
Observer la Terre pour appréhender spatialement les inégalités de santé : regard historique et prospectif sur l'utilisation de la télédétection dans le domaine de la santé

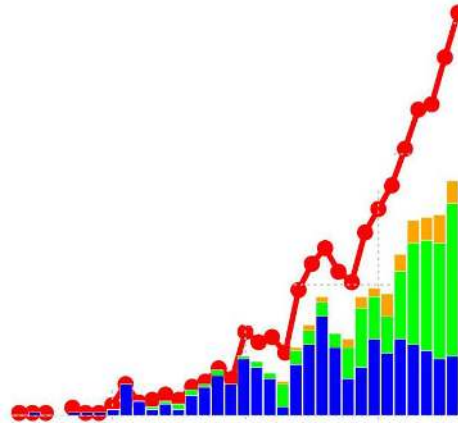
Observar a Terra para analisar a distribuição espacial das desigualdades da saúde: um olhar histórico e prospectivo sobre o uso do sensoriamento remoto no campo da saúde

Observing the Earth for a spatial understanding of health inequalities: a historical and prospective overview of the use of remote sensing in the health field

Vincent Herbreteau, Daouda Kassié, Emmanuel Roux, Renaud Marti, Thibault Catry, Artadji Attoumane, Christophe Révillion, Jérémy Commins, Nadine Dessay, Morgan Mangeas e Annelise Tran

Introduction

- 1 La télédétection aérienne a connu ses premières expérimentations dès le début du dix-neuvième siècle puis s'est réellement développée pendant les première et deuxième guerres mondiales par la prise de photographies militaires (Campbell, 2011). Les premières images satellite apparaissent dans les années 60 mais c'est avec le lancement du satellite Landsat 1 en 1972 puis du satellite SPOT 1 en 1986 que l'observation de la Terre par satellite devient réellement opérationnelle (Campbell, 2011). Ils ont été les précurseurs



de séries de satellites d'observation qui sont aujourd'hui en orbite, et régulièrement renouvelés. Selon leurs caractéristiques, les images satellite peuvent permettre l'identification d'objets au sol de quelques dizaines de centimètres, ou d'avoir des images de la surface terrestre avec une fréquence d'acquisition quotidienne. Le CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), qui fédère 60 agences membres ou associées, recense 154 satellites pour l'observation de la Terre en 2018 (dont les caractéristiques sont données sur son portail d'information : <http://database.eohandbook.com/index.aspx>). Si les principaux attraits des données de télédétection sont leurs capacités de couverture et de répétitivité ainsi que leur qualité et leur coût réduit, les analyses de télédétection ne peuvent se passer d'une bonne connaissance in situ des paysages, des objets, ou des sociétés observés. Le processus d'analyse d'image en télédétection (photographies aériennes et scènes satellitaires) découle d'une démarche intellectuelle complexe et rigoureuse (Provencher, 2007). L'identification de chaque objet de l'image présente un degré de difficulté variable fonction de sa nature, et des caractéristiques des images utilisées. Si la photo-interprétation permet un premier niveau d'utilisation des images de télédétection en exploitant les capacités de discrimination de l'oeil humain, son utilisation ne peut s'envisager lorsqu'un nombre trop important d'images et/ou d'objets est considéré. Le développement d'autres méthodes d'analyses faisant appel à des méthodes statistiques et/ou d'apprentissage devient alors nécessaire.

- 2 Les concepts et les principes qui sous-tendent l'utilisation de la télédétection en santé ont été publiés dès la fin des années 1960. Pavlovsky (cité par Cline, 1970) introduit ainsi le concept d'épidémiologie du paysage (landscape epidemiology), qui applique aux agents pathogènes, ainsi qu'à leurs vecteurs et à leurs réservoirs, les concepts, méthodes et outils de l'écologie du paysage. L'épidémiologie du paysage étudie les processus écologiques associés au paysage - considéré selon sa composition (relative à ses différents éléments) et sa configuration (relative à l'organisation spatiale de ses éléments) - qui influent sur la santé des populations. Au regard des progrès importants des dernières années réalisés sur la mise à disposition, la résolution et le coût des images de télédétection, l'ergonomie et la performance des outils logiciels associés, il serait facile de prédire pour bientôt son intégration effective et durable dans les pratiques des acteurs de la santé. Cependant, de telles promesses n'ont pas été véritablement tenues par le passé. Dans un rapport de la NASA de 1971, il est dit que l'apport potentiel de la télédétection aérienne et spatiale en santé pourrait s'avérer comparable à celui des améliorations apportées par Leeuwenhoek au microscope en 1673 (Barnes, 1991). Ce même rapport

précise cependant que le microscope a mis presque 300 ans à effectivement entrer dans la pratique médicale.

- 3 Dans cette étude, nous proposons un regard rétrospectif et prospectif sur l'usage de la télédétection pour éclairer les questions de santé, en essayant de clairement définir les verrous qui ont limité ou limitent encore les usages. Après une première partie plus théorique dédiée aux principes d'acquisition et de traitement des images satellite, nous focalisons la seconde partie sur les différents usages des outils de la télédétection dans le domaine de la santé avant de discuter, dans la troisième partie, des limites, des recommandations et des perspectives d'intégration pour le traitement des questions sanitaires.

La télédétection : un outil d'observation multiscalaire

Principes physiques et géométriques

- 4 La télédétection, littéralement la détection à distance (« remote sensing » en anglais), est : « l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci » (J.O. du 11 décembre 1980) (Girard, 2010). Dans le cadre des systèmes d'informations géographiques (SIG), la télédétection fait référence à l'analyse des images acquises par les capteurs embarqués sur les différents types de plateforme : avions, drones, ou satellites d'observation de la Terre. Cette technique repose sur la mesure des rayonnements du spectre électromagnétique (p.ex. optique, micro-ondes). La télédétection est dite passive quand le capteur n'émet aucune énergie (p.ex. capteur optique passif avec les canaux Rouge, Vert, Bleu), et active lorsque le capteur émet sa propre source d'énergie avant réception (p.ex. capteur RADAR (« Radio Detection and Ranging ») en bandes L, C, ou X). Le rayonnement électromagnétique est atténué différemment par l'atmosphère en fonction de la longueur d'onde (ou fréquence) : on parle de fenêtres atmosphériques. Les bandes des capteurs RADAR sont ainsi peu ou très peu sensibles aux conditions atmosphériques à la différence des capteurs optiques pour lesquels les nuages, en particulier, masquent le sol. Chaque type d'objet observé possède des caractéristiques d'émission et de réflexion propres que l'on nomme « signature spectrale ». Par exemple, la végétation absorbe le rayonnement de la lumière aux longueurs d'onde du rouge et du bleu et réfléchit le vert (d'où sa couleur). L'eau réfléchit les longueurs d'onde du bleu et absorbe fortement les longueurs d'onde de l'infrarouge. Dans le cas des capteurs RADAR, on mesure la part retransmise (rétrodiffusée) par les objets tout en mesurant le temps de trajet des ondes et les changements éventuels de polarisation de l'onde émise.
- 5 Lorsqu'une image est acquise par un capteur, elle contient des erreurs de type radiométrique géométrique. Les particules de l'atmosphère altèrent le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par la surface imagée par des phénomènes de diffusion, absorption, atténuation ou réfraction. La valeur radiométrique enregistrée au niveau du capteur correspond à l'énergie réfléchie par les objets au sol et modifiée par les effets atmosphériques. La composition de l'atmosphère étant variable dans le temps et dans l'espace, des corrections atmosphériques systématiques sont nécessaires pour comparer l'information issue de deux images de la même zone prises à deux dates différentes. Ces effets atmosphériques peuvent être corrigés via l'application de codes ou

de modèles atmosphériques. Les erreurs radiométriques peuvent également être dues à des défauts instrumentaux. Les corrections et la calibration radiométrique permettent de convertir les comptes numériques de chaque pixel (p.ex. codé sur 8 bits, entre 0 et 255) en une grandeur physique (luminance ou réflectance).

- 6 Les images satellite sont acquises dans la géométrie du capteur et ne sont pas directement superposables à une carte. Plusieurs type de déformations géométriques doivent être prises en compte : la géométrie lors de l'acquisition de l'image (p.ex. l'angle d'incidence, l'orbite), la courbure et la rotation de la Terre, ou encore la topographie. Deux types de traitements géométriques permettent de rendre l'image exploitable dans un SIG : l'orthorectification (chaque pixel est observé en visée verticale, ou nadir) et le géoréférencement (chaque pixel de l'image est associé à un couple de coordonnées géographiques).

Une grande diversité de capteurs pour l'observation de la Terre

- 7 Les satellites d'observation de la Terre ne constituent qu'une part des satellites qui gravitent autour du globe. Les autres sont dédiés aux télécommunications, au positionnement, à la navigation (p.ex. le système américain GPS – Global Positioning System), aux activités militaires et aux activités scientifiques (p.ex. en géodésie). Selon leurs applications, les satellites d'observation suivent différentes orbites dites :
 - géostationnaires (environ 36 000 km). Ces satellites tournent à la même vitesse angulaire que la Terre. Ils se situent toujours au zénith d'un même point sur le plan de l'équateur et offrent une vision large, constante et en temps réel d'une région du globe (Girard and Girard 2010). Ils sont généralement destinés aux observations météorologiques (comme METEOSAT) ou aux télécommunications ;
 - polaires (300-1000 km). Ces satellites défilent le long du globe en passant à proximité des deux pôles à chaque cycle. Cette trajectoire combinée à la rotation de la Terre permet d'observer la quasi-totalité du globe en quelques jours.
- 8 Les satellites à orbite polaire sont souvent héliosynchrones : ils passent toujours à la même heure solaire au-dessus d'une même région de la Terre, ce qui permet d'acquérir les images dans des conditions similaires d'éclairage, et de rendre les scènes comparables (p.ex. suivi de changement) (Girard, 2010). Ce sont ces satellites qui sont utilisés dans le cadre des SIG, et qui nous intéressent ici. On leur associe les principales caractéristiques suivantes :
 - la fauchée qui correspond à la largeur de l'étendue imagée à chaque passage, d'une dizaine à quelques centaines de kilomètres selon le capteur ;
 - différentes résolutions : (i) la résolution spatiale, soit la taille de chaque partie élémentaire de l'image ou pixel (ii) la résolution temporelle, qui est l'intervalle de temps nécessaire pour revisiter un même point terrestre situé à la verticale (visée au nadir) (iii) la résolution spectrale, qui indique le nombre et la taille des bandes de fréquence du spectre électromagnétique échantillonné (iv) la résolution radiométrique, déterminée par la sensibilité à l'intensité de l'énergie radiométrique reçue (ainsi, un capteur 8 bits peut enregistrer $2^8=256$ niveaux d'intensité).
- 9 Généralement, plus la résolution spatiale est élevée, plus la fauchée est courte et le temps de revisite long. Pour un temps de revisite plus court, certains satellites sont lancés en constellations : ainsi, Rapideye est un ensemble de 5 satellites permettant une revisite de 5 jours pour une résolution spatiale de 6,5 mètres. Les capteurs à haute et moyenne

résolutions spatiales, comme ceux embarqués par Landsat (15 à 30 mètres de résolution), ou à moyenne et basse résolution spatiale comme MODIS (de 250 mètres à 1 km), sont généralement gratuits et très largement utilisés. Les images des capteurs à très haute résolution spatiale (THRS) sont souvent onéreuses, et leur acquisition s'effectue via des demandes de programmations (i.e. non systématiques).

