

L'OBSERVATION DE LA TERRE, À LA PORTÉE DE TOUS

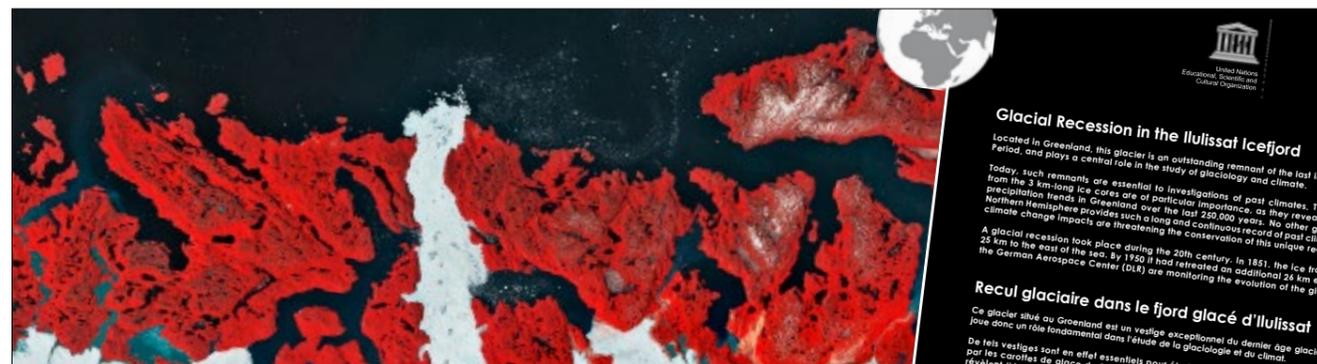
Depuis le lancement du premier satellite d'observation de la Terre il y a plus de 40 ans, la télédétection s'est petit à petit imposée comme une source irremplaçable d'information sur notre planète, ses continents, ses océans et son atmosphère.

L'imagerie satellitaire alimente la recherche scientifique mais aussi le développement technologique et industriel. Elle constitue un outil fondamental d'évaluation et d'alerte, par exemple sur la vulnérabilité de certains écosystèmes et sur les déséquilibres liés ou non aux changements climatiques (déforestation, dégradation des océans, désertification, fonte des glaces...). Elle est aussi à la base du développement d'innombrables applications dans des contextes de plus en plus courants, à l'instar de Google Earth qui a trouvé sa place dans notre vie de tous les jours.

Les images délivrées par les satellites civils ont atteint une précision sans précédent avec un niveau de détail descendu sous les 50 centimètres de résolution.

La couverture temporelle progresse également : des acquisitions toujours plus fréquentes permettent un suivi quasi continu des écosystèmes et des ressources terrestres aux échelles locale, régionale et globale.

Les données archivées ont atteint des volumes considérables qui permettent de mieux appréhender les évolutions passées et d'affiner les modèles de prédiction des évolutions futures. La variété des plates-formes d'observation (du satellite au drone) et des instruments embarqués (imageurs optique, radar, LiDAR, hyperspectral...) multiplie les types de paramètres enregistrés et met à disposition une palette d'informations qui peuvent être combinées pour répondre à une multitude de problématiques. Enfin, grâce à une offre plus large, le prix des images se démocratise. De plus en plus d'images sont même disponibles gratuitement dans un mouvement qui tend à rendre l'observation de la Terre accessible au plus grand nombre : scientifiques, décideurs politiques, entreprises, citoyens...



PETIT PAYS, GRANDES AMBITIONS

Sur la scène internationale, la Belgique se positionne comme un foyer de connaissance en matière d'observation de la Terre. La Politique scientifique fédérale (Belspo) y soutient en effet une chaîne d'excellence, depuis un haut niveau de recherche fondamentale et une ingénierie de pointe en traitement et en interprétation d'images, jusqu'au développement d'applications opérationnelles pour un nombre toujours plus grand d'utilisateurs finaux. Citons quelques repères importants :

- Dès 1984, la Belgique a mis en place son propre programme national de recherche en observation de la Terre. Grâce à une continuité entre les différentes phases du programme (Telsat puis STEREO I, II et III), le pays a, depuis 30 ans, édifié un réseau unique de compétences dans le domaine.

