OUT parameters)*

*Made-of*: list [0,n] of sub-resources

*Where-Used*: list [0,n] of parent resources

#### CAPABILITY/COMPETENCY SET

*Identifier*: CS-xxx

*Name*: name of the capability set

*Description*: text

*Capabilities*:

*Functional*: functional capabilities

*Object-related*: object related capabilities

*Performance*: performance capabilities

*Operational*: operational capabilities

### 11.1.2 LA DEMARCHE DE CHOIX DES METHODES D'AIDE A LA DECISION (ROY ET SŁOWIŃSKI 2013)

Q1 : En prenant en compte le contexte de décision, quel type (s) de résultats la méthode devrait apporter ?

Réponse	Exemple
Une valeur numérique (utilité, score) est assignée à chaque alternative potentielle	AHP (Saaty, 1990), TOPSIS (Hwang et al., 1993), MAUT (Dyer, 2005), etc.
Un ensemble d'alternatives est classée (sans associer de valeur numérique à chacune) comme un ordre total ou partiellement faible	ELECTRE III, IV (Figueira et al., 2005), PROMETHEE I et II (Brans and Mareschal, 2005), etc
Sélection d'un sous-ensemble d'alternatives, aussi petit soit-il, en vue de choisir, une ou quelques alternatives.	ELECTRE I (Figueira et al., 2005) et IS et PROMETHEE V (Brans and Mareschal, 2005), etc.
Chaque alternative est assignée à une ou plusieurs catégories, étant donné que l'ensemble des catégories est à priori défini. (Méthode de pré-tri)	ELECTRE TRI-B (Figueira et al., 2005), ELECTRE TRI-C (Almeida-Dias et al., 2012)
Un sous ensemble d'alternatives potentielles possédant des propriétés remarquables sont fournies pour servir de base dans les étapes suivantes du processus d'aide à la décision	Algorithmes évolutionnaires (Deb and Miettinen, 2008), Pareto race (Korhonen and Wallenius, 1988), etc.

#### Questions

Q 1a Do the original performance scales have all required properties for a rightful application of the considered method?

Q 1b Is it simple or hard (even impossible) to get preference information that the method requires?

Q 1c Should the part of imprecision, uncertainty or indetermination in the definition of performances be taken into account, and if so, in what way?

Q1d Is the compensation of bad performances on some criteria by good ones on other criteria acceptable?

Q 1e Is it necessary to take into account some forms of interaction among criteria?

#### Question secondaires

Question 2a Is the method able to satisfy properly the needs of comprehension from the part of stakeholders involved in the decision process?

Question 2b Is an axiomatic characterization of the method available, and if so, is it acceptable in the considered decision context?

Question 2c Can the weak points of the method affect the final choice?