- 10 En 2001, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et l'Union européenne ont lancé un programme ambitieux de surveillance globale pour l'environnement et la sécurité (Global Monitoring for Environment and Security - GMES), devenu le programme Copernicus en 2012, afin de rassembler des données satellitaires accessibles et de développer des services opérationnels. Dans le cadre de Copernicus, l'ESA a développé la constellation des satellites Sentinel qui fournissent des images gratuites, optique et RADAR, dans des résolutions complémentaires. Ainsi, les satellites Sentinel-2 A et B produisent des images à haute résolution spatiale (HR) (jusqu'à 10 m), avec une acquisition systématique globale tous les 5 jours. Depuis les années 2010 aussi, de plus en plus de programmes publics ont été élaborés pour faciliter l'accès aux données THRS (comme le programme GEOSUD <http://ids.equipe-geosud.fr/>) en France qui fournit des images SPOT 6/7 et Pléiades). Ils permettent d'effectuer des demandes de programmation à coût réduit (p.ex. 1€ du km²), ou gratuitement pour les scientifiques et les acteurs institutionnels nationaux.
- 11 Nous proposons une liste non exhaustive des capteurs optiques disponibles en programmation ou en archive et utilisés dans les études en lien avec la santé ou potentiellement utilisables (Tableau 1).

Tableau 1 : Liste des principaux satellites et capteurs actuellement utilisés pour l'observation de la Terre avec des applications possibles dans le domaine de la santé.

Satellite / Capteur	Année de lancement (et de fin)	Résolution temporelle optimale (en jours)	Résolution spatiale au nadir (en mètres)	Fauchée (en kms)	Bandes
CBERS-4 PANMUX	2014-	26	5	60	Pan/R/V/B/PIR
DMC-3 A-B-C VHRI-100	2015-	1	1	23	Pan/R/V/B/PIR
FORMOSAT-2 RSI	2004-	3	2	24	Pan/R/V/B/PIR
GeoEye-1	2008-	4	0,41	15	Pan/R/V/B/PIR
IKONOS	1999-	3	0,82	11	Pan/R/V/B/PIR
KOMPSAT-2 MSC	2006-	3	1	15	Pan/R/V/B/PIR
Landsat 5 TM	1984-2011	16	30	185	Pan/R/V/B/PIR/SWIR
Landsat 7 ETM+ Landsat 8 OLI	1999- 2013-	16	15	185	Pan/R/V/B/PIR/SWIR
Pléiades 1 A-B HiRI	2011-, 2012-	1	0,7	20	Pan/R/V/B/PIR
Quickbird	2001-2015	7	0,61	16,5	Pan/R/V/B/PIR
Rapideye (5 sats) MSI	2008-	5	6,5	25	R/V/B/RE/PIR
Sentinel-1 A-B	2014-, 2016-	6	5	80	C-band SAR
Sentinel-2 A-B MSI	2014-, 2017-	5	10	290	Pan/R/V/B/RE/PIR/SWIR
SPOT-1-3 HRV	1986-2003, 1990-2009, 1993-1996	3	10	60	Pan/R/V/PIR
SPOT-4 HRVIR	1998-2013	3	10	60	Pan/R/V/PIR/MIR
SPOT-5 HRG	2002-2015	3	2,5	60	Pan/R/V/PIR/MIR
SPOT-6-7 NAOMI	2012-, 2014-	3	1,5	60	Pan/R/V/B/PIR
Terra MODIS	1999-	1	250	2230 km	R/V/B/PIR/SWIR
WorldView-1 WV60	2007-	3	0,5	17,6	Pan/R/V/B/PIR/SWIR
WorldView-2-3 WV110	2009-, 2014-	3	0,46	16,4	Pan/R/V/B/PIR

Apports et utilisations des images de télédétection

Caractéristiques des images

- 12 La télédétection ne permet pas de se dispenser des connaissances de terrain. Ces connaissances sont utiles, voire indispensables, pour interpréter correctement les éléments d'informations obtenus par l'image. Terrain et télédétection constituent donc deux approches complémentaires. La contribution de la télédétection est particulièrement utile :
- sur des zones éloignées : lorsque le site d'étude est difficile d'accès ou inaccessible à l'utilisateur au moment de l'analyse, la télédétection est alors un excellent moyen d'en appréhender les caractéristiques dans l'attente des validations in situ ;
 - sur des zones pauvres en données : la télédétection permet d'acquérir des informations sur l'environnement (p.ex. la description de l'occupation du sol, de la végétation), sur le climat ou sur les populations. Cet apport est d'autant plus précieux que ces informations sont parfois inexistantes. Beaucoup de pays n'ont pas de données géographiques de référence ou de cartographie précise des milieux, ni de réseaux denses de stations météorologiques. Dans ces contextes, la télédétection permet de pallier ce manque d'information au sol ;
 - pour l'observation de phénomènes avec une dynamique temporelle : l'acquisition de séries temporelles d'images satellite permet de suivre les dynamiques des processus environnementaux (p.ex. l'évolution d'un indice de végétation, de type NDVI - Normalized Difference Vegetation Index, permet de suivre la vigueur de la végétation). Les satellites à basse résolution spatiale proposent généralement une bonne répétitivité et permettent l'acquisition de séries temporelles sans ruptures. Ainsi les instruments MODIS, qui présentent une fréquence de revisite journalière associée à une résolution spatiale hectométrique, ont été très largement utilisés pour suivre les dynamiques environnementales ;
 - pour des comparaisons inter-sites : les analyses de télédétection peuvent être reproductibles en utilisant des images issues des mêmes capteurs et en leur appliquant les corrections géométriques et radiométriques. A la différence d'informations produites par des entités administratives distinctes (et en particulier de pays différents), les données de télédétection ne connaissent pas de frontière. Ainsi, pour des travaux de modélisation, comme la modélisation écologique des vecteurs d'une maladie, la communauté scientifique peut disposer de données d'entrées homogènes dans des zones transfrontalières, ou dans des pays distincts, afin de décrire les habitats potentiels de ces vecteurs.

Analyses et extractions d'informations spatialisées

- 13 Les principales informations spatialisées sont extraites à partir des analyses d'images menées manuellement, ou par des procédures semi-automatiques reposant sur des algorithmes paramétrés par le télédécteur. La photo-interprétation permet notamment le dénombrement d'objets, le calcul de distances, le calcul des coordonnées géographiques, la digitalisation de contours (comme les bâtiments ou des éléments du paysage). Le développement des algorithmes constitue des axes de recherche importants, et mobilise des communautés actives (p.ex. le Centre d'Expertises Scientifiques du pôle

THEIA - <https://www.theia-land.fr>). L'information spatiale est représentée sous forme de couches physiques ou thématiques :

- cartographie de l'occupation du sol : elle peut s'appuyer sur la radiométrie de l'image (classification par pixel) et l'utilisation d'indices supplémentaires (comme l'analyse des textures) ou sur la forme des objets après une étape de segmentation (classification orientée-objet). On parle de classification supervisée si le télédéacteur utilise des données d'apprentissage pour construire les règles de classification (machine learning) ;
 - suivi des changements de surface à l'aide de séries temporelles : p.ex. le suivi des cultures, la déforestation, l'urbanisation, la fragmentation des paysages ;
 - estimations des facteurs climatiques : p.ex. les températures de surface (LST - Land Surface Temperature, SST - Sea Surface Temperature) ou la pluviométrie à partir d'images des satellites météorologiques (p.ex. les données TRMM).
- 14 Ces méthodes d'analyse peuvent répondre à différentes applications dans le domaine de la santé mais elles seront réalisables par le choix des images appropriées (tableau 2).

Tableau 2 : Exemples de capteurs et possibilités d'applications dans le domaine de la santé

Résolutions		Exemple de capteurs (résolution en m)	Méthodes	Analyses	Applications
Spatiale	Temporelle				
+++	-	Pléiades HiRI (0,7) SPOT 6/7 NAOMI (1,5)	Photo- interprétation	Calcul de distances Identification d'objets Calcul des coordonnées géographiques	Identification de lieux précis (patient, lieu d'infection, lieu d'échantillonnage), Temps de parcours vers les soins
++	--	SPOT 5 HRG (2,5)	Occupation du sol, Indices de végétation	Classifications, Indices paysagers, Indices de végétation Surfaces en eau	Caractéristiques environnementales des vecteurs et/ou de leurs pathogènes modélisation des habitats
++	+	Sentinel-2 MSI (10) Landsat 7 ETM+ (15) Landsat 8 OLI (15)			
-	++	Terra MODIS (250-500)	Indices de végétation	NDVI	Suivis temporels d'indicateurs environnementaux des dynamiques épidémiologiques ou des vecteurs
--	+++	NOAA AVHRR (1090)	Indicateurs météorologiques	LST, SST	

+++ = Très haute --- Très basse

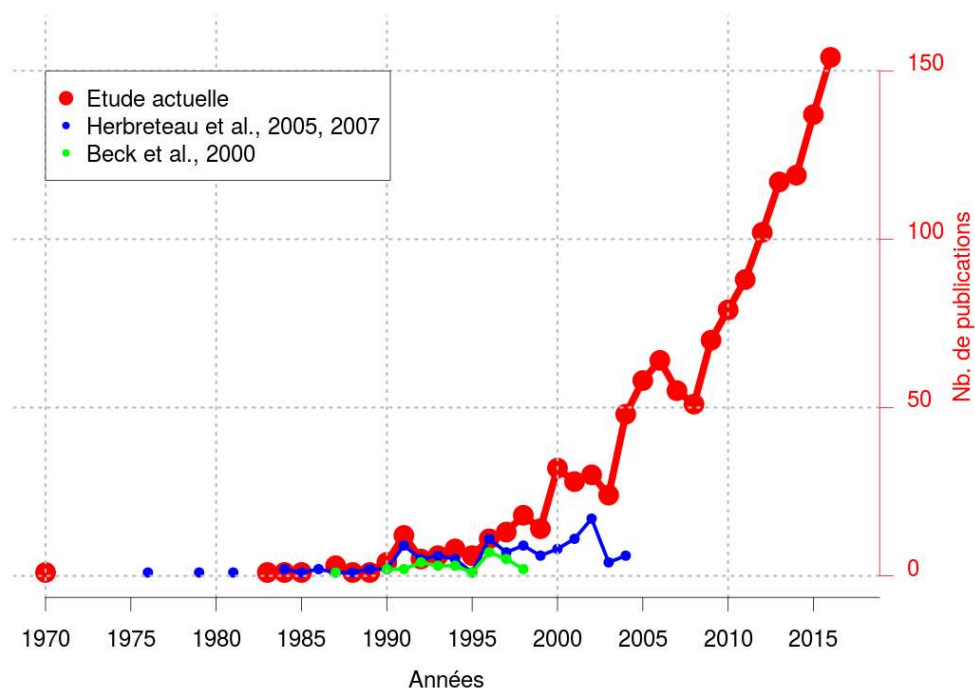
La télédétection et les questions de santé : contributions historiques et actuelles

Historique des usages de la télédétection dans le domaine de la santé

Tendance générale

- 15 L'utilisation d'informations issues des satellites d'observation a augmenté de façon quasi-exponentielle depuis le début des années 1970, comme en atteste le nombre de publications scientifiques référencées dans les principales bases de données bibliographiques. Ce constat provient d'une interrogation des bases de données de « l'Institute for Scientific Information (ISI) Web of Science® »¹ au moyen d'une requête effectuée sur l'abstract, les mots clés, et le titre avec l'expression régulière : « (remote sensing OR satellite data) AND (human health OR epidemiolog*) » (Figure 1).