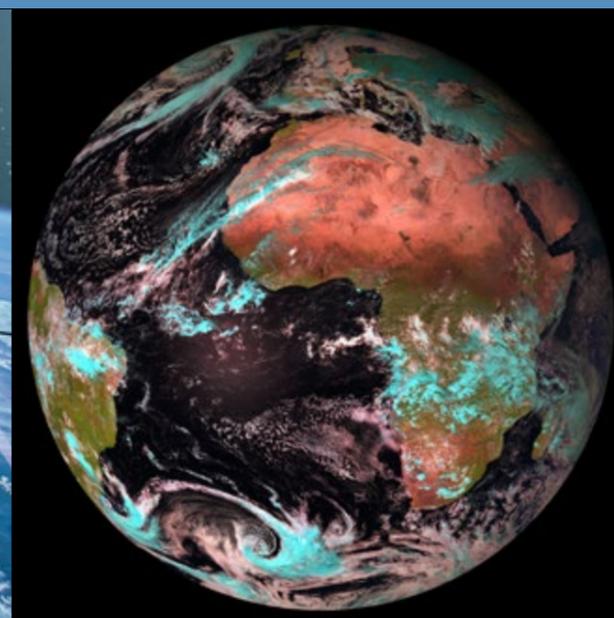
- Notre pays est un membre contributeur éminent – le 5^e en importance – de l'ESA (Agence spatiale européenne). Il supporte les activités des organisations intergouvernementales ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) et EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) en matière de prévision météorologique et climatique et de surveillance environnementale. Nous participons également activement au réseau scientifique EARSel (European Association of Remote Sensing Laboratories).

- Nous sommes à l'initiative de projets conséquents réalisés au sein de l'ESA, tels que la conception des satellites flexibles et innovants de la famille PROBA dont le dernier en date, PROBA-V, lancé en 2013, est destiné au suivi global de la végétation.

- La Politique scientifique fédérale coopère également avec l'Unesco au travers de projets qui exploitent l'imagerie satellitaire pour améliorer la surveillance et la gestion de sites inscrits au Patrimoine mondial.

- La Belgique maintient des collaborations bilatérales, notamment avec la France et participe au programme Pléiades, une constellation de nouvelle génération qui fournit des données à très haute résolution (voir page 33).

L'ensemble de ces initiatives s'inscrivent dans le cadre des priorités du programme européen Copernicus d'observation de la Terre pour l'environnement et la sécurité.

