

Historique du concept de cycle de l'eau et des premières mesures hydrologiques en Europe

Yann L'HÔTE (1)

RÉSUMÉ

Nous présentons dans cet article, relativement concis, des citations, textes anciens et expérimentations historiques ayant conduit à la représentation du cycle de l'eau, tel qu'il est décrit et enseigné de nos jours. En nous limitant volontairement aux domaines d'investigation de l'hydrologie (de surface), nous distinguons deux grandes époques dans l'histoire des sciences de l'eau :

— les époques du pragmatisme et des spéculations, allant du premier millénaire av. J.-C. à la fin du Moyen-Âge. Nous citons en particulier deux versets de l'Ancien Testament, des textes et concepts de la Grèce et la Rome antiques, les œuvres des Pères de l'Eglise et un rappel du rôle des traducteurs arabes dans la survivance des textes grecs anciens;

— les périodes des observations, des mesures et des expérimentations, que nous situons de la Renaissance (1400-1600) jusqu'à l'année 1800 environ. Nous relatons successivement les travaux et/ou les théories de L. DE VINCI, B. PALISSY, P. PERRAULT, E. MARIOTTE, E. HALLEY, etc., pour finir par une revue succincte des toutes premières mesures de pluviométrie, d'hydrométrie et d'évaporimétrie, ces dernières ayant permis à J. DALTON d'établir sa célèbre formulation (1802).

MOTS-CLÉS: Historique — Hydrologie de surface — Cycle de l'eau — Concepts scientifiques — Mesures hydrologiques — Europe.

ABSTRACT

HISTORY OF HYDROLOGICAL CYCLE AND MEASUREMENTS IN EUROPE

In this paper we present quotations, historical texts and experiments which led to our current hydrological concepts. We distinguish two eras in the history of surface water hydrology:

— the age of pragmatism and of speculations, from the first millenium B.C. to the end of the Middle Ages. We quote two texts from the Old Testament, quotations and concepts from the ancient Greek, Roman and Patristic literature, and also Arab translations which preserve ancient Greek texts;

— the age of observations, measurements and experiments from the Renaissance (1400-1600) to about 1800. We cite works and theories from L. DE VINCI, B. PALISSY, P. PERRAULT, E. MARIOTTE, E. HALLEY and so on. We then describe the first measurements of rain, water velocity, discharge and evaporation, especially the famous DALTON equation for evaporation (1802).

KEY WORDS: History — Surface water hydrology — Hydrological cycle — Scientific concepts — Hydrological measurements — Europe.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie particulièrement:

— M. Jacques SIRCOULON, Hydrologue, Ingénieur de Recherche à l'ORSTOM, pour son aide dans la recherche des textes exacts de certaines citations anciennes et pour son travail de lecture critique et éclairée du manuscrit;

— le professeur Asit K. BISWAS, actuel Président de l'Association Internationale des Ressources en Eau (Oxford, UK), pour son autorisation de traduire des passages de son ouvrage et de reproduire quatre illustrations de celui-ci.

(1) Ingénieur de Recherche, Laboratoire d'Hydrologie, Centre ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex.

INTRODUCTION

«Nul ne peut exceller dans une science, s'il n'en a étudié d'abord son histoire spécifique»
(Auguste COMTE, 1798-1857).

Contrairement à leurs collègues anglophones, les scientifiques français et les hydrologues en particulier, ont peu publié sur l'épistémologie des sciences de l'eau. Ceci peut paraître étonnant lorsque l'on sait que les expérimentateurs et les fondateurs des théories, entre les années 1400 et 1800 (pour fixer les idées), étaient souvent français ou, à tout le moins, d'expression française.

Nous tentons modestement de remédier ici à cette lacune, sans prétention exhaustive cependant, mais plutôt avec un souci de sélection nécessairement sévère dans le cadre d'une telle revue.

Dans la première partie, pour une période que l'on a appelée «du pragmatisme et des spéculations» (jusqu'à la fin du Moyen-Âge), nous avons rassemblé les courants de pensée, les textes et les citations philosophiques et (ou) scientifiques les plus marquants de notre culture occidentale (Bible, Grèce et Rome antiques, ...), traitant des «mouvements des eaux dans la nature et de leurs relations».

Ensuite, à partir de la Renaissance (15^e et 16^e siècles), nous citons chronologiquement jusqu'à l'année 1800 environ, les observations, les théories, les expériences et les mesures ayant permis d'affiner la connaissance de plus en plus exacte que nous avons aujourd'hui du cycle de l'eau.

Nous avons volontairement arrêté notre travail aux environs de l'année 1800, pour les trois raisons suivantes :

- en 1800, tous les éléments du cycle de l'eau (pluie, ruissellement, infiltration, évaporation) ont été appréhendés et décrits, et pour quelques-uns ont fait l'objet de quantifications dont les ordres de grandeur sont assez exacts. Différentes théories proches des nôtres ont été énoncées;

- dans l'Europe de 1800, quelques observations suivies d'hydrométrie, de pluviométrie et de météorologie ont déjà commencé. Ces mesures en des lieux fixes préfigurent les futurs réseaux nationaux qui seront organisés peu à peu au cours des 19^e et 20^e siècles;

- durant ces deux siècles, les mesures et les expériences vont se multiplier; les fondements modernes des sciences de l'eau vont être fermement établis, par exemple en ce qui concerne l'hydraulique et en particulier l'hydraulique souterraine.

Enfin, signalons que nous avons exclu de ce travail qui se veut essentiellement d'hydrologie (de surface), les citations et textes descriptifs — mais non conceptuels — relatifs aux sciences, techniques et disciplines voisines de l'hydrologie, pour lesquelles différents ouvrages ou articles concernant l'historique ont déjà été publiés en langue française, en particulier pour les disciplines suivantes :

- l'hydraulique, par J. BONNIN (1984);
- l'hydrogéologie, par G. CASTANY, J. MARCAT et J.C. ROUX (1986);
- la géologie, par G. GOHAU (1987).

1. ÉPOQUES DU PRAGMATISME ET DES SPÉCULATIONS

(du premier millénaire avant Jésus-Christ à la fin du Moyen-Âge)

1.1. LES QANĀTS OU FOGGARA

Bien que ce soit aux confins de l'Europe, en Urartu (près du lac de Van, ancienne Arménie, actuelle Turquie), que le qanāt (ou kanāt) a vu le jour au 8^e siècle av. J.-C. (BISWAS, 1970), on ne peut débiter un exposé sur l'historique du cycle de l'eau sans décrire ce mode antique d'exploitation, qui montre à quel point ses constructeurs avaient un sens aigu de la connaissance du parcours souterrain de l'eau.

Il s'agit (fig. 1) de canaux souterrains artificiels qui transportent l'eau sur de grandes distances, eau émanant parfois de sources ou la plupart du temps ayant pour origine le drainage des couches aquifères. Les photographies aériennes des systèmes de qanāts sont particulièrement démonstratives avec leurs alignements de déblais entourant les puits creusés lors de la construction.

On en trouve par ailleurs en Perse, en Egypte, en Inde, en Grèce (200 av. J.-C. selon POLYBE) et au Maghreb sous le nom de foggara (ou foghara).