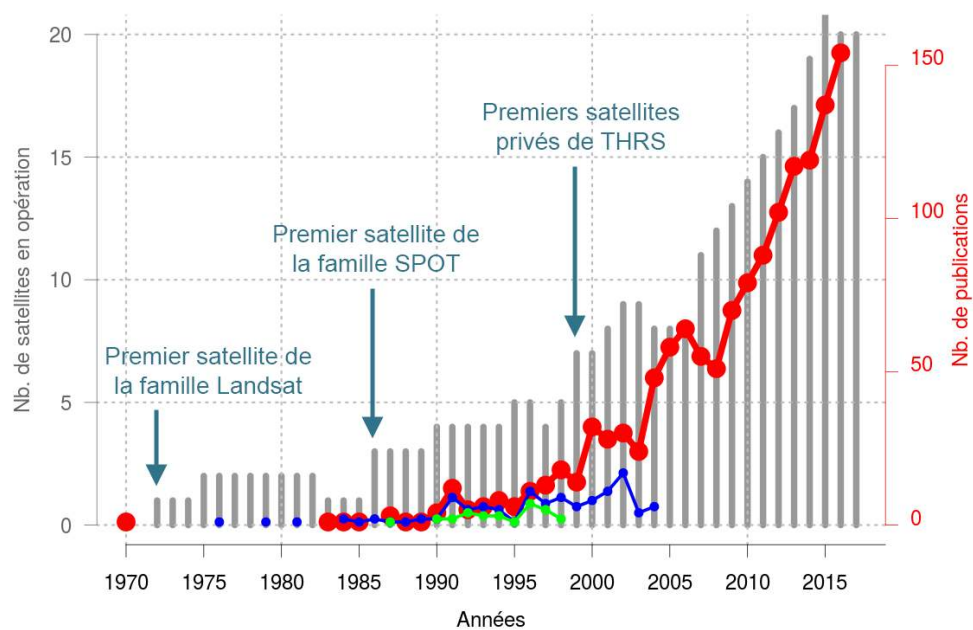
Figure 1 : En rouge, le nombre d'articles trouvés dans la base ISI Web of Science®, dont le résumé, le titre ou les mots clés contient l'expression régulière « (remote sensing OR satellite data) AND (human health OR epidemiolog*) ».



En bleu, le nombre d'articles identifiés dans la revue de littérature de (Herbreteau, 2005, Herbreteau, 2007). En vert, le nombre d'articles identifiés dans la revue de littérature de (Beck, 2000).

- 16 La dynamique globale de cette courbe (Figure 1) s'explique aisément par, notamment : un nombre croissant de satellites d'observation de la Terre en activité (Figure 2); une amélioration continue des performances des capteurs; le nombre croissant d'outils logiciels de plus en plus performants, gratuits voire libres. Dans les années 2000, certains opérateurs ont commencé à fournir des images gratuites. Ce fut le cas de l'Institut National de Recherche Spatiale (INPE : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) au Brésil dès 2004 puis de l'USGS (United States Geological Survey) qui a libéré les images du programme Landsat en 2008. L'accès gratuit à certaines images a sans aucun doute contribué à en augmenter considérablement les usages.

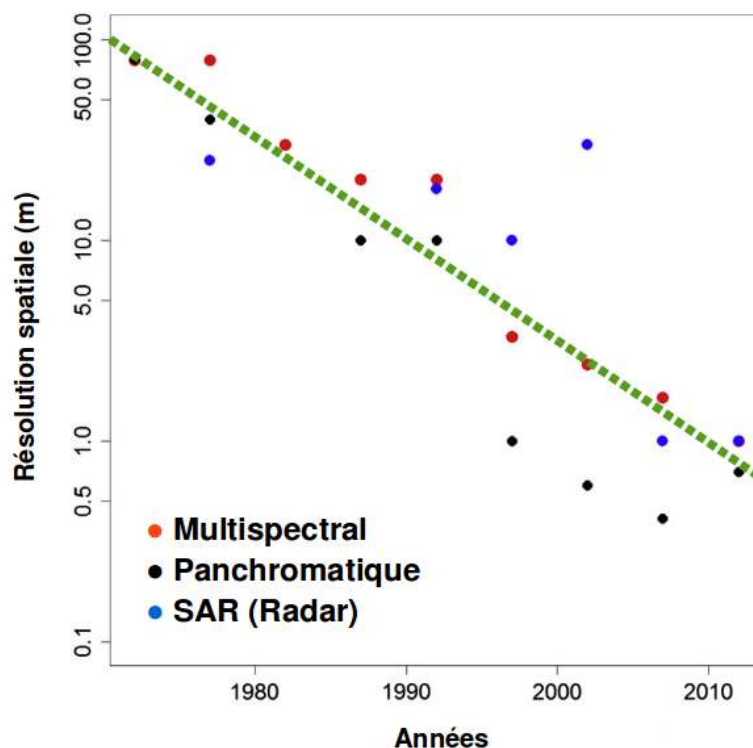
Figure 2 : Nombre de satellites d'observation de la Terre de moyenne et haute résolutions spatiales en opération



d'après Charrier, 2016.

- 17 Durant cette même période de 40 ans, de 1970 à 2010, la résolution spatiale des images acquises par les satellites d'observation de la Terre a été multipliée par 100 (Figure 3). Il est cependant à noter que la résolution spatiale n'est pas la seule caractéristique à avoir bénéficié d'améliorations significatives. La répétitivité temporelle, les résolutions spectrales et les largeurs des fauchées ont également augmenté (Tableau 1).

Figure 3 : Résolutions spatiales les plus élevées (en mètres) obtenues par des capteurs embarqués sur des satellites civils d'observation de la Terre à orbites polaires, par période de 5 ans



d'après Belward, 2015.

Grandes phases depuis les années 1970

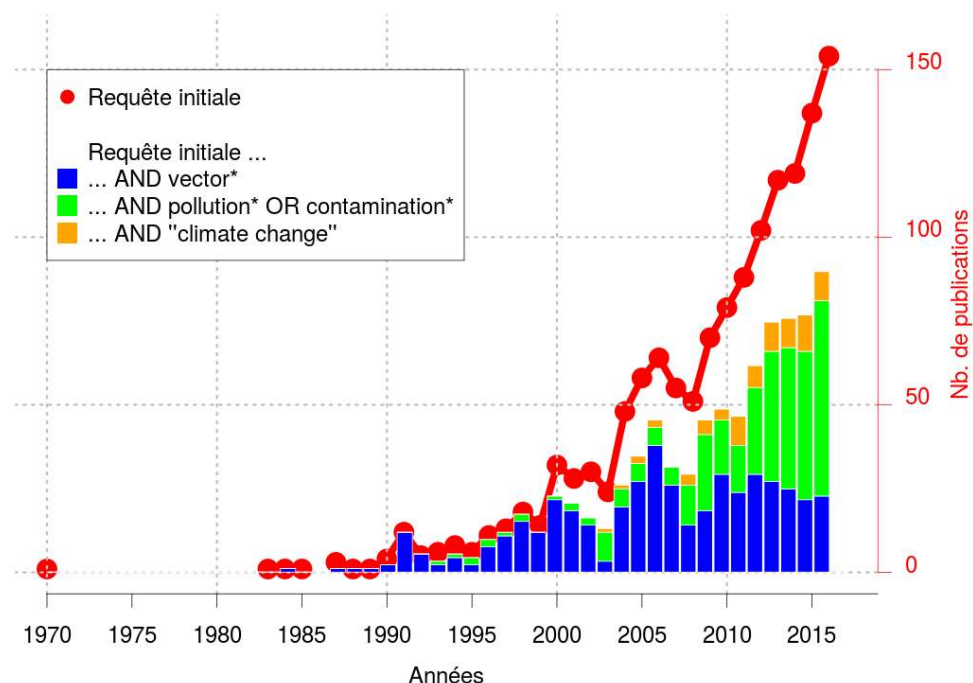
- 18 A notre connaissance, la première mention explicite de l'utilisation de la télédétection en santé apparaît en 1970 (Cline, 1970). L'auteur affirme que la télédétection peut apporter une plus-value significative aux études sur la santé, comme elle le fait dans d'autres domaines : « Perhaps epidemiologists will be able to exploit [the unique observation and data collection capabilities of the earth orbiting satellite] and other new sources of information about the surface of the earth to further our understanding of the distribution of human disease upon it. ». Il souligne en particulier que le concept de « landscape epidemiology », utilisé par Pavlovsky, semble « particularly well adapted to the suggestion that many of the factors which relate to the distribution of the zoonoses can be measured remotely ».
- 19 En 1971, l'agence spatiale américaine (National Aeronautics and Space Administration, NASA) crée en son sein le Bureau des Applications en Santé (Health Application Office, HAO), qui produira une centaine de rapports, parfois préliminaires, sur l'utilisation en santé des données de télédétection (Barnes, 1991). Ainsi, Arp et al. (Arp, 1976) décrivent une méthode de cartographie de la répartition d'un insecte parasite du bétail (la lucilie bouchère, *Cochliomyia hominivorax*) à partir d'un modèle de développement de l'espèce dont les paramètres environnementaux (température journalière moyenne de l'air et humidité des terres cultivées) sont estimés par télédétection. Les résultats ont contribué à l'éradication du parasite aux Etats-Unis (Arp, 1976, Barnes, 1991). En ce qui concerne la santé humaine, Giddings et Naumann (Giddings, 1976) décrivent en détail comment

différentes sources de données de télédétection (Landsat, satellites météorologiques, photographies prises à l'occasion de vols spatiaux habités) peuvent contribuer à cartographier les zones potentielles d'infestation par la mouche Tsé-Tsé, vecteur de la trypanosomiase africaine ou maladie du sommeil, en Tanzanie. Le bureau ferme cependant en 1976, la NASA estimant qu'elle n'a ni la vocation première ni le budget pour réaliser de telles études. L'agence spatiale américaine n'a pas réussi à convaincre et à impliquer les autres agences nationales ayant vocation à travailler sur la santé. Ces dernières privilégient d'autres priorités, et ne sont pas familières des outils de télédétection, et des outils informatiques et conceptuels qu'elle requiert. Certains succès n'ont pu être reproduits ou étendus en raison de la réticence de certains pays à voir des satellites acquérir des informations sur leur territoire. Il convient de souligner que les ressources matérielles et logicielles étaient relativement sommaires par rapport aux moyens d'aujourd'hui. La fin du HAO marque un coup d'arrêt, temporaire, aux applications de la télédétection à la santé. Toutefois, pratiquement toutes les applications potentielles avaient été mentionnées et certaines testées pendant la durée de son existence.