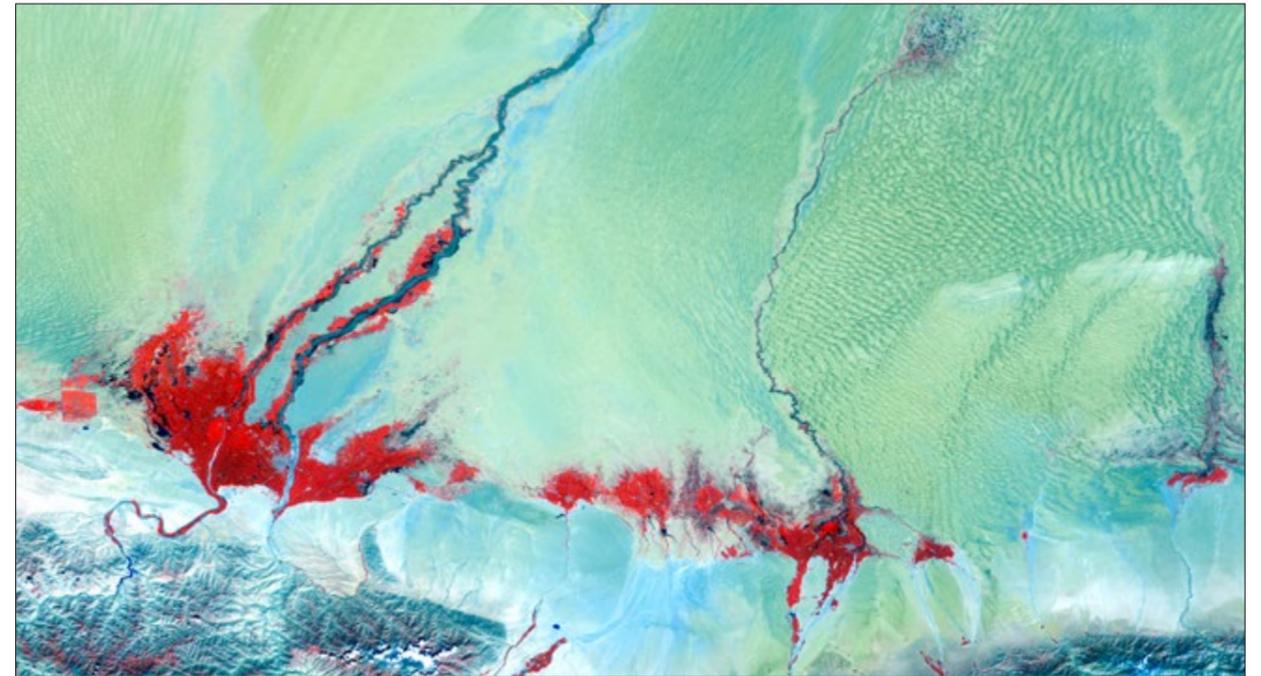




NOUVELLES TENDANCES EN OBSERVATION DE LA TERRE

- Bénéficiant des progrès de la miniaturisation, les satellites n'ont cessé de perdre du poids et du volume. Plus faciles à fabriquer en série et moins coûteux à propulser en orbite, les micro- (entre 10 et 500 kg), nano- (entre 1 et 10 kg) et même pico-satellites (moins de 1 kg) sont devenus tout à fait courants.
- Les observations à partir d'avions ou de drones télécommandés se multiplient et permettent une plus grande flexibilité en termes de capteurs embarqués et de programmation de prises de vues.
- De plus en plus de "petits" pays se dotent de leur(s) propre(s) satellite(s) d'observation, ciblé(s) sur leurs zones et leurs paramètres d'intérêt.
- Que ce soit au niveau national ou international, les initiatives facilitant l'accès systématique aux données satellitaires, du local au global, se multiplient. Ainsi, le programme Copernicus piloté par la Commission européenne offre un accès gratuit aux données des satellites Sentinel, dont le premier a été lancé par l'ESA en 2014. Cette politique vise à stimuler l'utilisation des données satellitaires pour faire émerger un éventail aussi large que possible d'applications opérationnelles.

La prochaine phase du programme, STEREO III (2014-2021), s'inscrit dans ces nouvelles tendances. À côté de l'appui à une recherche scientifique de pointe, STEREO III valorisera encore plus les résultats des recherches, notamment afin d'en faire bénéficier le plus grand nombre (administrations, secteur privé, monde académique...).



PROBA-V, POUR UN SUIVI GLOBAL DE LA VÉGÉTATION

Lancé par l'ESA en 2013, le satellite PROBA-V est le résultat d'une impulsion et d'un développement 100 % belges. De petite taille (140 kg pour moins d'1 m³), il a pour mission principale l'observation en continu de l'état de la végétation à l'échelle globale. À son bord se trouve une version améliorée du capteur VEGETATION, qui était présent sur les satellites SPOT-4 et SPOT-5. Ce nouveau capteur délivre quotidiennement des images à 1 kilomètre de résolution, en continuité avec les anciennes données, mais également des images plus précises à 300 mètres de résolution. Depuis mars 2015, PROBA-V distribue même tous les 5 jours une couverture complète de la Terre à 100 mètres de résolution. Il opère dans les bandes spectrales idéales pour distinguer les types de couvert végétal, les diverses variétés, les niveaux de croissance des plantes cultivées ou leur état sanitaire.