1.2. L'ANCIEN TESTAMENT

Pour quitter le domaine pratique évoqué ci-dessus avec les qanāts, et revenir à des spéculations plus habituelles dans notre fonds culturel, nous avons choisi dans l'Ancien Testament, les deux versets suivants qui sont souvent cités comme se rapportant aux composantes atmosphériques et superficielles du cycle de l'eau :

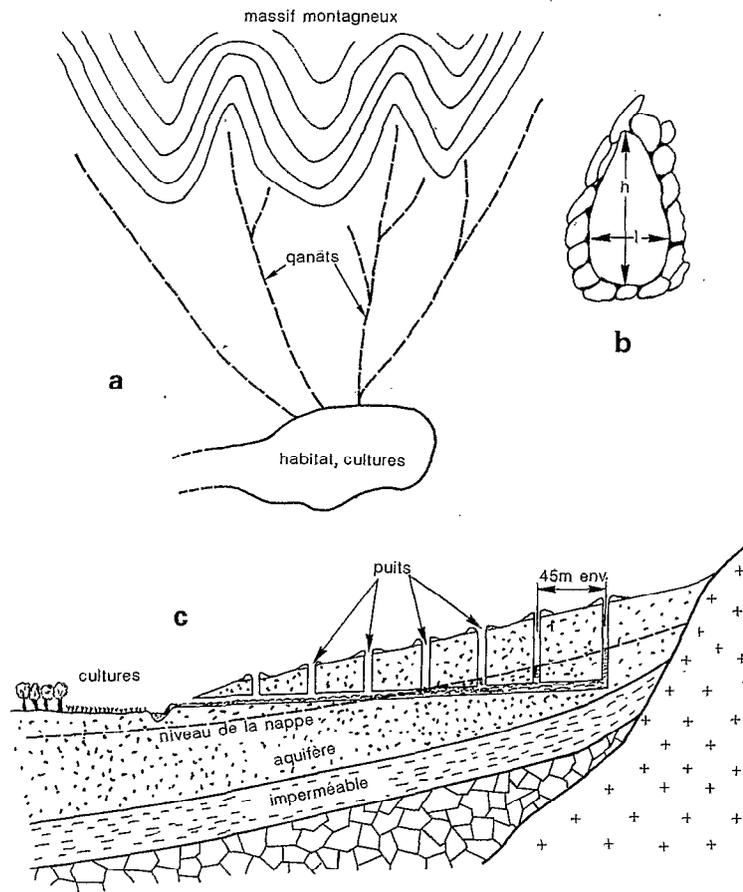


FIG. 1. — Détails d'un système de qanât; échelles non respectées — Imité de BISWAS (1970).

a. Plan d'un ensemble de qanâts, pour l'approvisionnement en eau; b. Coupe transversale d'un qanât ($h = 1,20$ à $2,10$ m et $l = 0,60$ à $1,20$ m); c. Section longitudinale d'un qanât.

1. Amos V-8 (vers 800 av. J.-C.)

« Cherchez Le... Il appelle les eaux de la mer, et les répand sur la surface de la terre. L'Éternel est son nom »

2. L'Éclésiaste Prologue-7 (975 av. J.-C.)

« Tous les torrents vont à la mer, et la mer n'est pas pleine. Au lieu où les torrents vont, là, ils retournent pour aller » (CHOURAQUI, 1985).

Ce dernier thème de « l'antique difficulté » d'admettre que les océans ne s'élèvent pas davantage malgré l'apport incessant des fleuves sera abondamment repris et discuté au cours des siècles par de nombreux philosophes et auteurs parmi lesquels: ARISTOTE (384-322 av. J.-C.), LUCRÈCE (99-55 av. J.-C.), Saint BASILE (330-379 apr. J.-C.), le commentateur de la Bible Abraham IBN EZZA (1085-1164) et plus près de nous le Père J. FRANÇOIS, professeur de DESCARTES, dans *La Science des Eaux*, ... (1653).

1.3. LA GRÈCE ANTIQUE

Entre le 7^e et le 1^{er} siècle av. J.-C., la littérature grecque relative aux composantes du cycle de l'eau est particulièrement riche: l'étude assez exhaustive de D. TONINI (UNESCO, 1974) ne cite pas moins d'une trentaine d'auteurs, parmi lesquels des philosophes naturalistes, des poètes, des physiciens, des géographes, etc. Au cours de ces siècles, la composante atmosphérique du cycle (évaporation, formation des nuages et des pluies) a finalement été interprétée dans des termes assez proches de nos concepts modernes.

Pour ce qui concerne le procédé par lequel l'eau des mers retourne aux sources puis aux rivières, on peut distinguer deux écoles dans la deuxième moitié du premier millénaire av. J.-C. (BISWAS, 1970, CARBRECHT, 1987 et *al.*):

A. Ceux qui considéraient que l'eau de mer revient par l'intérieur même du sous-sol, grâce à des procédés à nos yeux mythiques, comme nous le verrons ci-après avec les explications des figures 2 et 3.

B. Ceux qui estimaient déjà que l'eau de mer, après évaporation, retombe sur terre par les précipitations. Nous montrerons à cette occasion, figure 4, l'intuition très précoce d'ARISTOTE (384-322 av. J.-C.) en ce qui concerne le concept des réservoirs souterrains.

1.3.1. Les explications de l'école A ci-dessus (retour de l'eau de mer par des cavités internes du sous-sol) peuvent être mises en relation avec les caractéristiques hydrologiques de la Grèce et des Iles voisines: prédominance des apports des nappes souterraines, avec phénomènes karstiques fréquents.

Sur la figure 2, nous avons représenté le concept de PLATON (428-348 av. J.-C.) dans son «Phédon», rappelé par ARISTOTE:

« Toutes les eaux communiquent entre elles par des canaux souterrains, et toutes ont leur principe et leur source dans ce qu'on appelle le Tartare, masse d'eau placée au centre (de la Terre)... C'est cette eau primordiale et initiale qui est la cause de l'écoulement de chaque courant, en raison de sa perpétuelle agitation, car elle n'a pas de base, mais elle oscille toujours autour du centre. Son mouvement de montée et de descente est ce qui emplit les cours d'eau » (Traduction TRICOT, 1955).

1.3.2. Comme il se doit, l'élève ARISTOTE conteste la théorie du maître et fournit dans ses «Météorologiques» une autre hypothèse. On y voit, figure 3, que l'eau de mer après dessalement dû à un parcours plus ou moins long sous terre serait condensée après évaporation engendrée par la chaleur centrale de la terre, pour venir former sources et rivières. On notera ici que la chaleur centrale de la terre s'apparente au dieu du feu, le forgeron Héphaïstos, futur Vulcain des Romains.

1.3.3. D'une manière très novatrice, dans ses «Météorologiques» toujours, ARISTOTE expose que certains auteurs, (dont lui-même?), pensent qu'après évaporation sur la mer, les nuages forment la pluie qui est à l'origine des rivières, par l'intermédiaire (pour partie) de réservoirs souterrains (fig. 4):

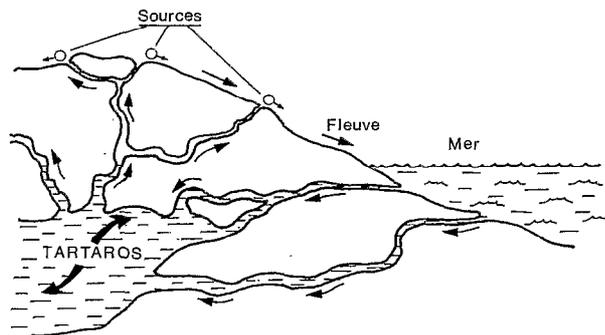


FIG. 2. — L'origine des sources et rivières, selon PLATON.

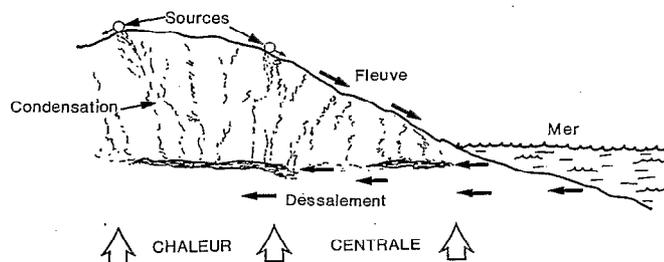


FIG. 3. — Une des interprétations dans les «Météorologiques» d'ARISTOTE.

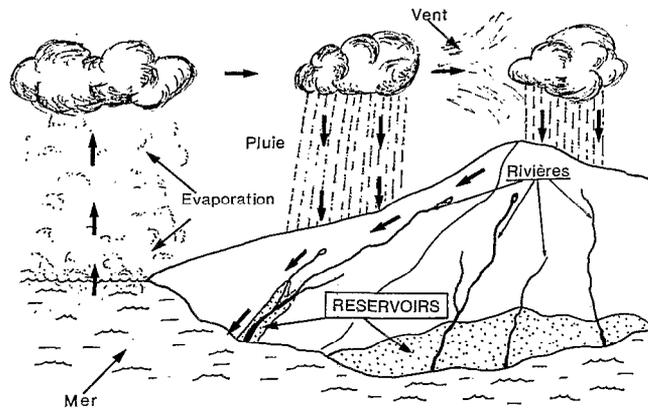


FIG. 4. — Cycle de l'eau et existence de réservoirs souterrains selon certains auteurs, d'après ARISTOTE.