- 20 Les chercheurs ressentent le besoin de faire le point sur l'utilisation de la télédétection en santé à la fin des années 1990 et au début des années 2000, avec la publication des premières revues de littérature (Barnes, 1991, Beck, 2000). Beck (Beck, 2000) liste ainsi 28 études dans lesquelles la télédétection a été utilisée afin de fournir des informations sur trois grands domaines : la couverture végétale, la structure du paysage et les plans d'eau. Il produit également une longue liste d'applications potentielles, affirmant que l'amélioration de la disponibilité et des résolutions spatiale, spectrale et temporelle des produits de télédétection, associée à l'augmentation des capacités de traitement des SIG, devraient amener la télédétection, dans les cinq années suivantes à participer à la surveillance et au contrôle opérationnel des maladies. Les années 2000 ne donnent pas totalement raison à un tel optimisme.
- 21 Herbreteau et al. (2005, 2006) présentent ainsi un bilan en demi teinte des espoirs formulés par (Beck, 2000). Ils constatent notamment que :
- la haute résolution spatiale (<10 m) n'est utilisée que dans 10 % des études ;
 - l'imagerie multi-spectrale est rarement utilisée, et l'imagerie hyper-spectrale ne l'est jamais ;
 - l'imagerie RADAR n'est que rarement exploitée ;
 - l'indice de végétation NDVI est utilisé dans la moitié des cas, alors que des indices davantage adaptés à la problématique pourraient être construits ;
 - l'extrapolation et la régionalisation des résultats, facilitée par la télédétection, sont parfois réalisées sans que des données de terrain ne viennent valider les résultats ;
 - aucune étude n'adopte une démarche véritablement multiscalair.
- 22 Herbreteau et al. (2005, 2006) insistent sur la nécessité d'une meilleure compréhension et une meilleure maîtrise conjointe des méthodes de télédétection et d'épidémiologie. Les auteurs concluent que cette compréhension entre disciplines ne peut s'envisager qu'au moyen d'une collaboration étroite entre les deux communautés. Ces frustrations expliquent peut-être en partie la stagnation du nombre d'études utilisant la télédétection dans l'étude des maladies vectorielles (Figure 4). Parallèlement à ces observations, on assiste à une diversification des applications de la télédétection pour la santé à partir du milieu des années 2000. La figure 4 différencie les articles selon qu'ils citent les expressions régulières : vector*, pollution* OR contamination, climate change de manière

exclusive. Si le nombre de publications concernant les vecteurs semble stagner à partir de 2000, celui concernant l'exposition à des polluants augmente de façon significative, ainsi que l'association avec le thème changement climatique. Dans ces derniers, la santé n'est pas forcément l'application première, mais elle est citée comme l'une des conséquences du changement climatique. Bien qu'une étude plus poussée serait nécessaire à une différenciation plus complète des articles, la figure 4 montre tout de même une certaine diversification des applications de la télédétection à la santé.

Figure 4 : Nombre d'articles trouvés en affinant la requête initiale (« remote sensing OR satellite data AND human health OR epidemiolog* ») avec les expressions régulières : « AND vector* », AND « pollution* OR contamination* », AND « climate change » de manière exclusive.



Contributions actuelles de la télédétection dans les problématiques de la santé

Cartographies d'urgence et opérationnelles

- 23 Les catastrophes naturelles ont de lourdes conséquences sur le plan sanitaire. L'acquisition d'images satellite est devenue essentielle dans la gestion de certaines catastrophes et de leurs risques sanitaires associés : situations précaires, émergence de maladies, difficultés d'accès aux soins, etc. Elle permet d'établir une cartographie du terrain, d'identifier les populations atteintes ou exposées, et les accès pour les secours. Nous pouvons citer deux exemples majeurs de structuration autour de l'apport des images de télédétection à la gestion de crise :

- la Charte internationale Espace et catastrophes majeures (<https://www.disasterscharter.org>) qui est un accord international entre les agences spatiales pour pointer les satellites vers les sites touchés et fournir gratuitement et le plus rapidement possible une cartographie ciblée ;

- OpenStreetMap (OSM) (openstreetmap.org) qui est une base de données géographique participative, et dont la principale source de données est la photo-interprétation d'images satellite mises à disposition gratuitement. Certaines organisations, comme Humanitarian OpenStreetMap Team (HOT: hotosm.org) et l'ONG CartONG (cartong.org), se sont constituées pour coordonner des réponses face aux situations de crise en répartissant les tâches de digitalisation. Ces tâches sont effectuées de manière collaborative par des internautes du monde entier. Depuis quelques années, la cartographie via les outils proposés par HOTOSM (dont le Tasking Manager) est utilisée pour guider les actions de contrôle des maladies. Des cartographies régionalisées sont créées dans le cadre de programmes d'éradication du paludisme pour faciliter les actions de contrôle. Les figures 5 et 6 montrent l'apport de HOT à l'ONG Peace Corps Mozambique dans la cartographie de villages et de maisons avec comme finalité l'optimisation de la distribution de moustiquaires.

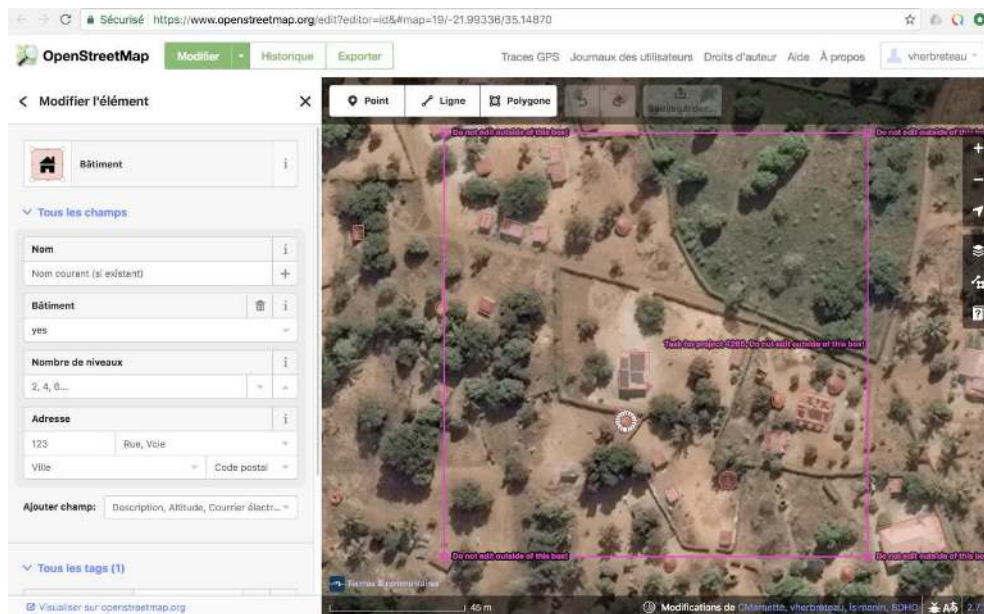
Figure 5 : Aperçu de la tâche 4265 du Tasking Manager de HOT pour la cartographie des villages et des maisons dans une région du Mozambique, en vue d'aider à la distribution de moustiquaires contre le paludisme

The screenshot shows the HOT Tasking Manager interface for task #4265. The browser address bar shows the URL <https://tasks.hotosm.org/project/4265#>. The page title is "#4265 - Pambarra, Mozambique - Vilankulo Bed Net Surveillance Program". The task is categorized as MEDIUM and has 0 active mappers. The description states: "Peace Corps Mozambique is requesting assistance in creating a basemap of all towns and cities within the district of Vilankulo, Inhambane Province. The finished maps will be used primarily as foundations for mapping mosquito net coverage within each town. Surveys regarding net coverage will be facilitated by local health workers through CommCare's smart phone-driven, paperless survey application. Follow-up distributions of bed nets will use the subsequent survey data and OSM basemap to inform their campaigns." The task details table is as follows:

Status:	PUBLISHED	Created by:	bgjirardot
Last updated:	2 minutes ago	Difficulty:	BEGINNER
Priority:	MEDIUM	Type(s) of mapping:	BUILDINGS
Organisation:	Peace Corps	Campaign:	Malaria Elimination
Mapper level required:	No	Validator role required:	No

The "Choose a task" section offers two options: "Option 1: Select a task by clicking on the map" and "Option 2: SELECT A RANDOM TASK". A map of the region is shown with a grid overlay. A legend indicates the status of tasks: Ready (white), Mapped (yellow), Bad imagery (grey), Validated (green), Invalidated (red), Locked (blue), and Locked by you (dark blue). A scale bar shows 1000 m.

Figure 6 : Aperçu de la cartographie des maisons par photo-interprétation dans un carré de la tâche 4265 de HOT.