Disponibles depuis 1998, les images VEGETATION couvrent chaque jour l'entièreté de la surface terrestre. Elles ont prouvé leur utilité dans de multiples applications et services opérationnels, tels que la surveillance de la production agricole, la prévision des crises alimentaires, le suivi de la désertification et des ressources en eau, la détection des feux de forêt, etc. Le satellite a été conçu et développé grâce à l'expertise belge dans le domaine des petits satellites flexibles. Le traitement, la production, la distribution et l'archivage de ses données sont également assurés par des équipes belges. La Belgique se positionne donc désormais comme un acteur déterminant dans la production et la distribution de données globales répondant aux besoins spécifiques de milliers d'utilisateurs à travers le monde.

Plus d'info sur proba-v.vgt.vito.be



STEREO II RENFORCE L'EXPERTISE BELGE EN OBSERVATION DE LA TERRE

Programme de recherche d'envergure, STEREO II (2006-2014) consolide les capacités belges accumulées depuis 30 ans dans le domaine de l'observation de la Terre tout en élargissant sa dimension internationale. Le programme finance principalement deux grands types de projets : les recherches scientifiques fondamentales et thématiques, et celles visant l'adaptation et le transfert de résultats scientifiques en applications pré-opérationnelles par des équipes scientifiques à destination d'administrations, sociétés privées ou ONG (Unesco, WWF, FAO...).

En favorisant la multidisciplinarité et les synergies avec des centres de recherche issus de tous les horizons, le programme permet notamment aux chercheurs de participer à des initiatives élaborées au niveau bilatéral, européen ou mondial. Cet ancrage international est d'ailleurs défini dans le protocole du programme et s'inscrit à chaque étape du suivi des recherches.

DES PROJETS PASSÉS AU TAMIS

Sur la durée du programme, six appels à projets ont été lancés. Après un premier test de réponse aux critères définis dans l'appel, chaque proposition est systématiquement évaluée en deux phases (une écrite et une orale) par des

experts étrangers spécialisés dans le domaine d'étude. Une fois sélectionné, chaque projet est annuellement supervisé par un Comité de pilotage composé d'experts internationaux qui évaluent les travaux déjà réalisés et fournissent des recommandations pour la suite du projet. Au total plus de 60 projets ont ainsi été conduits dans le cadre de STEREO II.

OBJECTIFS ATTEINTS

Les projets ont été menés par environ 300 chercheurs et chercheuses répartis au sein de 87 équipes, dont 36 étrangères. Les principaux objectifs du programme ont été atteints :

- plusieurs équipes belges sont devenues parties prenantes de vastes programmes internationaux ;
- en encourageant les travaux de thèse et les laboratoires nouvellement créés, STEREO II a ouvert des opportunités pour de nombreux jeunes scientifiques ;
- l'utilisation des données d'observation de la Terre a été intégrée dans différentes disciplines (biologie, hydrologie, épidémiologie, océanographie...), ouvrant la voie à l'exploitation de données satellitaires au sein d'une très grande diversité d'applications.

Au vu des résultats engrangés et d'une évaluation externe très positive de STEREO II, une nouvelle phase du programme a été adoptée (STEREO III 2014-2020).

DES RÉSULTATS HAUTEMENT VALORISÉS

La valorisation des résultats des projets financés est une deuxième grande composante du programme STEREO II. Les enjeux de la recherche sont relayés vers le grand public par l'intermédiaire du Earth Observation Helpdesk (EODesk). Celui-ci joue également un rôle d'interface entre les distributeurs de données et les utilisateurs belges, en assistant ces derniers pour l'acquisition d'images. L'EODesk achète en outre les images nécessaires à la réalisation de tout projet financé par Belspo.