«... Certains auteurs ont soutenu une opinion analogue sur l'origine des rivières. Dans cette théorie, l'eau, élevée par le soleil, et retombée en pluie, s'amasse sous la terre, d'où elle s'écoule comme d'un grand réservoir qui est, soit unique pour toutes les rivières, soit particulier à chacune d'elles. Aucune eau ne s'engendre: c'est l'eau, qui rassemblée dans des réceptacles de ce genre forme le grand débit des rivières. De là vient aussi que les rivières coulent plus abondamment en hiver qu'en été, et que certaines sont intarissables et d'autres intermittentes...» (Traduction TRICOT, 1955).

1.4. LA ROME ANTIQUE

On ne peut dénier aux Romains d'avoir été très «performants» en ce qui concerne les travaux hydrauliques. Aucune autre civilisation n'a porté à un tel niveau la recherche, la conduite et la distribution des eaux dans les villes, en partie pour affirmer sa domination comme le soulignent certains auteurs. Nous ne pouvons ici citer que quelques-unes des grandes réalisations décrites sur l'ensemble de l'empire romain:

1.4.1. Parmi les aqueducs (comprenant les ponts-aqueducs), d'après LEVEAU (1979): Carthage avec 130 km de canalisation, Lyon avec 85 km pour l'aqueduc du Gier et 66 pour la Brevenne, Nîmes: 50 km, Caesarae de Mauritanie (Algérie, près de Cherchell): 45 km, Tarragone: 35 km, etc.

Nous devons rappeler aussi d'après PELLETIER (1979), les 11 aqueducs construits à Rome de 312 av. J.-C. à 266 apr. J.-C. et totalisant 473 km. Du point de vue des débits disponibles, l'auteur les estime à 1,13 m³ par jour, par habitant, au début du 3^e siècle apr. J.-C., alors qu'ils n'étaient plus que de 475 l par jour/habitant en 1968.

1.4.2. Parmi les réalisations hydrauliques les plus remarquables, citons:

— la construction d'une trentaine de barrages (SCHNITTER-REINHARDT, 1979) recensés dans tout l'empire; certains encore visibles, sont de tous types: en terre ou enrochements, poids ou à contreforts et même voûte (à Glanum-France);

— pour la traversée des vallées profondes par les aqueducs, la construction de siphons (grâce à des conduites en plomb) dont on a retrouvé des vestiges près de Lyon;

— enfin, le remarquable réseau de distribution d'eau encore visible à Pompeï, avec son château d'eau, son système de répartiteurs, ses 39 fontaines publiques et les 132 ateliers ou maisons privées (actuellement retrouvées) raccordées au réseau.

1.4.3. À côté de ces réalisations pratiques, du point de vue conceptuel, les Romains sont parfois considérés seulement comme des continuateurs de la tradition scientifique grecque. Cependant les deux textes retenus ci-dessous montrent que tant le poète LUCRÈCE que l'ingénieur militaire VITRUVÉ avaient une bonne perception du cycle de l'eau, en particulier de sa composante souterraine:

LUCRÈCE (98-55 av. J.-C.) dans son «De Natura Rerum», donne une description complète du cycle de l'eau comprenant l'évaporation, la formation des nuages et de la pluie ainsi que l'infiltration, par laquelle «l'eau est rassemblée près des hautes vallées des rivières d'où elle nourrit les flots coulant à travers la terre» (d'après TONINI, UNESCO, 1974).

VITRUVÉ (??-14 apr. J.-C.), dans le livre 8 de son «Traité d'Architecture», dont on n'a retrouvé que le texte et non les illustrations, écrit après des rappels des pensées de THALÈS DE MILET, ANAXAGORE et PYTHAGORE :

«Nous voyons en effet les eaux de pluie s'amasser dans les creux qui sont sur le haut des montagnes, où les arbres qui y croissent en grand nombre y conservent la neige pendant fort longtemps, et, lorsqu'elle vient à fondre peu à peu, elle s'écoule insensiblement par les veines de la terre: c'est cette eau qui, parvenue au pied des montagnes, y produit des sources».

1.5. LES ÉPOQUES CHRÉTIENNE ET MÉDIÉVALE

Parmi les Pères de l'Eglise, Saint BASILE (330-379 apr. J.-C.) cite les philosophes grecs antiques HÉRODOTE, PLATON et THÉOPHRASTE et reconnaît d'abord au soleil l'entière paternité de l'évaporation, traduite par l'analogie de la bouillotte, citée dans son «Hexameron».

A juste titre, on présente souvent le Moyen-Âge comme une période de pause dans la lente avancée des sciences physiques. Mais, alors que le divin sera considéré pendant plus de mille ans comme l'ultime principe de tout, le concept fondamental de l'esprit novateur scientifique allait survivre aussi. Ainsi dans l'œuvre de Saint ISIDORE (560-636) est directement inspirée des Pères de l'Eglise, mais aussi des philosophes grecs les plus célèbres, desquels il disposait certainement de copies. Ses connaissances sur l'évaporation sont très proches de celles de LUCRÈCE et supérieures à celles des anciens grecs (POUYAUD, 1985).

Une mention particulière doit être faite des auteurs arabes (en particulier durant la dynastie des Abbassides, à partir du 8^e siècle) qui ont assuré la survivance de la philosophie hellénique, grâce à leurs traductions des œuvres grecques (TONINI, dans UNESCO, 1974).

2. PÉRIODES DES OBSERVATIONS, DES MESURES ET DES EXPÉRIMENTATIONS

(de la Renaissance à 1800)

Nous suivons ici les dénominations par «périodes» proposées par V.T. CHOW (1964).

Bien qu'un découpage de l'histoire en siècles «ronds» (1400 à 1600, 17^e siècle, ...) puisse paraître trop strict, il n'en recouvre pas moins l'évolution par étapes des grands courants intellectuels au cours de ces quatre siècles.

2.1. PÉRIODES DES OBSERVATIONS: LA RENAISSANCE (1400 à 1600)

2.1.1. A Léonard DE VINCI (1452-1519) les hydrauliciens et les hydrologues doivent de nombreuses mises en évidence et descriptions lumineuses, parmi lesquelles :

- ses travaux sur l'écoulement dans les canaux ouverts, avec une conception très claire du principe de continuité;
- la mise en évidence de l'importance de la pente :

«Lorsque le canal de la rivière a une pente plus forte, le courant est plus rapide...»;

- ses remarques sur la répartition des vitesses dans le lit des rivières :

«L'eau a une vitesse de surface supérieure à celle du fond. Ceci vient du fait que l'eau de surface est en contact avec l'air qui a une moindre résistance — car plus léger que l'eau — et que l'eau du fond est en contact avec la terre qui a une plus forte résistance...»

La figure 5, due à A.H. FRAZIER, est une interprétation artistique de la méthode suivie par Léonard DE VINCI pour étudier la distribution des vitesses dans les rivières. La description des flotteurs situés près de son aide est extraite d'un manuscrit de l'auteur. DE VINCI est représenté en train de suivre le flotteur situé au milieu de la rivière. Il mesure la distance grâce à son odomètre et le temps de parcours en chantant de huit à dix fois des gammes ascendantes et descendantes. L'appareil de mesure de niveau et la cruche (pour remplir la rainure d'horizontalité incisée dans le niveau) sont décrits dans un autre manuscrit; Léonard utilisait un niveau, sans doute de ce type, pour déterminer la pente de la rivière. Il s'agit là, probablement, du premier essai sérieux de détermination de la vitesse du courant grâce à des flotteurs (toutes citations et descriptions traduites de BISWAS, 1970).

2.1.2. Après Léonard DE VINCI, on doit citer Bernard PALISSY (1510-1590) et son «Discours admirable de la nature des eaux et des fontaines, tant naturelles qu'artificielles» (1580), dans lequel l'exposé est présenté sous la forme d'un dialogue entre théorique et pratique, tout à l'avantage de ce dernier :



FIG. 5. — Mesure de vitesse par Léonard DE VINCI (reconstitution par Arthur H. FRAZIER). D'après BISWAS, 1970.