Estimation des aléas et des vulnérabilités liés aux maladies vectorielles

- 24 Dans le domaine de la santé, les images satellite ont été le plus souvent utilisées pour décrire l'aléa de la transmission des maladies vectorielles, c'est-à-dire la présence de leurs vecteurs et/ou de leurs réservoirs et/ou de leurs agents pathogènes (Herbretreau, 2005). Les images apportent des informations qui ne concernent pas directement les vecteurs des agents pathogènes (p.ex. les moustiques, les tiques, les rongeurs, etc.), mais des indicateurs environnementaux des facteurs limitant leurs distributions (seuils d'altitude, climatiques, habitats potentiels) et des conditions favorables à leur présence (type de végétation, humidité, absence d'espèces prédatrices, etc.) ou favorables à leur développement et prolifération (comme des cumuls de pluies ou de températures).
- 25 Ces différentes approches sont aussi liées aux échelles d'étude. Les travaux sur la distribution des espèces vectrices se font généralement à des échelles mondiales ou régionales en utilisant des données à basse résolution spatiale, comme celles issues de Worldclim.org (Fick, 2017) ou des capteurs MODIS. Ainsi, plusieurs études ont récemment produit des prédictions des distributions des moustiques du genre *Aedes*, vecteurs de la Dengue, du Zika, Chikungunya et de la Fièvre jaune (Kraemer, 2015, Ducheyne, 2018).
- 26 A des échelles plus locales, les données de télédétection permettent de cartographier ou d'estimer des métriques comme la présence (et plus difficilement l'abondance) des agents pathogènes, de leurs vecteurs ou de leurs réservoirs en lien avec les caractéristiques environnementales. Ces caractéristiques sont liées aux conditions de maintien ou d'émergence de pathologies :
 - cartographies de la qualité d'habitat des espèces (vecteurs et/ou réservoirs) et de la dynamique spatio-temporelle de ces habitats (saisonniers notamment) ;
 - mise en relation entre caractéristiques environnementales et informations épidémiologiques (taux d'incidence), moyennant des connaissances ou, a minima, des hypothèses sur les lieux présumés de contamination ;

- mise en relation de dynamiques environnementales et sanitaires.

27 La télédétection permet de quantifier certains aspects de la vulnérabilité des populations aux aléas d'exposition :

- cartographie des voies de circulation pour l'estimation des temps de parcours pour l'accès aux soins. Ainsi, une étude récente à l'échelle mondiale a montré que 50,9 % des personnes vivant dans des milieux à faibles revenus (surtout en Afrique subsaharienne) habitent à moins d'une heure d'une ville, comparativement à 90,7 % des personnes vivant dans des milieux à revenus élevés (Weiss, 2018). Cette étude se base sur la cartographie des routes issue principalement d'OpenStreetMap. L'éloignement des villes se traduit par des difficultés d'accès à des soins de qualité mais aussi à une moins bonne connaissance de la survenue des maladies pour ces populations isolées (moins de recours aux soins et diagnostics rares). Lorsque les déplacements sont difficiles (réseau routier limité et en mauvais état), les conditions météorologiques conditionnent aussi les temps de parcours. Makanga et al. ont ainsi montré dans le sud du Mozambique que l'utilisation de données météorologiques issues des satellites permettait d'évaluer les difficultés de déplacement lors des saisons humides : si 46% des femmes enceintes vivent à moins d'une heure du centre de soins primaires le plus proche, elles ne sont plus que 9% en saison des pluies (Makanga, 2017).
- cartographie des inégalités socio-spatiales, des différences comportementales, au travers notamment de la caractérisation du bâti (composition et configuration spatiale). Peu de travaux ont été réalisés en ce sens et les usages restent à explorer. Les images à très haute résolution spatiale permettent aujourd'hui de cartographier plus précisément les petites habitations (avec des analyses orientées-objets ou des analyses de texture), ce qui est donc utilisé pour la cartographie des zones précaires comme les bidonvilles (Kuffer, 2016). De telles cartographies permettent ainsi de localiser les populations les plus vulnérables en matière de santé, en raison d'un accès aux soins réduit et de l'exposition à certaines maladies de la pauvreté (notamment liées aux problèmes d'assainissement). D'autres pistes de recherche sont envisagées comme Xie et al. qui ont montré que l'analyse nocturne de l'absence d'éclairage dans des zones habitées permettait de révéler la pauvreté (Xie, 2016).

Prédiction des périodes favorables à la transmission de maladies liées à l'environnement

- 28 Les indicateurs météorologiques (température de surface, pluviométrie, humidité ...) constituent des informations pertinentes pour le suivi dans l'espace et le temps de l'influence des facteurs météorologiques sur la distribution et la dynamique des espèces vectrices (Tran, 2010). Par exemple, les moustiques, vecteurs de nombreuses maladies humaines (p.ex. paludisme, dengue, Zika), animales ou zoonotiques (p.ex. fièvre de la Vallée du Rift, fièvre du Nil Occidental), sont particulièrement sensibles aux variations des températures et des précipitations (Gouagna, 2015). Une augmentation des températures peut engendrer un développement plus rapide des différents stades, et par voie de conséquence une élévation du taux de piqûres. Une augmentation des précipitations peut aussi favoriser la création de gîtes de ponte où les femelles moustiques vont déposer leurs œufs.
- 29 De nombreuses études ont ainsi montré des corrélations significatives entre de tels indicateurs des facteurs climatiques et le risque de transmission de maladies vectorielles, comme la fièvre de la Vallée du Rift (FVR), une zoonose causée par un phlébovirus et transmise par différentes espèces de moustique à l'homme, aux ruminants et aux camélidés. Au Kenya, les épidémies de FVR sont associées à des épisodes de fortes pluies

persistantes accompagnées d'inondations durables, qui causent une prolifération des moustiques vecteurs. Ces altérations climatiques sont quantifiables via des indicateurs dérivés d'images MODIS ou NOAA-AHRR (Linthicum, 1999, Anyamba, 2010). Ce type de données est caractérisé par une faible résolution spatiale, mais en revanche une largeur de la scène importante, permettant de cartographier des zones très vastes avec une forte répétitivité temporelle (Table 1). Le modèle développé par Anyamba et al. (2010) est basé sur la surveillance des anomalies des différences de températures dans les Océans Indien et Pacifique, caractéristiques du phénomène El Niño qui se traduit par de fortes précipitations en Afrique de l'Est, et des anomalies de l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI), qui permettent de localiser les zones propices à la prolifération des vecteurs. Ce modèle a permis le développement d'un système d'alerte pour la prévision des risques d'épidémies de FVR en Afrique de l'Est, avec une capacité d'anticipation d'environ 3 mois.

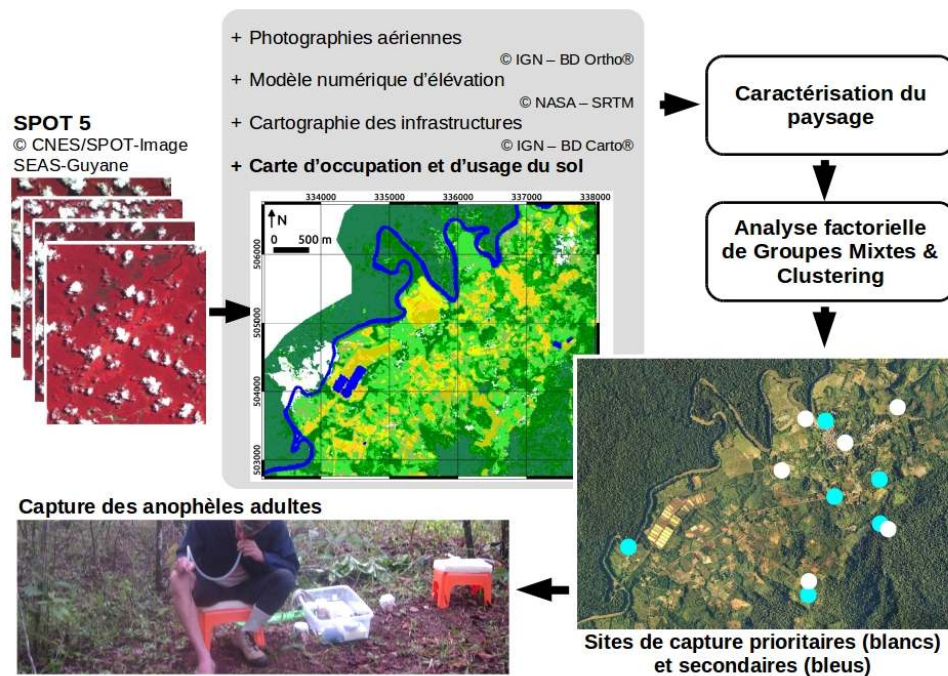
- 30 D'autres études ont démontré le potentiel de l'utilisation de données de télédétection pour d'autres maladies vectorielles (Tran, 2014) ou pour des maladies non vectorielles comme le choléra (Constantin de Magny, 2008).

Deux exemples d'apport de la télédétection dans les problématiques de la santé

Exemple 1 pour la planification d'une mission de terrain : Inventaire des espèces d'anophèles en Guyane française

- 31 Dans le cadre de la planification des études terrain dans le domaine de la santé humaine, les images satellite permettent de choisir selon des critères objectifs une zone d'étude, voire des sites d'échantillonnage précis (Roux, 2013). Ainsi, dans Roux et al. (2013), l'objectif était de réaliser l'inventaire des espèces d'anophèles (dont certaines sont vectrices du paludisme) dans une localité de Guyane française. Afin de réaliser un inventaire exhaustif, tout au moins d'assurer la capture d'un maximum d'espèces différentes aux habitats écologiques variés, les sites de capture devaient être situés dans des contextes écologiques représentatifs des écosystèmes de la zone d'étude et significativement différents les uns des autres. Une caractérisation environnementale de la zone d'étude a ainsi été réalisée en amont du terrain selon l'hydrographie, l'anthropisation, la topographie et l'occupation du sol.
- 32 Cette caractérisation thématique s'est appuyée sur diverses sources de données de télédétection : cartes et photographies aériennes de l'Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), modèle numérique d'élévation de la NASA (SRTM), images satellitaires SPOT-5 (Figure 7).

Figure 7 : Identification raisonnée de sites de capture d'anophèles en Guyane française à partir de différentes données de télédétection.



- 33 Une analyse des données multi-points de vue, ainsi qu'une catégorisation des différents contextes écologiques observés ont ensuite permis d'identifier et de caractériser six contextes à la fois significativement différents les uns des autres et typiques de la région : le village, les rives de la rivière Comté, les zones maraîchères de la plaine, les zones de jachères anciennes, les vergers sur les pentes et les hauteurs des collines et la forêt dense.
- 34 Les résultats des captures de moustiques réalisées sur le terrain ont confirmé la présence d'une grande diversité d'espèces d'anophèles (dix espèces capturées au total), dont le vecteur principal du paludisme en Amazonie (*Anopheles darlingi*) et cinq espèces vectrices secondaires. Ils démontrent également que, même à une échelle très locale, les espèces d'anophèles peuvent être structurées géographiquement et que l'occupation du sol, caractérisée par télédétection, contribue significativement à expliquer leur distribution.