QUATRE AXES PRIORITAIRES DE RECHERCHE

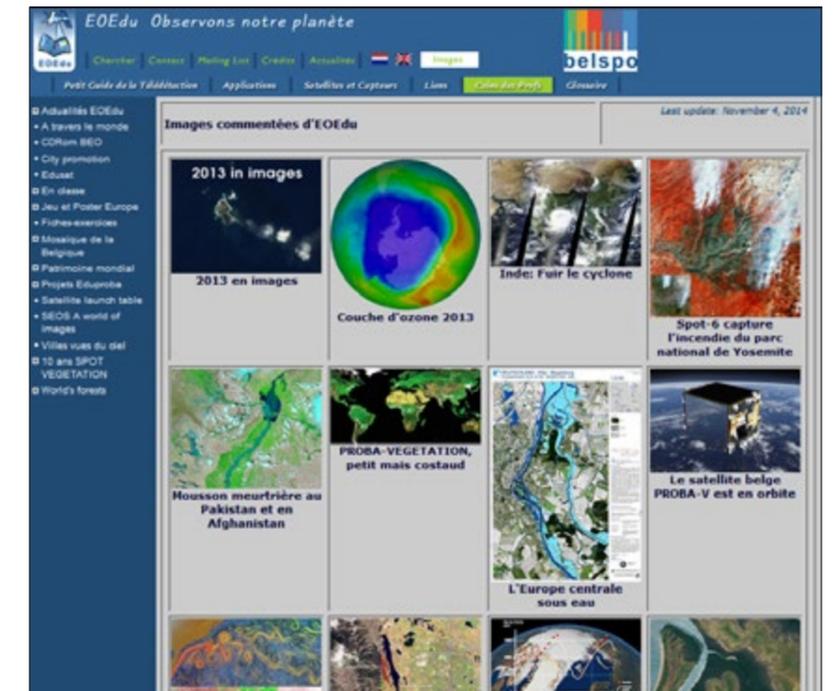
Le programme STEREO II met l'accent sur quatre thématiques majeures :

- Surveillance globale de la végétation et évolution des écosystèmes terrestres
- Gestion environnementale locale et régionale (eaux, sols, forêts et biodiversité, agriculture, régions côtières, zones urbaines et péri-urbaines, cartographie)
- Santé et aide humanitaire
- Sécurité et Gestion des risques

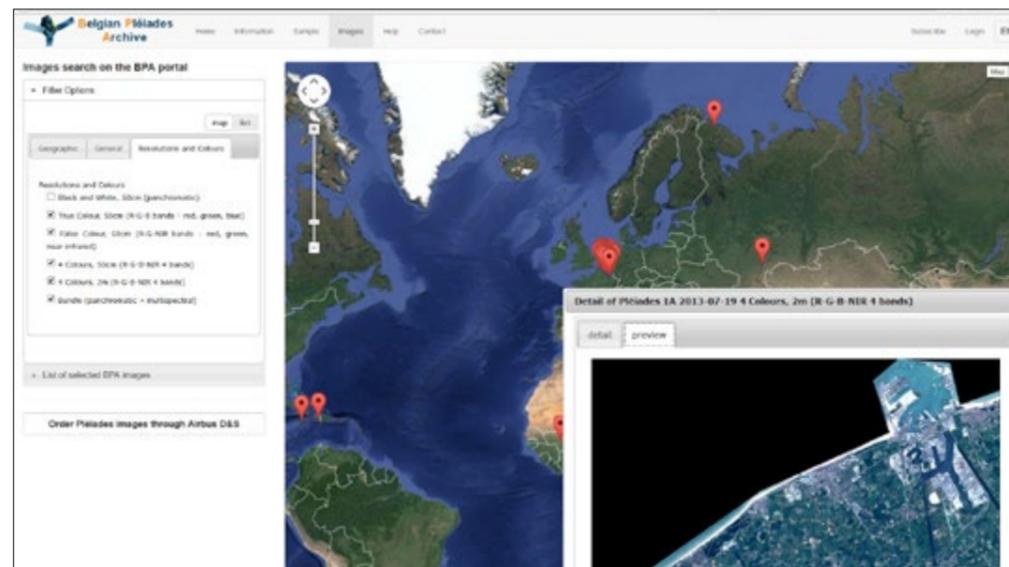
En particulier, le portail *Belgian Pleiades Archive* (pleiades.belspo.be) ouvre l'accès à des images Pléiades à très haute résolution, notamment une couverture complète de la Belgique, aux utilisateurs institutionnels belges désireux de les exploiter dans le cadre de leurs missions de service public, et ce gratuitement ou à des tarifs préférentiels.