« Pratique: quand j'ai eu bien longtemps et de près considéré la cause des sources des fontaines naturelles et le lieu de là où elles pouvaient sortir, enfin j'ai connu directement qu'elles ne procédaient et n'étaient engendrées sinon des pluies... » (CAP, 1844).

PALISSY exprime ici son «intime conviction» que les sources et les rivières ont comme origine la pluie et non, comme les anciennes théories le maintenaient, la mer ou l'air condensé à l'intérieur des cavités de la terre.

Cette opinion recevra l'adhésion de la plupart des Naturalistes du 17^e siècle (TIXERONT, 1973, TONINI dans UNESCO, 1974), bien que le poids des *a priori* et de certains anciens concepts soit difficile à éliminer, même chez des savants illustres.

2.2. AU 17^e SIÈCLE. MESURES (ET ESTIMATIONS) DES ÉLÉMENTS DU CYCLE DE L'EAU, SUR DE GRANDS BASSINS VERSANTS

Par les premières mesures de terrain (et des estimations plausibles) des pluies, des débits et de l'évaporation, trois savants du 17^e siècle vont tenter de démontrer «chiffres en main», la crédibilité que l'on peut apporter au schéma actuellement reconnu du cycle de l'eau. Ces savants sont les deux français Pierre PERRAULT (1611-1680) et Edmé MARIOTTE (1620-1684) et l'anglais Edmund HALLEY (1656-1742).

2.2.1. Grâce à des mesures et des estimations des pluies et des débits sur le bassin de la Seine, PERRAULT et l'abbé MARIOTTE démontrent d'une manière simple une idée que l'on peut résumer ainsi:

«Le volume des pluies suffit pour expliquer le volume des eaux des sources et des rivières».

Dans « De l'origine des fontaines » (1674), dont la paternité lui a été parfois contestée, PERRAULT donne, en pouce français, les chiffres suivants comme hauteurs pluviométriques, sans expliciter le procédé de mesure:

- octobre 1668-octobre 1669: 18 pouces $\frac{7}{12}$ soit 501,8 mm;
- octobre 1670-octobre 1671: 8 pouces $\frac{1}{2}$ soit 229,5 mm;
- janvier 1673-janvier 1674: 27 pouces $\frac{1}{2}$ soit 742,5 mm.

Curieusement l'auteur fournit comme moyenne des trois chiffres 19 pouces $\frac{7}{36}$ (soit 518 mm) au lieu de 18 pouces $\frac{7}{36}$ (491 mm).

Le volume des précipitations sur le bassin a été estimé par PERRAULT à 225 millions de muids pour l'année.

Pour évaluer l'écoulement, PERRAULT compara le débit de la Seine supérieure à Aignay le Duc à celui de la rivière des Gobelins près de Versailles. Le volume annuel écoulé à Aignay le Duc a été ainsi estimé à 36,4 millions de muids, soit moins du sixième du volume des précipitations (DOOGE, 1959).

Dans le «Traité du mouvement des eaux et autres corps fluides» publié en 1686, soit deux ans après la mort de l'auteur, MARIOTTE expose que sept ou huit ans plus tôt, il avait commencé une expérience. La pluie était mesurée à Dijon (pendant trois années?) d'après les directives de MARIOTTE lui-même, «par un homme très habile et très exact dans ses expériences»:

«Il avait mis vers le haut de sa maison un vaisseau (récipient) carré qui avait environ deux pieds (65 cm) de diamètre (sic), au fond duquel il y avait un tuyau qui portait l'eau de pluie dans un autre vaisseau cylindrique, où il était facile de la mesurer... Le vaisseau d'un diamètre de deux pieds était soutenu par une barre de fer qui s'avancait de plus de six pieds (1,95 m) au-delà de la fenêtre, afin qu'il ne reçut que l'eau de pluie qui tombait immédiatement dans la largeur de son ouverture et qu'il entrât que celle qui devait tomber selon la proportion de la surface supérieure...» MARIOTTE, 1686).

La pluie moyenne annuelle a ainsi été estimée par MARIOTTE à 17 pouces soit 459 mm.

Pour faire son estimation de débit, MARIOTTE étudia les conditions d'écoulement de la Seine au Pont Royal: avec une largeur de 400 pieds (environ 130 m), une profondeur moyenne de 5 pieds (1,62 m) et une vitesse moyenne de 100 pieds par minute (0,54 m/seconde), l'auteur arrive à un volume annuel de 105 milliards de pieds cubiques, soit 3,45 milliards de m³, ou 67 mm sur le bassin versant. Comme le fait remarquer MARIOTTE, *cet écoulement est inférieur au sixième de la précipitation calculée* (DOOGE, 1959).

Sur le tableau I — traduit en unités modernes — les résultats de PERRAULT et de MARIOTTE ont été comparés aux valeurs moyennes mesurées à notre époque.

TABLEAU I
Comparaison entre les données de PERRAULT et de MARIOTTE, et les mesures actuelles. D'après TIXERONT, 1974

	PERRAULT à AIGNAY LE DUC		MARIOTTE à PARIS	
	auteur	données actuelles	auteur	données actuelles
Surface du bassin en km ²	119	93	53 500	44 300
P = Pluie annuelle (millimètre)	518	900	459	750
E = Ecoulement annuel (mm)	80	340	67	194
Déficit d'écoulement = P-E(mm)	438	560	392	556

Les déficits d'écoulement trouvés par les deux auteurs sont assez voisins de la réalité. On peut en être surpris puisqu'ils sont la différence entre hauteurs d'eau évaluées avec une énorme marge d'erreur. Le fait que les erreurs se soient compensées doit, peut-être, être attribué à l'intuition et au flair des hydrologues. Mais cela présente un intérêt plutôt anecdotique. L'essentiel était que l'hydrologie se trouvât dès lors engagée de façon irréversible dans la voie quantitative. L'imprécision même des calculs, dont les auteurs se rendaient parfaitement compte, devait inciter à procéder à des mesures pluviométriques et hydrométriques exactes et régulières (TIXERONT, UNESCO-WMO-AIHS, 1974).

2.2.2. *Le troisième savant méritant notre attention* est l'astronome anglais E. HALLEY, père de la comète du même nom et auteur en 1687 d'une carte mondiale des vents sur les océans reconnue exacte par les océanologues actuels (HISARD, 1988).

Les travaux et articles de HALLEY, assez nombreux sur l'évaporation (1687, 1691, 1694, 1715) auraient pu être motivés au départ par les expériences de PERRAULT et MARIOTTE dont il avait eu connaissance dans les Philosophical Transactions of the Royal Society of London.

Dans son article de 1687, présenté à la Royal Society, HALLEY veut démontrer qu'il y a assez d'eau évaporée sur les océans pour couvrir les quantités déversées par les fleuves et les rivières; ce serait en quelque sorte le «chaînon manquant» du cycle de l'eau.

Pour déterminer la quantité s'évaporant des mers, il mesure (par double pesée) la masse perdue par un récipient cylindrique (diamètre 20 cm, hauteur 10 cm) dont l'eau est chauffée et maintenue à une température de 30 °C. Cette expérimentation lui permet d'estimer que l'évaporation en mer (chaude) doit être pendant les journées d'été d'un dixième d'inch par jour de 12 h, soit 2,54 mm/jour, valeur qui nous paraît plausible aujourd'hui.

A partir de là, commence une démonstration titanesque: HALLEY considère que la Méditerranée avec ses 40° (de longitude) sur 4° doit perdre par évaporation: 5 280 millions de t/j.

D'un autre côté, à partir d'une estimation du débit de la Tamise à Kingstone Bridge (20,3 millions de t/j), il prend en compte les neuf plus grands fleuves du bassin méditerranéen (l'Ebre, le Rhône, le Tibre, le Pô, le Danube, le Dniestr, le Dniepr (Borysthène), le Don (Tanais) et le Nil), qui auraient (en moyenne) un débit dix fois plus important que la Tamise, soit une arrivée d'eau douce en Méditerranée de: $20,3 \times 9 \times 10 = 1\,827$ millions de t/j.

Constatant que ce dernier chiffre ne représente qu'un peu plus du tiers de l'évaporation «calculée», l'auteur considère qu'il est prouvé que le volume d'eau évaporée par la mer suffit à alimenter le volume des eaux des fleuves (BISWAS, 1970).