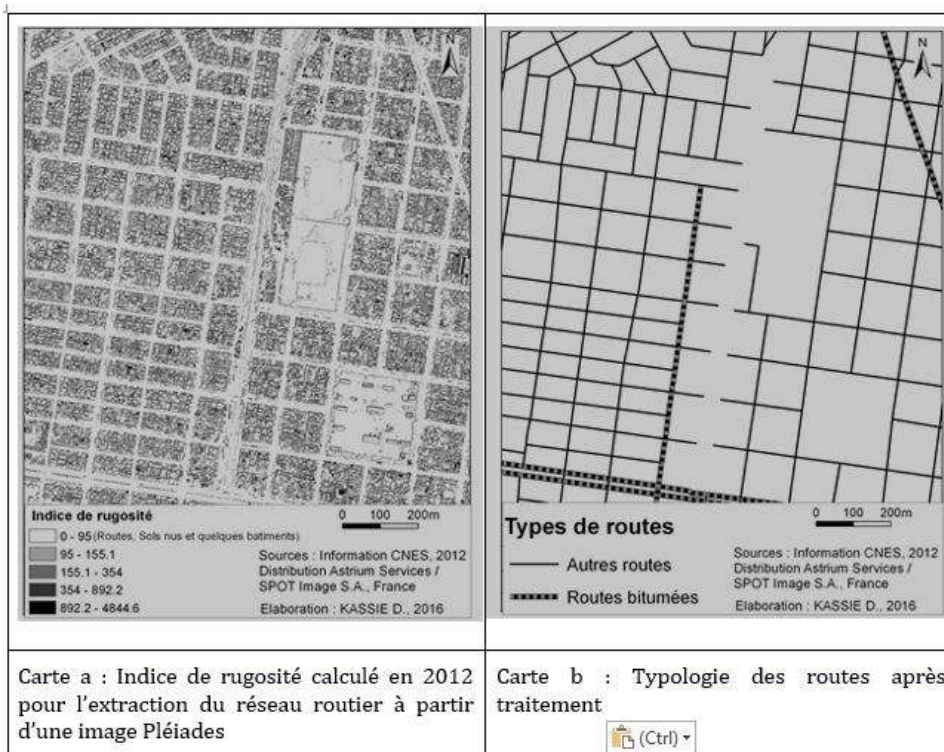
Exemple 2 pour les itinéraires de santé : création du réseau routier de la ville de Bobo-Dioulasso par calcul d'indice de rugosité de surface

- 35 L'état des voies de communication est un élément descriptif important de l'accessibilité des populations aux structures de soins. En effet, l'état des voies va conditionner l'usage de différents moyens de locomotion et déterminer les temps de déplacement. D'autre part, l'analyse des réseaux de transport sera aussi révélatrice du niveau de vie des populations et pourrait aider à décrire les quartiers.
- 36 La grande hétérogénéité des espaces urbains peut rendre complexe la classification des modes d'occupation du sol au sein de la ville. Dans ce type de contexte, la démarche méthodologique peut combiner plusieurs approches. Dans une ville du Sud comme Bobo-Dioulasso (Burkina Faso), où les données spatiales à des échelles fines sont rarement

disponibles, et où le suivi et l'entretien de la voirie ne sont pas toujours assurés, l'utilisation de la télédétection représente une bonne approche de cartographie. Dans un premier temps, l'environnement urbain a été appréhendé à partir d'images THRS : points d'eau, bâti, végétation, sols nus (sable, latérite), et voies bitumées. Le réseau routier de Bobo-Dioulasso est composé essentiellement de ces deux dernières catégories. Une image satellite Pléiades de 2012 (acquise via le programme ISIS du CNES, avec une résolution spatiale de 2,8 m en mode multispectral, et de 0,7 m ré-échantillonnée à 0,5 m en mode panchromatique) a été utilisée pour extraire les composantes du milieu urbain. Elle a permis de calculer un indice de rugosité de surface qui exprime la variation de la hauteur de la surface du sol à l'intérieur d'un site donné. Une structure grossière ou accidentée du sol se traduit par des aspérités importantes. Le plan parcellaire de la ville de Bobo-Dioulasso de 2012 a été obtenu auprès de l'Office National de l'Eau et de l'Assainissement de la ville, et a permis de corriger les résultats issus de l'extraction automatique du réseau routier.

- 37 Les valeurs de l'indice de rugosité dérivé de l'image Pléiades ont été regroupées par classes. Le réseau routier se distingue assez nettement pour des valeurs d'indices comprises entre 0 et 95. Ces valeurs s'expliquent par le fait que les routes présentent peu d'aspérités par rapport aux autres composantes de la ville à extraire. Les toits de certains bâtiments, ou les sols nus à l'intérieur des parcelles présentent cependant des valeurs d'indices assez similaires. Pour lever ce type de confusion, les résultats du traitement ont été croisés spatialement avec le parcellaire pour supprimer les entités situées à l'intérieur des lots de parcelles (sols nus et autres surfaces à l'intérieur des parcelles) et ne conserver que les routes. Dans les zones non loties où le parcellaire n'est pas encore cartographié, les routes ont été corrigées manuellement (Figure 8). Les valeurs d'indices permettent de distinguer les routes bitumées.

- 38 Figure 8 : Extraction du réseau routier dans la ville de Bobo-Dioulasso (Burkina Faso).



- 39 Combinée à une approche SIG, la télédétection permet dans cet exemple d'extraire de nombreuses informations spatialisées pour mieux comprendre la structuration de l'espace urbain en vue d'élaborer des politiques sanitaires (Programme de recherche Santinelles - Santé, Inégalités, Villes) (Kassie, 2015).

Conclusions sur les apports de la télédétection en santé

- 40 Depuis le lancement des premiers satellites d'observation de la Terre et les espoirs qu'ils ont suscités (Cline, 1970), le potentiel et les limites de l'utilisation de la télédétection pour des problématiques de santé ont été peu à peu explorés (Herbreteau, 2007). Nous avons identifié les grandes phases suivantes : (i) la fin des années 1960 où les principaux concepts et principes sont énoncés (ii) la démonstration de la faisabilité au début des années 1970 (iii) les premiers bilans et les grands espoirs entre la fin des années 1990 et le début des années 2000 (iv) les premières déceptions au milieu des années 2000 (v) la diversification des applications à partir de la fin des années 2000 (vi) la période actuelle où tous les éléments semblent réunis pour l'intégration effective et durable de la télédétection dans les pratiques des acteurs de la santé.
- 41 Le type d'application a également évolué avec l'amélioration des performances des capteurs, en termes de résolution spatiale notamment, depuis l'usage des données à faible résolution spatiale pour le suivi d'indicateurs météorologiques, jusqu'à l'utilisation d'images à très haute résolution spatiale pour une caractérisation très fine de l'habitat. Nous assistons aujourd'hui à un intérêt renouvelé pour les études à des échelles locales, qui coïncident avec la disponibilité récente d'images THRS (type Pléiades).
- 42 Plusieurs éléments tendent à montrer que l'étude des maladies vectorielles gagnerait à renouveler son intérêt pour la télédétection. Dans les contextes d'élimination d'une maladie (du paludisme notamment), ou de l'étude de maladies sévissant prioritairement en milieu urbain (notamment les arboviroses transmises par les moustiques du genre *Aedes*, comme la dengue, le chikungunya, ou le Zika). Cet intérêt se manifeste également dans la caractérisation des habitats par télédétection et la modélisation des distributions d'espèces. He et al. (2015) abondent dans ce sens dans leur article intitulé « Will remote sensing shape the next generation of species distribution models ? » (He, 2015).

Limites

- 43 L'utilisation des techniques de télédétection en géographie de la santé est intrinsèquement une approche indirecte : elles permettent de détecter et de cartographier des conditions environnementales en lien avec la transmission des maladies, mais pas directement les agents pathogènes ou leurs éventuels réservoirs ou vecteurs. Il s'agit d'identifier les liens successifs entre image, environnement et santé (Curran, 2000), ce qui se traduit souvent par l'utilisation d'indicateurs (« proxys ») des observations de santé issus de l'analyse des images. La construction de ces indicateurs nécessite encore des efforts de recherche importants afin qu'ils puissent être spécifiques des maladies, des vecteurs, de certains lieux ou encore de dynamiques (comme des indicateurs du démarrage des épidémies). Beaucoup d'études se sont basées sur des indices génériques (p.ex. NDVI, SST) qui ont montré satisfaction dans des analyses

statistiques, alors que des indices auraient pu être construits plus spécifiquement aux objets d'étude par des télédéTECTEURS. En effet, les modèles épidémiologiques liant conditions environnementales observables par télédéTECTION et variables épidémiologiques ne sont pas génériques, et ne peuvent être appliqués tels quels dans d'autres zones géographiques. Ceci est également vrai pour l'application à d'autres pathologies, même dans le cas de cycles épidémiologiques proches. Ainsi, le modèle développé pour la fièvre de la Vallée du Rift en Afrique de l'Est ne « fonctionne » pas en Afrique de l'Ouest ou à Madagascar, où d'autres mécanismes sont en jeu (Ndione, 2003, Anyamba, 2010).

- 44 Parmi les limites techniques, on peut citer le compromis inévitable en télédéTECTION entre la résolution spatiale et la fauchée, qui rend difficile des travaux de caractérisation fine du paysage sur de grandes surfaces (Provencher, 2007), ainsi que les problèmes liés aux conditions de prise de vue des images (réflexion spéculaire causée par le reflet solaire sur une surface lisse ou brillante, masses nuageuses et leur ombrage) qui peuvent modifier l'apparence des objets au sol. L'exploitation des images de télédéTECTION requiert donc la mise en œuvre de méthodes de traitement d'images qui peuvent être complexes et demander une certaine technicité. Enfin, les contraintes liées aux coûts d'acquisition de certaines images à très haute résolution spatiale et de certains logiciels de traitement d'images limitent aussi malheureusement l'utilisation des outils de la géomatique en santé.
- 45 Enfin, la télédéTECTION reste un outil limité pour appréhender les pratiques humaines et les comportements qui sont pourtant fondamentaux pour expliquer les inégalités de santé. Nous avons évoqué l'apport possible pour caractériser la présence humaine (comme la cartographie et la typologie des réseaux routiers ou des habitats) et des éléments de vulnérabilité (comme les inégalités d'accès aux soins ou des inégalités liées aux conditions de vie). Le constat est tout de même que très peu de travaux ont été réalisés en ce sens.