Le site eo.belspo.be, d'ailleurs intitulé *Belgian Earth Observation Platform*, est une plate-forme d'échange d'informations ciblées sur l'observation de la Terre pour la communauté scientifique belge et internationale. Le site *EOEdu* (eodu.belspo.be), quant à lui, offre au grand public l'accès à une information plus didactique sur la télédétection. Il est également la vitrine des projets menés dans le cadre du programme, ainsi que des initiatives éducatives développées (images commentées, e-learning, posters thématiques, expositions...).

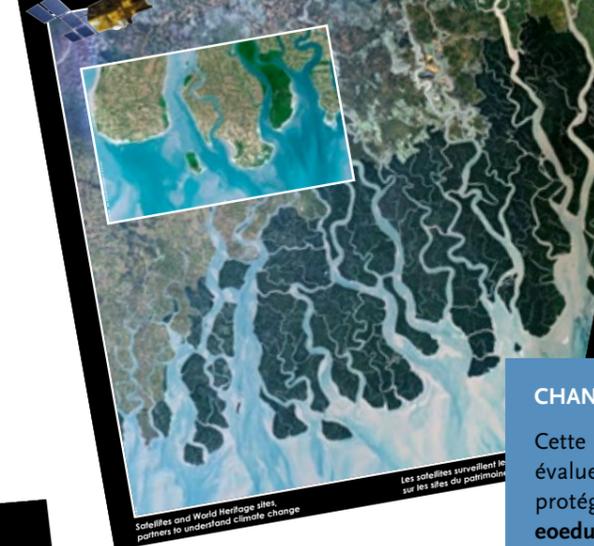
Chaque année une grande journée belge de l'observation de la Terre (Belgian Earth Observation Day) est organisée dans le cadre du programme. Elle permet aux équipes STEREO de présenter l'avancement de leurs travaux et offre aux différents acteurs du spatial une opportunité de se rencontrer.



STEREO II explore une très large palette d'applications terrestres et marines. Les projets, bien que par nature multidisciplinaires, ont dans cette brochure été regroupés en une dizaine de thématiques pour en faciliter la lecture. Vous trouverez en page 90 l'index des projets, ainsi que la liste des coordinateurs et promoteurs.



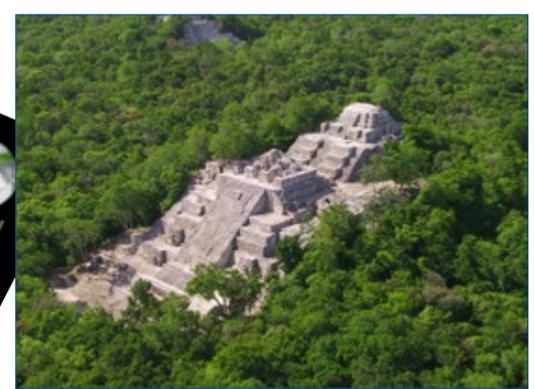
VALORISATION DES PROJETS ET PROMOTION DE LA TÉLÉDÉTECTION



CHANGEMENTS CLIMATIQUES, PATRIMOINE MONDIAL ET SATELLITES
 Cette exposition illustre comment l'observation de la Terre peut servir à évaluer les effets du réchauffement climatique sur des sites remarquables protégés par l'Unesco.
eodu.belspo.be/unesco