2.3. PÉRIODES DES MESURES ET DES EXPÉRIMENTATIONS: DE 1600 À 1800

A côté des Universités déjà établies de longue date, on assiste au cours du 17^e siècle à la fondation de nombreuses Sociétés Savantes, entre autres, d'après the World of Learning (Anonyme, 1987):

- Académie Nationale des Lynx de Rome en 1603 (fondée par un mécène proche de GALILÉE);
- Royal Society of London en 1660;
- Académie des Sciences de Paris, fondée en 1666 par COLBERT (sous la protection de LOUIS XIV);
- Académie des Sciences de Berlin en 1700 (précédée dans le temps par les Universités d'Heidelberg en 1386 et de Freiburg en 1457, entre autres);
- Académie des Sciences de Vienne en 1847 (précédée par les Archives de l'Université en 1708 et par la création de l'Université de Vienne en 1365).

Les comptes rendus des séances et les publications de ces Sociétés Savantes sont, pour ce qui concerne les sciences de l'eau, à l'instar des autres disciplines, des archives de première main décrivant les mesures de terrain, les expérimentations et les théories formulées, dont nous tentons ci-dessous d'extraire les plus significatives, sans prétention exhaustive, rappelons-le.

Pour la clarté de l'exposé, nous avons pris le parti de séparer les techniques des sciences de l'eau (de surface) selon la phase étudiée: pluie, vitesse du courant et débit, évaporation.

2.3.1. La mesure des pluies

L'Italien Benedeto CASTELLI semble être le premier Européen à avoir effectué une mesure pour quantifier une pluie d'une durée d'environ 8 h tombée à Pérouse, ainsi qu'il le rapporte dans une lettre adressée à GALILÉE le 10 juin 1639:

«... A cet effet, je pris un verre de forme cylindrique d'environ une paume de hauteur (23 cm) et une demi-paume de large. Ayant mis suffisamment d'eau dans le fond, je marquai cette hauteur et exposai le récipient pour recevoir la pluie pendant une heure, puis je marquai de nouveau la hauteur atteinte (estimée à 10 mm)...» (BISWAS, 1970).

Cette mesure ne semble pas avoir été suivie d'autres expériences sur une longue période.

Le premier système d'enregistrement de la pluie en fonction du temps (comparable à nos pluviographes), conçu par l'Anglais Sir Christopher WREN (1632-1723) a été décrit ainsi par le Français B. DE MONCONYS en 1666, après un voyage en Angleterre: sous l'entonnoir de réception, trois compartiments sont montés sur un râtelier déplacé doucement par un système d'horlogerie, de telle sorte que le premier compartiment collecte la pluie tombée la première heure, le suivant la pluie de la deuxième heure, etc.

Chronologiquement, on doit situer ici les mesures faites à la demande de PERRAULT entre 1668 et 1674, et celles effectuées à Dijon d'après les directives de MARIOTTE, aux environs de 1675 (cf. paragraphe 2.2.1. ci-dessus).

Dans le bulletin de la Royal Society of London de 1681, il est décrit «un instrument pour la mesure de la quantité de pluie qui tombe dans chaque espace de temps». Les inventeurs en sont Sir Christopher WREN et Robert HOOKE (1635-1703), professeur de géométrie. Cet instrument faisait partie d'une «horloge climatique» plus complexe, enregistrant cinq paramètres du climat dont la pression, la température, l'hygroscopie et le vent. Les enregistrements étaient effectués toutes les quinze minutes sur une bande de papier entraînée par une lourde horloge. La pluie était mesurée grâce à des *augets basculeurs*, semblables à ceux que l'on connaît actuellement et que R. HOOKE avait décrit avec croquis à l'appui (BISWAS, 1970).

D'autre part, le mathématicien Philippe DE LA HIRE et l'académicien SEDILEAU observèrent conjointement pendant les trente premières années un pluviomètre installé en 1688 sur la terrasse de l'Observatoire Astronomique de Paris (72 m d'altitude de 1688 à 1773, et 91 m ensuite). Il s'agissait (de 1688 à 1754) d'un bassin carré de 4 225 cm² en fer blanc, avec rebords de 16 cm; l'eau s'écoulait par un tuyau dans une cruche, puis était mesurée à l'aide d'un vase cubique de 8 cm de côté (DETTWILLER, 1984).

L'intérêt des savants pour les mesures climatologiques, et pluviométriques en particulier, s'accroît dès le début du 18^e siècle, comme le montrent l'ingéniosité des appareils et la persévérance des observations décrites ci-dessous, parmi d'autres, d'après BISWAS (1970):

D'après R.E. HORTON (1919), les physiiciens KINDMANN et KANOLD, de Breslau en Prusse, inventèrent un pluviomètre conique aux environs de 1717 et réalisèrent des mesures de 1717 à 1727.

Dans un article du bulletin de la Royal Society of London de 1723, l'Anglais John HORSLEY propose de remplacer la pesée de l'eau par une mesure directe dans un cylindre gradué d'un diamètre égal au dixième de celui de l'entonnoir, d'où la facilité et la précision des lectures.

Dans le même bulletin, James JURIN fournit un ensemble de règles pour rendre homogènes les méthodes d'observations météorologiques; c'est le premier essai de normalisation des mesures.

L'Allemand J. LEUPOLD (1726) décrit et fournit les figures reproduites ici en n° 6 et 7, des cinq appareils suivants:

— la partie inférieure du pluviomètre de la Société d'Histoire Naturelle de Breslaw (fig. XII de la fig. 6) utilisé dès 1717, et qui est sans doute le même que celui cité ci-dessus par HORTON (1919);

— le pluviomètre de LEUPOLD (fig. XIII de la fig. 6) composé d'un réservoir à bague carrée de 9 inches (22,9 cm) de côté. La mesure était faite à l'aide d'une éprouvette en verre;

— le «hyétomètre» de LEUTMANN, (fig. XIV de la fig. 6);

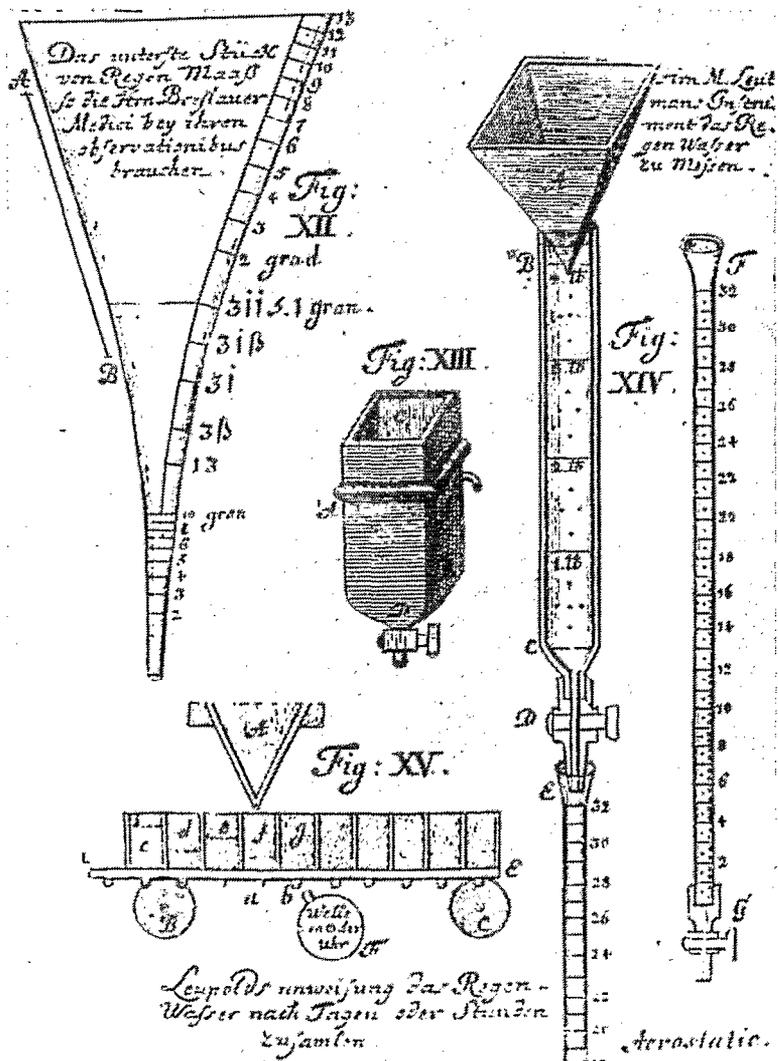


FIG. 6. — Pluviomètres non enregistreurs décrits par LEUPOLD (1726). D'après BISWAS, 1970.