## 11.2 ANNEXE 3. 3

### 11.2.1 MODELES CONCEPTUELS DES BASES DE DONNEES POUR LES RESSOURCES

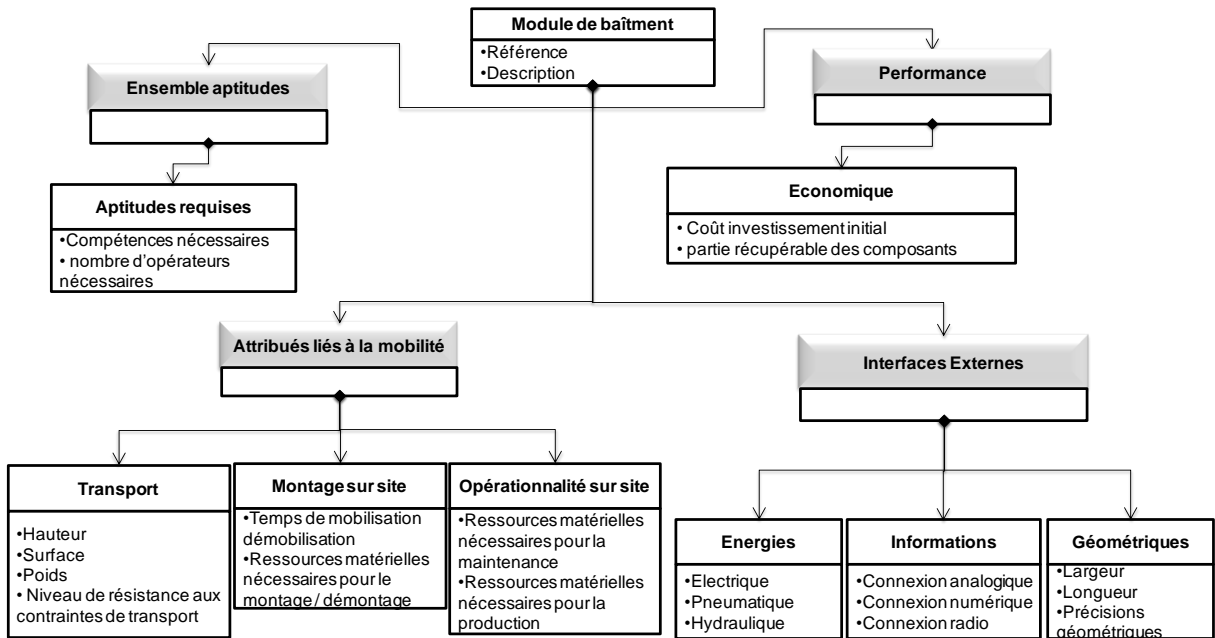


Figure 11-2 Modèle conceptuel pour les modules bâtiments et infrastructures