IMAGING THE WORLD'S FORESTS
 Exposition itinérante qui démontre l'utilité de l'imagerie satellitaire pour la préservation des forêts du monde, en mettant en évidence les évolutions les plus marquantes : déforestation et reforestation, feux de savanes et de forêts, mangroves menacées, etc.
eodu.belspo.be/forests



CALAKMUL
 Les forêts tropicales humides entourant l'immense site maya de Calakmul (Mexique) ont été reconnues comme patrimoine naturel, ce qui confère à Calakmul le titre rare de "patrimoine mondial mixte culturel et naturel". Cette reconnaissance a été obtenue grâce à l'utilisation d'un Système d'Information Géographique sophistiqué spécifiquement dédié au patrimoine mondial et mis au point par un consortium belge dirigé par GIM, une société basée à Louvain.



SIDSAT
 Le projet SIDSAT attire l'attention sur les petits États insulaires en développement qui sont souvent à l'avant-poste des bouleversements dus aux changements climatiques. Des images satellitaires multitemporelles, accessibles sur un site internet, mettent en lumière la dégradation de leur environnement.
sidsat.ugent.be



10 YEARS OF IMAGING THE EARTH
 Une série de 7 posters représentent la Terre entière et les continents grâce à une mosaïque de 10 ans d'images journalières prises par l'instrument VEGETATION. Un site internet dédié développe également cinq thématiques importantes pour chaque continent.
eodu.belspo.be/vgt10



SEOS
 SEOS (Science Education through Earth Observation for High Schools) est un projet européen visant une meilleure intégration de la Télédétection dans les programmes d'enseignement scientifiques du second degré du secondaire. 15 modules d'apprentissage ont été développés et sont disponibles en plusieurs langues sur le site internet du projet. Le module 'Le monde en images', développé par l'EODesk, est une invitation visuelle à découvrir l'ensemble du projet.
seos-project.eu/modules

DES IMAGES FACE AUX CATASTROPHES



Cet article se base sur les projets de recherche

GORISK
Vi-X
HYDRASENS
FLOODMOIST
RIMS
SPRINT

Que ce soit avant, pendant ou après une catastrophe naturelle ou anthropique, les images satellitaires sont utiles : elles permettent en effet de modéliser le risque, de disposer rapidement d'une information pour gérer la crise, d'évaluer les dégâts et de soutenir la reconstruction.

L'augmentation de la fréquence et surtout de l'incidence des catastrophes naturelles est devenue un problème majeur. On constate en effet une nette progression du nombre de catastrophes liées à des événements météorologiques (tempêtes, cyclones...), hydrologiques (inondations, glissements de terrain, avalanches...) et climatiques (vagues de chaleur et de grand froid, sécheresses, feux de forêts...). Pour une centaine d'événements recensés en 1980, on en compte plus du double en 2013. Si l'on ajoute les événements de nature géophysique comme les séismes et les éruptions volcaniques, ce sont ainsi 210 millions de personnes qui sont en moyenne affectées chaque année par les catastrophes naturelles. Grâce à des systèmes d'alerte plus performants et une mobilisation plus efficace, ces catastrophes font cependant de moins en moins de tués, même si la densité de population augmente, notamment dans les zones vulnérables, comme les littoraux.

Le volcan Nyiragongo représente un danger permanent pour Goma située à seulement 15 km. En 2002, une éruption a détruit 10 % de la ville.



Dans ces zones de plus en plus construites et de plus en plus habitées, les catastrophes frappent non seulement les personnes mais aussi leurs moyens de subsistance, leurs infrastructures et leur environnement. On constate d'ailleurs une augmentation importante des pertes économiques liées aux catastrophes d'origine naturelle ou humaine (marée noire, accident technologique...). Pour l'année 2013, elles sont ainsi estimées à pas moins de 130 milliards de dollars.