Recommandations

- 46 La maîtrise des techniques et le temps nécessaire pour traiter les données d'observation de la Terre afin d'en extraire une information utile peuvent créer des réticences chez les potentiels utilisateurs. Ainsi, ces outils ne sont pas toujours utilisés au mieux de leurs possibilités, et si l'analyse spatiale et la cartographie appliquée sont connues depuis longtemps, leur utilisation en santé publique est longtemps restée limitée (Bénié, 2000). Pour lever ces verrous, la formation des utilisateurs paraît indispensable si l'on veut construire une réelle interdisciplinarité. De telles formations sont de plus en plus demandées, au même titre que les formations aux SIG.
- 47 Par ailleurs, il est important de continuer à faciliter l'accès aux produits satellites, notamment THRS, pour la communauté scientifique et les acteurs de la santé publique. Ceci passe par la création d'infrastructures de données spatiales (IDS), c'est-à-dire des portails internet qui facilitent l'identification et l'accès à des données de télédéTECTION (p.ex. le portail du Group on Earth Observation - GEOSS- (<http://www.geoportal.org/>), le projet français EQUIPEX-GEOSUD pour des images THRS (<http://ids.equipex-geosud.fr/>) ou la datathèque sur le climat de l'International Research Institute for Climate and Society of Columbia University (<http://iridl.ldeo.columbia.edu>) ou des portails spécifiques au domaine de la santé (p.ex. E3 Geoportal (<https://>

e3geoportal.ecdc.europa.eu) ou l'Observatoire Climat et Santé au Brésil (<https://climaesaude.icict.fiocruz.br/>). Dans une perspective plus large, c'est un accès facilité aux données géographiques qui se développe aujourd'hui avec plusieurs portails offrant de grandes ressources en données spatiales, comme le Global Health Data Exchange (<http://ghdx.healthdata.org>), le Demographic and Health Survey (<https://www.dhsprogram.com/Data/>), The Humanitarian Data Exchange (<https://data.humdata.org>) ou encore Health Sites (<http://healthsites.io>), qui recense mondialement les structures de soins. L'accessibilité aux données spatiales, et de télédétection en particulier, doit aussi être facilitée en s'intégrant aux logiciels d'analyse. Nous pouvons citer comme exemple l'extension « Semi-Automatic Classification Plugin » de QGIS (<https://qgis.org/>) qui permet de télécharger et de traiter directement des images Landsat et Sentinel. Toutefois, beaucoup reste à faire, notamment avec le logiciel R (<https://cran.r-project.org/>) de plus en plus utilisé pour les analyses spatiales, comme un SIG, mais pour lequel peu d'outils sont dédiés à la télédétection. Les approches d'analyse d'images développées sur R relèvent plutôt de la fouille de données, comme c'est le cas avec les classifications par forêts aléatoires (« random forest »).

- 48 Les recherches méthodologiques doivent encore être poursuivies pour diversifier et spécifier les indicateurs de santé construits à partir des images. Par exemple, si les données d'observation de la Terre permettent aujourd'hui de détecter et de cartographier les surfaces d'eau libre et les zones inondées, il n'existe pas de méthode opérationnelle pour caractériser des propriétés de l'eau telles que la salinité, le pH, ou la turbidité, alors que ces propriétés conditionnent la survie de certains agents pathogènes dans l'environnement comme les bactéries leptospires (Andre-Fontaine, 2015) ou les virus aviaires (Tran, 2010). Un recours plus systématique à l'imagerie RADAR, encore aujourd'hui sous-exploitée dans les études sur la santé, permettrait de pallier les limites de la télédétection optique avec des acquisitions insensibles aux conditions atmosphériques, ce qui est particulièrement nécessaire dans les zones tropicales, très nuageuses. La combinaison des approches RADAR et optique doit permettre de diversifier significativement les types d'informations recueillies. Un autre article de ce dossier thématique reprend ce point plus en détail pour préciser l'apport de la télédétection optique et radar pour l'étude de maladies vectorielles (Catry et al., dans ce volume). Enfin, un défi reste d'orienter l'analyse des images vers la compréhension des comportements et des pratiques humaines, et nous pouvons espérer que l'amélioration des résolutions spatiales et temporelles y contribuera.
- 49 Les liens entre la santé, le milieu physique et les comportements humains sont complexes et se situent à différentes échelles spatiales et temporelles. La recherche de solutions mettant l'accent sur les multiples interactions nécessite des collaborations interdisciplinaires et multisectorielles afin de générer des discussions entre les spécialistes de télédétection et de santé (Bénié, 2000). Ces collaborations permettent d'associer des connaissances de terrain, d'écologie des vecteurs, d'épidémiologie des agents pathogènes, ainsi que des connaissances de télédétection et de géographie. La mise en réseau de la communauté scientifique et des acteurs de la santé autour des questions liées à l'utilisation de la télédétection constitue ainsi une étape essentielle au développement de cette thématique.

Perspectives

- 50 L'un des enjeux aujourd'hui pour « transformer l'essai » est de pouvoir intégrer de manière opérationnelle dans les systèmes de surveillance sanitaire et d'alerte des indicateurs dérivés d'images de télédétection. Leur pertinence a été démontrée comme indicateurs de risque de transmission d'une maladie ou de survenue d'épidémies, et pour le paludisme en particulier (Girond, 2017, Merkord, 2017). Cette intégration nécessite de pouvoir automatiser l'acquisition des images, leur traitement et la génération de ces indicateurs, pour une mise à disposition en temps réel auprès des utilisateurs. D'autre part, comme pour tous les domaines d'application de la télédétection, de nombreuses perspectives sont ouvertes par les développements techniques sur les capteurs (LIDAR, imagerie hyperspectrale, incrémentation des résolutions spatiale, temporelle, spectrale ...). De nouvelles plateformes aéroportées de type drone sont disponibles, à bas coût. Par exemple, le couplage entre des données de télédétection et le suivi par télémétrie de la mobilité des animaux semble très prometteur pour mieux comprendre les interfaces homme - animal domestique et sauvage (Cappelle, 2011). Enfin, l'assimilation des données issues de la télédétection dans les modèles épidémiologiques devrait être facilitée par les développements méthodologiques et informatiques en modélisation spatiale. Si les SIG ont été longtemps l'outil de référence pour analyser les données spatialisées, de nouveaux langages et environnements de programmation sont désormais disponibles (p.ex. Ocelet). Ceux-ci permettent de prendre en compte l'augmentation du volume des données (Big Data) et d'intégrer les données environnementales issues de la télédétection dans les modèles dynamiques (Degenne, 2009, Maneerat, 2016).
- 51 Nous tenons à remercier le CNES qui soutient activement les recherches en télédétection appliquée à la santé à travers le financement de différents projets dont les projets TéléPAL (TOSCA CNES 2015-2017), APUREZA (TOSCA CNES 2017-2019) et Sentinel-2 Malaria (TOSCA CNES 2017-2019).

BIBLIOGRAFIA

Andre-Fontaine, G., Aviat, F., Thorin, C. "Waterborne Leptospirosis: Survival and Preservation of the Virulence of Pathogenic *Leptospira* spp. in Fresh Water." *Curr Microbiol* 71(1), p. 136-142, 2015.

Anyamba, A., Linthicum, K. J., Small, J., Britch, S. C., Pak, E., de La Rocque, S., Formenty, P., Hightower, A. W., Breiman, R. F., Chretien, J. P., Tucker, C. J., Schnabel, D., Sang, R., Haagsma, K., Latham, M., Lewandowski, H. B., Magdi, S. O., Mohamed, M. A., Nguku, P. M., Reynes, J. M., Swanepoel, R. "Prediction, assessment of the Rift Valley fever activity in East and Southern Africa 2006-2008 and possible vector control strategies." *Am J Trop Med Hyg* 83(2 Suppl), p. 43-51, 2010.

Arp, G., Forsberg, F., Giddings, L., Phinney, D. System development of the Screwworm Eradication Data System (SEDS) algorithm: 86, 1976.

- Barnes, C. M. "An historical perspective on the applications of remote sensing to public health." *Preventive Veterinary Medicine* 11(3), p. 163-166, 1991.
- Beck, L. R., Lobitz, B. M., Wood, B. L. "Remote sensing and human health: new sensors and new opportunities." *Emerging Infectious Diseases* 6(3), p. 217-226, 2000.
- Belward, A. S., Skoien, J. O. "Who launched what, when and why; trends in global land-cover observation capacity from civilian earth observation satellites." *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 103, p. 115-128, 2015.
- Bénié, G. B., Muller-Poitevien, C., Hieu, H. N. La géomatique de la santé: tendances actuelles. In : *Festival International de Géographie*. France: Saint-Dié. 2000.
- Campbell, J. B., Wynne, R. H. *Introduction to remote sensing*, Guilford Press, 662 p., 2000.
- Cappelle, J., Gaidet, N., Iverson, S. A., Takekawa, J. Y., Newman, S. H., Fofana, B., Gilbert, M. "Characterizing the interface between wild ducks and poultry to evaluate the potential of transmission of avian pathogens." *International Journal of Health Geographics* 10, 2011.
- Charrier, B., ed., Torre, C., ed., Bégué, A., Leroux, L., Lo Seen, D., Tonneau, J.-P., Morant, P. *Observation spatiale pour l'agriculture en Afrique: potentiels et défis*. Paris, France, AFD, 182 p. 2016.
- Cline, B. L. "New eyes for epidemiologists: aerial photography and other remote sensing techniques." *Am J Epidemiol* 92(2), p. 85-89, 1970.
- Constantin de Magny, G., Murtugudde, R., Sapiano, M. R., Nizam, A., Brown, C. W., Busalacchi, A. J., Yunus, M., Nair, G. B., Gil, A. I., Lanata, C. F., Calkins, J., Manna, B., Rajendran, K., Bhattacharya, M. K., Huq, A., Sack, R. B., Colwell, R. R. "Environmental signatures associated with cholera epidemics." *Proc Natl Acad Sci U S A* 105(46), p. 17676-17681, 2008.
- Curran, P. J., Atkinson, P. M., Foody, G. M., Milton, E. J. "Linking remote sensing, land cover and disease." *Adv Parasitol* 47, p. 37-80, 2000.
- Degenne, P., Lo Seen, D., Parigot, D., Forax, R., Tran, A., Lahcen, A. A., Cure, O., Jeansoulin, R. "Design of a Domain Specific Language for modelling processes in landscapes." *Ecological Modelling* 220(24), p. 3527-3535, 2009.
- Ducheyne, E., Tran Minh, N. N., Haddad, N., Bryssinckx, W., Buliva, E., Simard, F., Malik, M. R., Charlier, J., De Waele, V., Mahmoud, O., Mukhtar, M., Bouattour, A., Hussain, A., Hendrickx, G., Roiz, D. "Current and future distribution of *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) in WHO Eastern Mediterranean Region." *Int J Health Geogr* 17(1): 4, 2018.
- Fick, S. E., Hijmans, R. J. "WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas." *International Journal of Climatology* 37(12), p. 4302-4315, 2017.
- Giddings, L. *Remote sensing for control of tsetse flies*, NASA, 37 p., 1976.
- Girard, M.-C., Girard, C. M. *Traitement des données de télédétection*. Dunod, 553 p., 2010.
- Girond, F., Randrianasolo, L., Randriamampionona, L., Rakotomanana, F., Randrianariveolosia, M., Ratsitorahina, M., Brou, T. Y., Herbreteau, V., Mangeas, M., Zigiumugabe, S., Hedje, J., Rogier, C., Piola, P. "Analysing trends and forecasting malaria epidemics in Madagascar using a sentinel surveillance network: a web-based application." *Malaria Journal* 16(1): 72, 2017.
- Gouagna, L. C., Dehecq, J. S., Fontenille, D., Dumont, Y., Boyer, S. "Seasonal variation in size estimates of *Aedes albopictus* population based on standard mark-release-recapture experiments in an urban area on Reunion Island." *Acta Tropica* 143, p. 89-96, 2015.