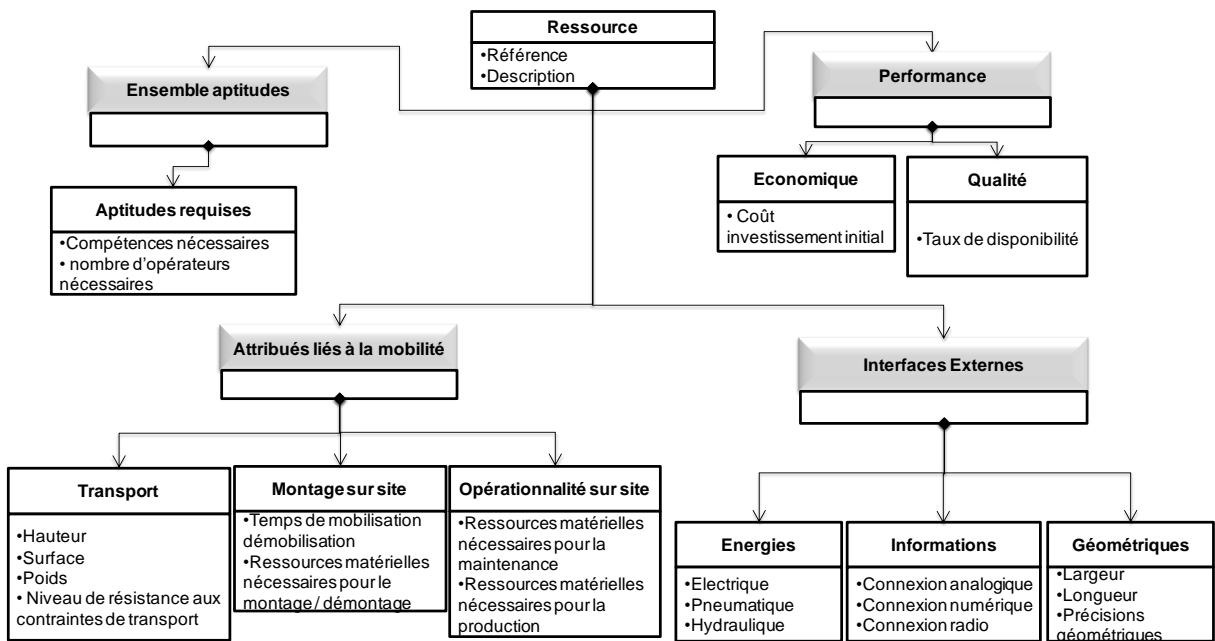
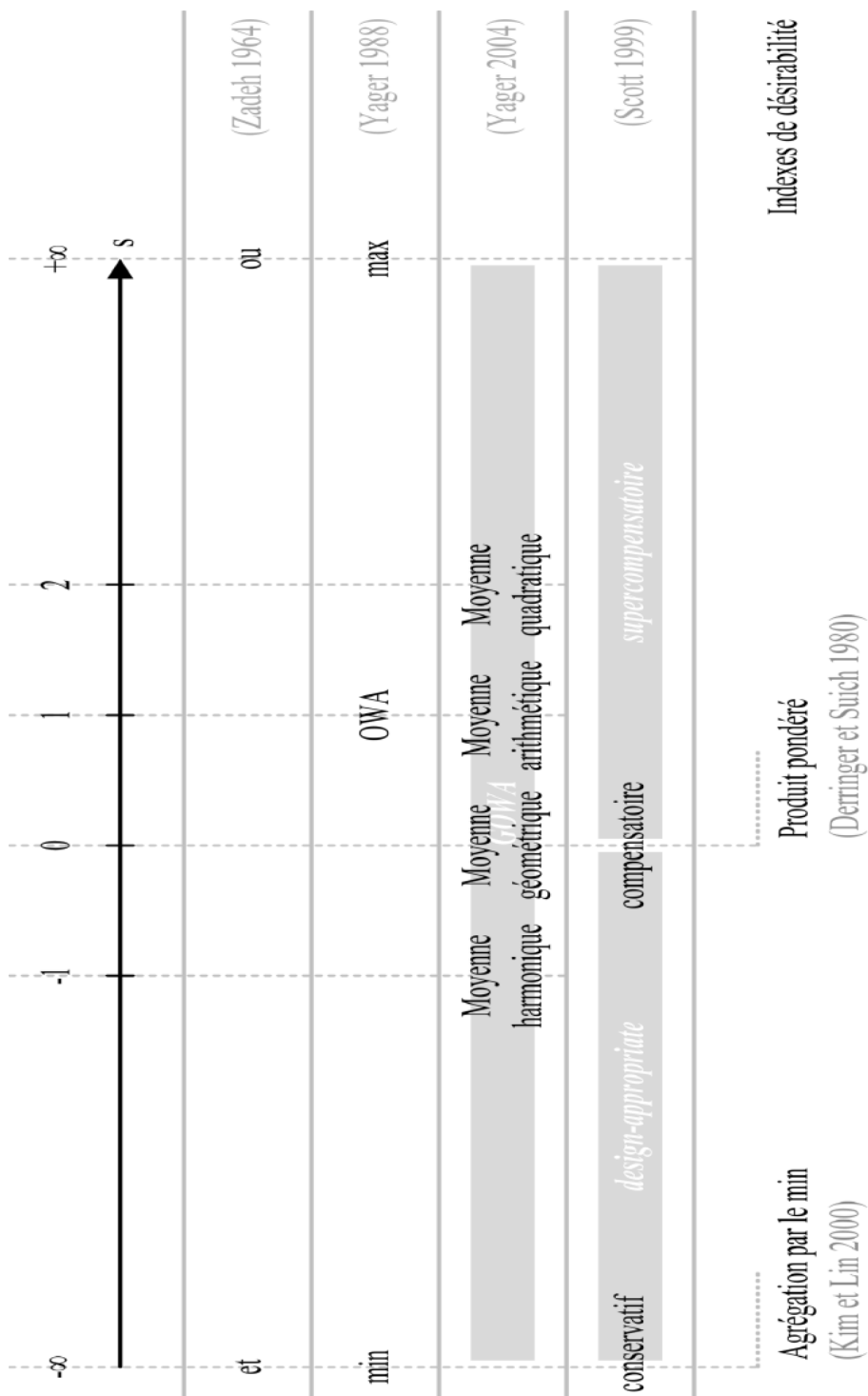


Figure 11-3 modèle conceptuel pour les ressources des systèmes d'information ou d'approvisionnement en énergie