— le dispositif de LEUPOLD (fig. XV de la fig. 6) permettant de décomposer la pluie selon des intervalles de temps prédéterminés, d'un jour ou d'une heure. Les réservoirs (c, d, e, f, ...) situés sous le réceptacle A étaient déplacés par un arbre moteur F raccordé à un mouvement d'horlogerie;

— le hyétomètre automatique de LEUPOLD à un seul auget basculeur (fig. 7). Cet auget (b, c, J sur les fig. IV, III, II et I) situé à l'extrémité d'un fléau de balance K (contrepois en L, axe en O) actionne à chaque basculement une roue à rochet, dont le cliquet entraîne à son tour les roues dentées N, P, Q et R. Chaque roue dentée est solidaire d'une aiguille totalisant les basculements sur des cadrans à divisions décimales.

En milieu de page, sur la fig. I, on notera l'existence d'un déflecteur de pluie, qui n'a été réintroduit que tout récemment sur les pluviographes modernes.

Enfin, on remarquera en bas de page, fig. VI, le croquis du «plagoscope», girouette à roues dentées indiquant le sens du vent.

D'un autre point de vue, signalons les plus longues séries d'observations françaises citées dans la littérature, à notre connaissance:

— les observations météorologiques (température, pression, degré hygrométrique, pluviométrie, nuages et vents) effectuées trois à quatre fois par jour par Louis MORIN, médecin, botaniste et académicien parisien. Ces mesures couvrent 48 années, de février 1665 à juillet 1713 (JONES, 1990);

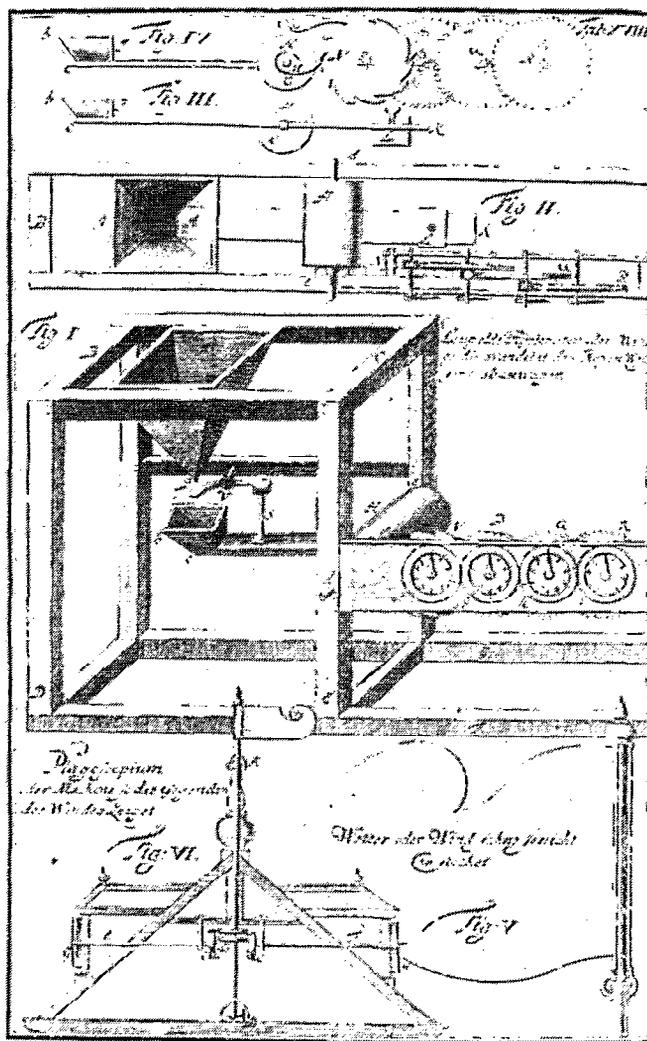


FIG. 7. — Pluviomètre «automatique» de LEUPOLD (1726). D'après BISWAS, 1970.

— sur plus de 300 années de relevés pluviométriques commencés en 1688 à l'Observatoire de Paris (terrasse d'une part et pluviomètre installé dans la cour en 1817), l'examen critique a montré que l'on ne peut conserver, comme période homogène, que les données postérieures à l'année 1800 (DETTWILLER, 1984);

— dans son «essai sur le climat de Montpellier», Jacques POITEVIN (1803) récapitule sous forme de tableaux annuels les nombres de jours pluvieux par mois et les totaux mensuels (exprimés en degrés observés sur «l'udomètre», traduits en millimètres par l'auteur), mesurés par lui-même sur le toit de sa maison, à 62 m d'altitude, entre le 1^{er} janvier 1767 et fin fructidor de l'an X (septembre 1802). On a donc là 36 années d'observations, comprenant cependant vingt mois environ de lacunes entre décembre 1792 et avril 1795. Ces mesures ont été poursuivies, et publiées ailleurs, par POITEVIN lui-même jusqu'à la fin de 1806, puis par son fils aîné Eustache de 1807 à la fin 1812 (E. ROCHE, 1988).

Enfin, en Italie, d'après un recensement récent de Virgilio ANSELMO (communication écrite, juin 1990), les plus longues séries continues de précipitations journalières sont les suivantes: Padoue (depuis 1724), Milan (1763), Piacenza, dans la Plaine du Pô (1802), Turin (1806), Rome (1811), Florence et Bologne (1813). La série ancienne «la plus haute» a débuté en 1818 au Col du Grand-Saint-Bernard (altitude 2 473 m).

2.3.2. La mesure des vitesses du courant et des débits

Après la détermination par Léonard DE VINCI (cf. paragraphe 2.1.1.) de la vitesse du courant d'une rivière grâce à des flotteurs, on doit considérer que l'estimation du débit de la Seine à Paris, par MARIOTTE (1686) est une estimation hydrométrique qui ne serait pas désavouée de nos jours. Dans son traité, l'auteur indique une méthode de mesure de débit en employant des boules de cire lestées, qui peuvent être éventuellement reliées entre elles, pour montrer que la vitesse est plus faible au fond du canal qu'à la surface.

Cependant, si un nombre relativement important de mesures de pluie a été réalisé au cours du 17^e siècle (cf. début du paragraphe 2.3.1.), ce n'est qu'au cours du 18^e siècle que seront expérimentés des instruments précis de mesure de la vitesse des fluides, en particulier la vitesse de l'eau dans un canal. Nous ne citerons ici que trois expérimentations, à nos yeux représentatives:

1. Le tube du français Henri PITOT (1695-1771), sur lequel l'auteur fait un exposé daté du 12 novembre 1732, dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences.

Le principal problème ayant incité PITOT dans sa recherche était de mesurer, pour des raisons pratiques, la vitesse du courant en tout point d'une rivière: «*Cette connaissance est cependant absolument nécessaire pour prévenir les désordres que causent la plupart des fleuves, et pour tirer de ces mêmes Fleuves le parti le plus avantageux...*» (PITOT, 1732).

La «Machine» est constituée «*d'une tringle de bois taillée en forme de prisme triangulaire; sur le milieu d'une des trois faces de cette tringle, on a creusé une rainure capable de loger deux tuyaux de verre blanc; l'un des tuyaux est courbé à angle droit ... et le second est tout droit ... Dans une eau courante, l'eau s'élèvera dans le premier tuyau à une hauteur relative à la force du courant, pendant qu'elle restera à son niveau dans le second tuyau*».

Concernant le calibrage de son double tube, PITOT note: «*Il est heureux pour l'exactitude et la précision avec laquelle on connaîtra par cette Machine la juste quantité des vitesses des courants, que les élévations de l'eau soient entre elles comme le carré des vitesses; car par exemple, une vitesse double fera élever l'eau dans le tube à une hauteur quatre fois plus grande, une vitesse triple la fera élever à une hauteur neuf fois plus grande, etc.*».