- He, K. S., Bradley, B. A., Cord, A. F., Rocchini, D., Tuanmu, M. N., Schmidtlein, S., Turner, W., Wegmann, M., Pettorelli, N. "Will remote sensing shape the next generation of species distribution models?" *Remote Sensing in Ecology and Conservation* 1(1), p. 4-18, 2015.
- Herbreteau, V., Salem, G., Souris, M., Hugot, J.-P., Gonzalez, J.-P. "Sizing up human health through Remote Sensing: uses and misuses." *Parassitologia* 47(1), p. 63-79, 2005.
- Herbreteau, V., Salem, G., Souris, M., Hugot, J.-P., Gonzalez, J.-P. "Thirty years of use and improvement of remote sensing, applied to epidemiology: From early promises to lasting frustration." *Health & Place* 13(2): 400-403, 2007.
- Kassie, D. Segmentations urbaines et disparités de santé dans une ville moyenne africaine : du paludisme aux états nutritionnels à Bobo-Dioulasso (Burkina Faso). Thèse de doctorat : Géographie de la santé Thèse, Université Paris Ouest Nanterre La Défense, 2015.
- Kraemer, M. U., Sinka, M. E., Duda, K. A., Mylne, A. Q., Shearer, F. M., Barker, C. M., Moore, C. G., Carvalho, R. G., Coelho, G. E., Van Bortel, W., Hendrickx, G., Schaffner, F., Elyazar, I. R., Teng, H. J., Brady, O. J., Messina, J. P., Pigott, D. M., Scott, T. W., Smith, D. L., Wint, G. R., Golding, N., Hay, S. I. "The global distribution of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Ae. albopictus*." *Elife* 4: e08347, 2015.
- Kuffer, M., Pfeffer, K., Sliuzas, R. "Slums from Space—15 Years of Slum Mapping Using Remote Sensing." *Remote Sensing* 8(6): 455, 2016.
- Linthicum, K., Anyamba, A., Tucker, C., Kelley, P., Myers, M., Peters, C. "Climate and satellite indicators to forecast Rift Valley fever epidemics in Kenya." *Science* 285, p. 397 – 400, 1999.
- Makanga, P. T., Schuurman, N., Sacoor, C., Boene, H. E., Vilanculo, F., Vidler, M., Magee, L., von Dadelszen, P., Sevene, E., Mungambe, K., Firoy, T. "Seasonal variation in geographical access to maternal health services in regions of southern Mozambique." *Int J Health Geogr* 16(1): 1, 2017.
- Maneerat, S., Daude, E. "A spatial agent-based simulation model of the dengue vector *Aedes aegypti* to explore its population dynamics in urban areas." *Ecological Modelling* 333, p. 66-78, 2016.
- Merkord, C. L., Liu, Y., Mihretie, A., Gebrehiwot, T., Awoke, W., Bayabil, E., Henebry, G. M., Kassa, G. T., Lake, M., Wimberly, M. C. "Integrating malaria surveillance with climate data for outbreak detection and forecasting: the EPIDEMIA system." *Malar J* 16(1): 89, 2017.
- Ndione, J.-A., Besancenot, J. P., Lacaux, J. P., Sabatier, P. "Environnement et épidémiologie de la fièvre de la vallée du Rift (FVR) dans le bassin inférieur du fleuve Sénégal." *Environnement, Risques & Santé* 2(3), p. 176-182, 2003.
- Provencher, L., Collet, C., Dubois, J.-M. M. Précis de télédétection. Volume 4, Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image, Presses de l'Université du Québec, 2007.
- Roux, E., Gaborit, P., Romaña, C. A., Girod, R., Dessay, N., Dusfour, I. "Objective sampling design in a highly heterogeneous landscape—characterizing environmental determinants of malaria vector distribution in French Guiana, in the Amazonian region." *BMC ecology* 13(1): 45, 2013.
- Tran, A., Goutard, F., Chamaillé, L., Baghdadi, N., Lo Seen, D. "Remote sensing and avian influenza: A review of image processing methods for extracting key variables affecting avian influenza virus survival in water from Earth Observation satellites." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12(1), p. 1-8, 2010.
- Tran, A., Sudre, B., Paz, S., Rossi, M., Desbrosse, A., Chevalier, V., Semenza, J. C. "Environmental predictors of West Nile fever risk in Europe." *Int J Health Geogr* 13, 26, 2014.

Weiss, D. J., Nelson, A., Gibson, H. S., Temperley, W., Peedell, S., Lieber, A., Hancher, M., Poyart, E., Belchior, S., Fullman, N., Mappin, B., Dalrymple, U., Rozier, J., Lucas, T. C. D., Howes, R. E., Tusting, L. S., Kang, S. Y., Cameron, E., Bisanzio, D., Battle, K. E., Bhatt, S., Gething, P. W. "A global map of travel time to cities to assess inequalities in accessibility in 2015." *Nature*, 2018.

Xie, M., Jean, N., Burke, M., Lobell, D., Ermon, S. Transfer learning from deep features for remote sensing and poverty mapping. *Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. Phoenix, Arizona, AAAI Press, p. 3929-3935, 2016.

NOTAS

1. En date du 29 août 2017

RESUMOS

Ao fornecer uma visão ampla dos territórios, as imagens de sensoriamento remoto orbital e fotografias aéreas permitem analisar os fatores ambientais que podem condicionar a saúde das populações. Desde o surgimento do sensoriamento remoto orbital na década de 1970, seu uso no campo da saúde teve um sucesso moderado. Embora seu potencial tenha sido amplamente mencionado na literatura até a década de 2000, sua contribuição operacional era óbvia. Apenas recentemente as aplicações em saúde foram enriquecidas e multiplicadas pelo desenvolvimento de abordagens interdisciplinares. Este artigo tem como objetivo questionar os usos do sensoriamento remoto aplicados às questões de saúde, de acordo com os aspectos técnicos, históricos e temáticos, a fim de identificar os seus gargalos. Primeiramente propõe uma visão didática dos princípios teóricos, dados disponíveis e possíveis usos. Através de um estudo bibliográfico, oferece uma retrospectiva da evolução de sua implementação no campo da saúde, permitindo sintetizar as contribuições atuais: para o mapeamento operacional, para a vigilância e a análise da dinâmica de doenças infecciosas ou, em menor grau, para compreender as vulnerabilidades das populações, tais como as dificuldades de acesso aos serviços de saúde. Por fim, o artigo conclui sobre os limites, as recomendações e as perspectivas para otimizar esses usos, que muitas vezes são limitados por questões técnicas e estruturais e para as quais as metodologias ainda precisam ser desenvolvidas.

En prenant de la hauteur et en offrant une vue élargie des territoires, les images satellite et les photographies aériennes permettent d'appréhender les facteurs environnementaux qui peuvent conditionner la santé des populations. Depuis l'essor de la télédétection satellite à partir des années 1970, son usage dans le domaine de la santé a connu des succès modérés. Si son potentiel a été largement évoqué dans la littérature jusqu'aux années 2000, son apport opérationnel ne s'est pas imposé. Ce n'est que récemment que les applications en santé se sont enrichies et multipliées par le développement d'approches interdisciplinaires. Cet article vise à questionner les usages de la télédétection appliquée aux questions de santé selon les aspects techniques, historiques, et thématiques afin d'identifier les verrous. Il propose tout d'abord une vue didactique des principes théoriques, des données disponibles et des usages possibles. A travers une étude bibliographique, il offre un regard rétrospectif sur l'évolution de sa mise en œuvre

dans le domaine la santé, qui permet de synthétiser les contributions actuelles : pour la cartographie opérationnelle, pour la surveillance et l'analyse des dynamiques des maladies infectieuses ou, dans une moindre de mesure, pour appréhender les vulnérabilités des populations comme les difficultés d'accès aux soins. Enfin, l'article conclut sur les limites, les recommandations et les perspectives pour optimiser ces usages dont les verrous sont souvent techniques et structurels mais pour lesquels des méthodologies doivent encore être développées.

By providing a wide view of territories, satellite images and aerial photographs allow to capture the environmental factors that can affect the health of populations. Since the development of satellite remote sensing in the 1970s, its use in the health field has had moderate success. Although its potential was widely mentioned in the literature until the 2000s, its operational contribution was not obvious. It is only recently that health applications have been enriched and multiplied by the development of interdisciplinary approaches. This article aims to question the uses of remote sensing applied to health issues according to technical, historical, and thematic aspects in order to identify the bottlenecks. First, it offers a didactic view of theoretical principles, available data and possible uses. Through a bibliographic study, it offers a retrospective look at the evolution of its implementation in the field of health, which allows synthesizing current contributions: for operational mapping, for surveillance and analysis of the dynamics of infectious diseases or, to a lesser extent, to apprehend the vulnerabilities of populations such as difficulties in accessing healthcare. Finally, the article concludes on the limits, recommendations and perspectives for optimizing these uses, which are often constrained by technical and structural issues and for which methodologies still need to be developed.

ÍNDICE

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Saúde, Satélite, Mundo

Keywords: Remote sensing, health, satellite, World

Mots-clés: Télédétection, santé, satellite, Monde

AUTORES

VINCENT HERBRETEAU

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), Station SEAS-OI, Saint-Pierre, La Réunion, France, vincent.herbretEAU@ird.fr

DAOUDA KASSIÉ

Cirad, UMR ASTRE, Antananarivo, Madagascar, daouda.kassie@cirad.fr

EMMANUEL ROUX

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), France, emmanuel.roux@ird.fr

RENAUD MARTI

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), France, renaud.marti@gmail.com

THIBAUT CATRY

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), France, thibault.catry@ird.fr

ARTADJI ATTOUMANE

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), Station SEAS-OI, Saint-Pierre, La Réunion, France, attoumane.artadji@ird.fr

CHRISTOPHE RÉVILLION

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), Station SEAS-OI, Saint-Pierre, La Réunion, France, christophe.revillion@univ-reunion.fr

JÉRÉMY COMMINS

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), Station SEAS-OI, Saint-Pierre, La Réunion, France, jeremy.commins@ird.fr

NADINE DESSAY

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), France, nadine.dessay@ird.fr

MORGAN MANGEAS

IRD, UMR 228 ESPACE-DEV (IRD/UM/UR/UG/UA), France, morgan.mangeas@ird.fr

ANNELISE TRAN

Cirad, UMR TETIS, UMR ASTRE, Sainte-Clotilde, La Réunion, France, annelise.tran@cirad.fr