### 11.2.2 LE CONTINUUM D'AGREGATION

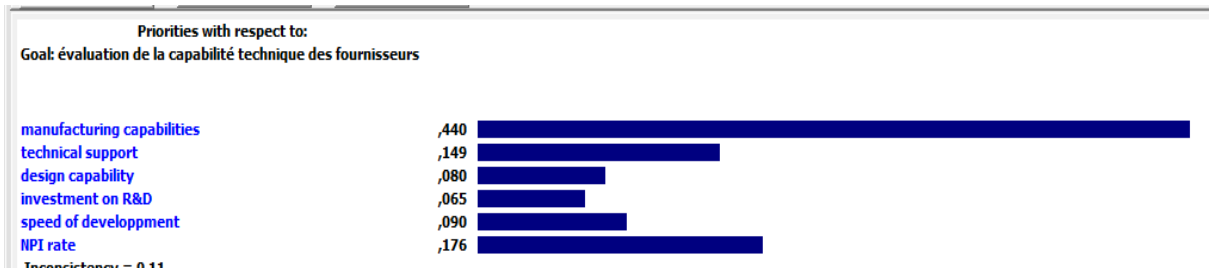
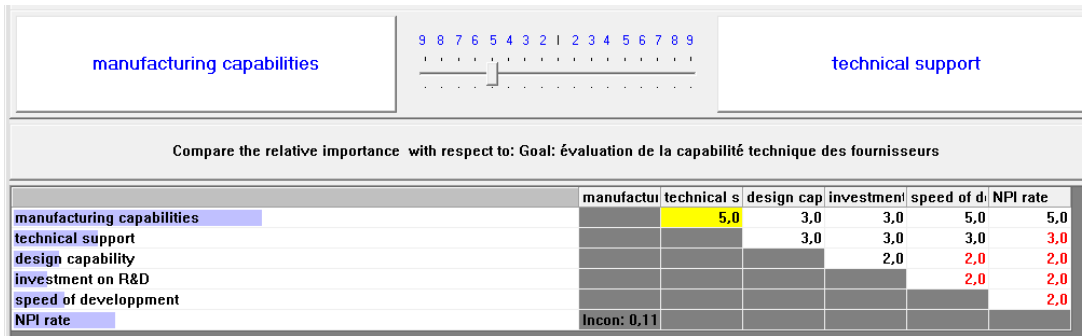


La valeur de  $s$  ne peut pas être associée à une signification réelle. (Scott and Antonsson 2000) propose une méthode de calcul de la stratégie  $s$  appelé la méthode des points indifférentes ((Scott and Antonsson 2000)) ou "equivalent points"(Quirante 2012).

Cette méthode permet, via une résolution numérique, de trouver à la fois les valeurs des pondérations et le paramètre d'agrégation s.

Il est à noter que la méthode de choix des valeurs de pondération et la méthode de choix du paramètre d'agrégation sont liées.

**11.2.3 LES VALEURS DE PONDERATIONS INDIQUEES DANS LA FORMULE (40) SONT OBTENUES PAR LA METHODE AHP.**



Matrice de jugement pour l'obtention des pondérations des six attributs de l'indicateur de performance technique pour un scénario de "externaliser"

**11.2.4 LA MATRICE DE JUGEMENT POUR L'INDICATEUR D'INTEGRABILITE DE MODULE**

Les valeurs de ces poids peuvent être déterminées en utilisant la matrice de jugement de la méthode AHP.

	NC_competence	NP_physic	NI_information	NE_energy
NC_competence		3,0	5,0	4,0
NP_physic			7,0	5,0
NI_information				2,0
NE_energy	Incon: 0,04			

Figure Matrice de jugement par rapport à l'objectif indicateur intégrabilité

En utilisant le logiciel "Expert choice", on calcule les différents poids correspondants ainsi que le critère de consistance. Concernant le critère de consistance, la valeur calculée est de 0.04. (Saaty, 1990) préconise un seuil maximal de 0.12. La matrice présentée en Figure est donc consistante.



Les valeurs des poids d'interface qui seront utilisées dans les différents cas d'application sont:

$$\omega_{NC} = 0.281, \omega_{NP} = 0.562, \omega_{NI} = 0.060, \omega_{NE} = 0.097$$