En plus d'une figure de sa «Machine», l'auteur donne une table des vitesses de l'eau en pieds et pouces, entre un pouce = 2,7 cm (par seconde) et 12 pieds = 3,89 m/s, en fonction de la hauteur des chutes (différence de lecture entre les deux tubes).

Après le premier essai fébrile de sa «Machine», PITOT dit: «*Je ne pouvais pas m'imaginer qu'une chose aussi simple, et en même temps très utile, eut pû échapper à tant d'habiles gens qui ont écrit et travaillé sur le mouvement des eaux. J'ai fait depuis toutes les recherches qu'il m'a été possible dans les Traités sur les Hydrauliques ... pour voir si ... mon idée était nouvelle*».

L'application de cette idée pour connaître le sillage des Vaisseaux m'est venue dans le moment même que j'en avais fait la première expérience sur la Rivière...

2. Plus proche du matériel hydrométrique actuel que le tube de PITOT, le moulinet hydraulique du portugais Estevao CABRAL (1734-1811) est décrit dans un article publié à Rome en 1786, dont les principales illustrations sont reproduites ici fig. 8. CABRAL, n'ayant pas trouvé d'appareil satisfaisant pour mesurer la vitesse du courant sur toute la profondeur des cours d'eau, construisit ce moulinet constitué essentiellement d'une roue à huit aubes en tôle montée sur un axe en laiton OA, lui-même solidaire d'une tige coulissant en V-V et portant un petit pavillon T qui permettait de compter le nombre de rotations. Le tout était manœuvré grâce à la perche P et orienté face au courant par un gouvernail fixé en I.

Sur la partie gauche de l'illustration, figurent les diagrammes (paraboles) des vitesses mesurées dans l'Aniene (fig. 5) et dans l'Albula (fig. 6 et 7). (Direçao Geral..., 1986).

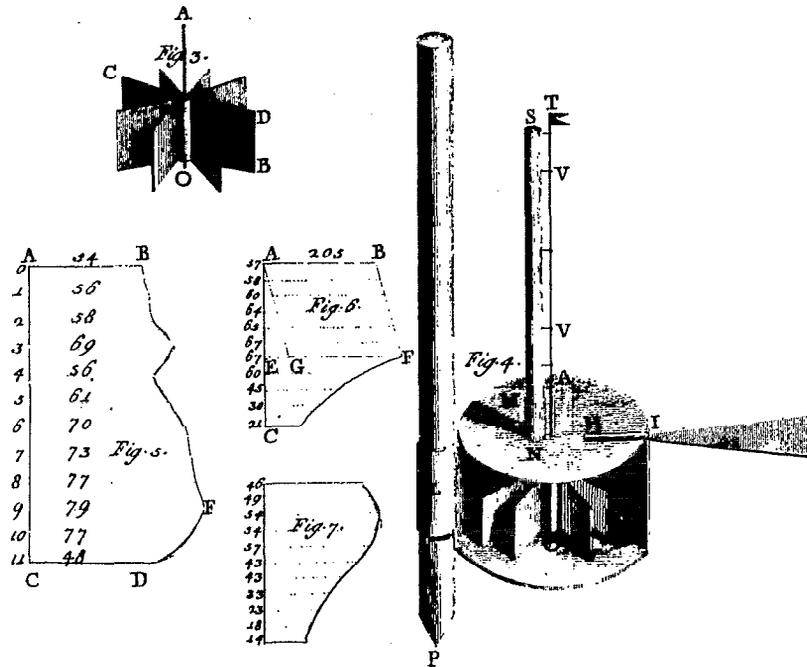


FIG. 8. — Moulinet hydraulique, et diagrammes de vitesse mesurés par Estevao CABRAL (1786). D'après Direcção Geral..., 1986.

D'après QUINTELA et LAUREIRO (1986), on peut attribuer à CABRAL les deux importantes innovations suivantes dans l'hydrométrie des fleuves :

- mesure au moulinet de la vitesse en n'importe quel point de la section (et pas seulement en surface) pour calculer le débit ;
- vérification que la vitesse de l'écoulement dans les fleuves augmente avec la profondeur dès la surface libre jusqu'à un maximum, pour décroître vers le fond.

3. Enfin l'ingénieur allemand Reinhard WOLTMAN (1757-1837) a proposé en 1790, une description d'un courantomètre à double pales entraînant un compteur circulaire, pour calculer le débit des fleuves.

Pendant de nombreuses années après la mort de WOLTMAN, chaque version améliorée fut appelée un « moulinet de WOLTMAN », en mémoire de l'ingénieur. De nombreux livres et articles d'hydrologie et d'hydraulique ont publié des illustrations de modèles plus perfectionnés qui ont été attribués à tort à WOLTMAN (BISWAS, 1970).

2.3.3. La mesure de l'évaporation

D'après B. POUYAUD (1985), on peut dire que du point de vue théorique, DESCARTES (1596-1650) est l'un des premiers physiciens à s'être totalement affranchi des concepts d'ARISTOTE, pour qui il était impossible d'admettre une quelconque relation entre l'évaporation et le vent. Pour DESCARTES, tous les corps (eau et air compris) sont composés de particules élémentaires, à partir desquelles il expliquait notamment l'évaporation et le vent. L'évaporation serait causée par l'énergie du soleil ; la chaleur proviendrait de l'agitation des particules élémentaires. Le vent serait de l'air en mouvement, mais serait un résultat de l'évaporation sans en être l'une des causes.

Pour ce qui concerne les mesures proprement dites, celles-ci furent abondamment développées à partir du dernier quart du 17^e siècle. Rappelons tout d'abord la mesure (de laboratoire) et l'estimation du volume évaporé sur la Mer Méditerranée, exposés par HALLEY en 1687 et décrits ci-dessus au paragraphe 2.2.2.

Du même auteur, nous devons citer l'article où HALLEY (1694) décrit une expérimentation effectuée, au cours de l'année 1693 à Gresham College (Londres) par Henry HUNT. « avec grands soin et précision ». L'évaporation d'une surface d'eau protégée (du vent) et abritée (par un toit), d'une superficie de 8 sq.inches était relevée tous les jours de l'année 1693 à 8 heures du matin, ainsi que la température (de l'air ?), la pression et les « conditions » de précipitation (pluie, neige ou gel). L'évaporation annuelle mesurée a été de 64 cu.in., soit 8 in. ou 203,2 mm par inch carré de surface.

Constatant que cette valeur était trop faible face aux pluies mesurées par PERRAULT à Paris (19 pouces français) et par Richard TOWNLEY à Townley, aux pieds des collines du Lancashire (40 pouces anglais), l'auteur explique que dans son expérimentation, les effets directs du vent et du soleil ayant été exclus, seraient à l'origine de ce déficit de mesure.

Il estime que l'effet du vent aurait fait augmenter l'évaporation d'un facteur d'au moins trois, et l'effet du soleil d'un facteur double (BISWAS, 1970).

Parmi les différents expérimentateurs et les théories qu'ils ont formulées, nous citerons (POUYAUD, 1985):

— SEDILEAU qui expérimente, pendant près de trois années, sur bac à l'Observatoire Royal de Versailles (1692, publié en 1730);

— MARIOTTE qui poursuit des expériences identiques à Dijon (vers 1675);

— DE LA HIRE (1640-1718) qui compare en 1703 ses expérimentations sur bacs avec celles sur le premier lysimètre et dont les résultats différents l'étonnent;

— en 1751, LEROY introduit le concept de «degré de saturation» de l'air, auquel correspond le moderne «point de rosée».

— en 1790, Gaspard MONGE prouve que «*la vapeur d'eau est dans l'air humide ce que le sel est dans l'eau salée*»;

— en 1787 et 1792, DELUC avait formulé l'idée que lorsque l'eau s'évapore, un fluide expansible est produit, dont la pression admet un maximum pour une température donnée.

La publication par John DALTON (1802) d'un article sur l'évaporation est incontestablement la date marquant l'apparition de la première formulation vraiment moderne d'une théorie de l'évaporation. Après avoir résumé les connaissances de son époque sur les mélanges gazeux et fourni une table des valeurs numériques de la pression partielle de vapeur d'eau saturante en fonction de la température, DALTON énonçait quelques lois, présentées sous forme de tables numériques, sur les causes de l'évaporation, que l'on peut résumer, sous une forme moderne, par la célèbre formule (qui ne fut en fait jamais écrite par DALTON), reliant l'évaporation en millimètre par jour, à la vitesse moyenne du vent, à la pression de vapeur de l'air ambiant (en mb) et la pression de vapeur saturante à la température de la surface évaporante (en mb).

CONCLUSION

Dans le cadre du sujet primitivement proposé au Symposium de l'AISH tenu à Rome en avril 1987: «L'hydrologie en perspective, les leçons du passé et les perspectives d'avenir», un premier article (L'HÔTE, 1987) nous a permis de présenter un court résumé du passé ainsi qu'une analyse de l'enseignement du cycle de l'eau (et du rôle d'acteur de chaque individu) dans les études élémentaires et du second degré en France, partie qui a suscité de fructueux échanges.

Considérant la rareté des publications en langue française sur l'histoire de l'hydrologie, nous avons souhaité développer ce travail qui reste, bien sûr, très incomplet dans sa présentation actuelle. Cette recherche nous a permis de constater que l'accès à un texte ancien le plus proche possible de l'original de l'auteur est d'une grande difficulté dans nos bibliothèques, y compris la Bibliothèque Nationale. Comme on l'a vu pour le cas de PERRAULT (paragraphe 2.2.1.), il faut parfois se référer à des traductions anglaises de textes d'origine française, avec les inconvénients que l'on imagine.

Par ailleurs, comme le souligne LAROCQUE (1967, cf. bibliographie: PERRAULT), un certain nombre d'ouvrages anciens, extrêmement rares et donc difficiles à consulter, restent encore à exploiter de façon méthodique.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 25 mai 1990

BIBLIOGRAPHIE

ARISTOTE. — Les Météorologiques. Traduction par J. Tricot, Edition Vrin, 1955.

BISWAS (A.K.), 1970. — History of hydrology. North Holland Publishing Company, Amsterdam, London, 335 p.

BONNIN (J.), 1984. — L'eau dans l'antiquité. L'hydraulique avant notre ère. Ed. Eyrolles, Paris, 450 p.

CAP (P.A.), 1844. — Œuvres complètes de Bernard Palissy, édition conforme aux textes originaux imprimés du vivant de l'auteur. J.J. Dubochet et Cie, Paris: 136-182.

CASTANY (C.), MARGAT (J.), ROUX (J.C.), 1986. — Origine, évolution et applications de l'hydrogéologie. *Géologues*, Revue officielle de l'Union Française des Géologues, Bulletin trimestriel n° 76/77 (nouv. sér. 86 1/12); 19-26.

CHOURAQUI (A.), 1985. — L'univers de la Bible. Ed. Lydis, Paris.

CHOW (V.T.), 1964. — Handbook of applied hydrology. Mc Graw-Hill, New York, 29 sections et index.

- DALTON (J.), 1802. — Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat. *Mem. Manchester Lit. and Phil. Soc.* 5: 535-602.
- DETTWILLER (J.), 1984. — Sur les pluies de Paris. In: *La Météorologie*, VII^e série, n° 1, février 1984: 6-15.
- Direcção Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos, 1986. — Estevao Cabral, segundo centenario da publicação: *Ricliche istoriche, fisiche ed idrostatiche sopra...*, Lisboa, 67 p.
- DOOGE (J.C.I.), 1959. — Un bilan hydrologique au XVII^e siècle. *La Houille Blanche*, 14^e année, 6, nov. 1959, Grenoble: 799-807.
- FRANÇOIS (J.), 1653. — La Science des Eaux, qui explique en quatre parties leur formation, communications, mouvements et mélanges, avec les Arts de conduire les eaux, et mesurer les grandeurs tant des eaux que des terres, qui sont... Chez P. Hallaudays, à Rennes. Cote BN: V 9818.
- GARBRECHT (G.), 1987. — Hydraulic engineering, hydrology and hydraulics in Antiquity. *ICID bulletin*, january 1987, vol. 36,1.
- GOHAU (G.), 1987. — Histoire de la géologie. Ed. de la Découverte, Paris, 259 p.
- HALLEY (E.), 1687. — An estimate of the quantity of vapour raised out of the sea by the warmth of the sun. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, n° 189 (16): 366-370.
- HALLEY (E.), 1694. — An account of the evaporation of water, as it was experimented in Gresham Colledge in the year 1693. With some observations thereon. *Philos. Trans. Roy. Soc. London*, n° 212 (18): 183-190.
- HISARD (P.), 1988. — Le tricentenaire de la carte des Alizés, par Edmund Halley. *Bulletin de Liaison Océan Climat (BLOC)* n° 16, janv.-fév. 1988, ORSTOM, TOA, Montpellier.
- HORTON (R.E.), 1919. — The measurement of rainfall and snow. *Journ. of the New England Water Works Assoc.*, 33: 14-23.
- JONES (P.D.), 1990. — Le climat des mille dernières années. In: *La Recherche*, n° 219, mars 1990; 304-312.
- LEUPOLD (J.), 1726. — *Theatri statici universalis* (Théâtre des données universelles; trad. libre). C. Zunkel Ed., Leipzig.
- LEVEAU (P.), 1979. — La construction des aqueducs romains. *Les Dossiers de l'Archéologie* n° 38, Dijon: 8-19.
- L'HÔTE (Y.), 1987. — Rappel de l'histoire du concept du cycle de l'eau dans la culture occidentale. Son enseignement en France, hier et aujourd'hui. In: *Water for the Future; Hydrology in perspective* (Symp. Rome, April 1987), 34-45. *AISH-Publ.*, n° 164.
- MARIOTTE (E.), 1686. — *Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides*. E. Michallet, Paris.
- PELLETIER (A.), 1979. — Frontin, curateur des eaux de Rome. *Les Dossiers de l'Archéologie*, n° 38, Dijon: 43-51.
- PERRAULT (P.), 1674. — *De l'origine des fontaines*. Traduction anglaise par A. Larocque, 1967 — *On the Origin of Springs*. Hafner Publishing Co, New York, London, 209 p.
- PITOT (H.), 1732. — Description d'une machine pour mesurer la vitesse des Eaux courantes, et le sillage des Vaisseaux. *Mem. Acad. Roy. Sciences Paris*, 1732: 363-376. Reproduit dans *La Houille Blanche* n° 8-1966, Grenoble: 921-936.
- POTEVIN (J.), 1803. — *Essai sur le climat de Montpellier*. Cote de la Bibliothèque de la ville de Montpellier n° 10 058: 67-119.
- POUYAUD (B.), 1985. — Contribution à l'évaluation de l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec. Thèse, Paris-Sud Orsay, 254 p.
- QUINTEL (A de C.), LAUREIRO (J.M.), 1986. — Estevao CABRAL, pionner de l'hydrométrie des fleuves, Multigr., Lisboa, 8 p.
- ROCHE (E.). — *Recherches sur la météorologie et les Météorologistes à Montpellier, du XVIII^e siècle jusqu'à nos jours*. Charles Boehm Editeur, Montpellier, 105 p.
- SCHNITZER-REINHART (N.), 1979. — Les barrages romains. *Les Dossiers de l'Archéologie*, n° 38, Dijon: 20-25.
- The World of Learning, 1987. — Europa Publication Limited, 37^e édition, 1933 p.
- TIXERONT (J.), 1973. — Sur un ancien texte hydrologique attribué à DEMOCRITE. Livre jubilaire, Marcel Solignac, *Ann. des Mines et de la Géol.*, n° 26, Tunis: 621-631.
- UNESCO, 1974. — Contributions to the development of the concept of the hydrological cycle. Textes de V.T. CHOW, J.C.I. DOOGE, M. ECKOLDT, G.P. KALININ, R.L. NACE, D. TONINI. SC.74/CONF.804/COL. 1, Paris, August 1974, 135 p.
- UNESCO-WMO-IAHS, 1974. — Trois siècles d'hydrologie scientifique. Rapports de base présentés à l'occasion de la célébration du Tricentenaire de l'hydrologie scientifique, Paris, 9-12 septembre 1974. Paris, 123 p.
- VITRUVÉ. — *Les dix livres d'architecture*. Traduction de Claude PERRAULT, 1673, revue et corrigée sur les textes latins par André DALMAS, 1979. Ed. Balland, Paris, 349 p.