Les images satellitaires sont irremplaçables pour le suivi de ces catastrophes. Leur précision, leur récurrence et l'étendue des zones couvertes en font des outils décisifs d'aide à la gestion de

crise. Elles constituent même parfois les seules sources d'information disponibles dans les zones dévastées. Ces avantages indéniables ont d'ailleurs mené à la fondation de la "Charte internationale Espace et Catastrophes majeures". La Charte rassemble des agences et organisations spatiales du monde entier. Celles-ci s'engagent à fournir en priorité l'information nécessaire aux autorités en charge de gérer une catastrophe (voir encadré page 18).

Si les ressources satellitaires sont indispensables en situations d'urgence, elles sont également très précieuses en amont et en aval des crises.



Station GPS dans le village de Kibumba, avec à gauche, le Nyiragongo (stratovolcan) et à l'arrière-plan à droite le Nyamulagira (volcan-bouclier).

Différents projets de recherche ont étudié comment améliorer, grâce à la télédétection, chacune des étapes de la gestion des catastrophes :

- l'atténuation du risque en identifiant les points de vulnérabilité ;
- une prévision plus aigüe en affinant les modèles de prédiction et les processus d'alerte ;
- une organisation des secours et des dispositifs de reconstruction plus efficaces qui s'appuient sur une information précise et immédiate.

DEUX VOLCANS SOUS HAUTE SURVEILLANCE

Dans l'est de la République démocratique du Congo, Goma, la capitale du Nord Kivu, est nichée à 1500 mètres d'altitude, entre la rive nord du lac Kivu et le volcan Nyiragongo. Cette ville à la frontière du Rwanda a vu sa population doubler en moins de cinq ans pour atteindre aujourd'hui près d'un million d'habitants, parmi lesquels un grand nombre sont confinés dans des camps de réfugiés.

Menaçant, le Nyiragongo et son lac de lave permanent dominant la ville. Le volcan présente une activité importante et continue depuis la dernière éruption, le 17 janvier 2002. Des coulées de lave avaient alors recouvert un dixième de la ville en l'espace de quelques heures seulement. Connue comme le plus gros producteur de dioxyde de soufre au monde, son panache de gaz qui s'échappe en continu du cratère principal dégage jusqu'à 50 000 tonnes de SO₂ par jour, ce qui engendre une pollution et des problèmes de santé importants dans la

région. Situé à 15 kilomètres au nord-ouest du Nyiragongo, le Nyamulagira entre en éruption tous les deux à quatre ans. À chacun de ces événements, ses coulées de lave envahissent le Parc national des Virunga qui s'étend en contrebas. Elles dévastent des centaines d'hectares de forêts, de cultures, et parfois des villages entiers. Cette menace s'ajoute à la grande instabilité politique et aux nombreuses crises humanitaires que connaît la région depuis des décennies.

Le projet multidisciplinaire **GORISK**, initié par le Musée royal de l'Afrique centrale et le Musée d'Histoire naturelle de Luxembourg, a pour objectif le développement de nouveaux outils et de services spécifiques pour l'étude et la surveillance de ces deux volcans. Les recherches doivent permettre à trois utilisateurs locaux (l'Observatoire volcanologique de Goma, l'Agence des Nations Unies pour les opérations – UNOPS – et le CEMUBAC, une ONG belge spécialisée dans les soins de santé en République démocratique du Congo) d'améliorer la surveillance du Nyiragongo et du Nyamulagira, de gérer plus efficacement les risques dans la région de Goma, et d'évaluer l'impact de l'activité volcanique sur la santé des populations. Afin de compléter les systèmes de surveillance existants, le projet s'est concentré sur l'apport de techniques terrestres et spatiales pour la détection des déformations du sol, l'étude du dégazage volcanique et la production de cartes utiles pour la gestion des risques.

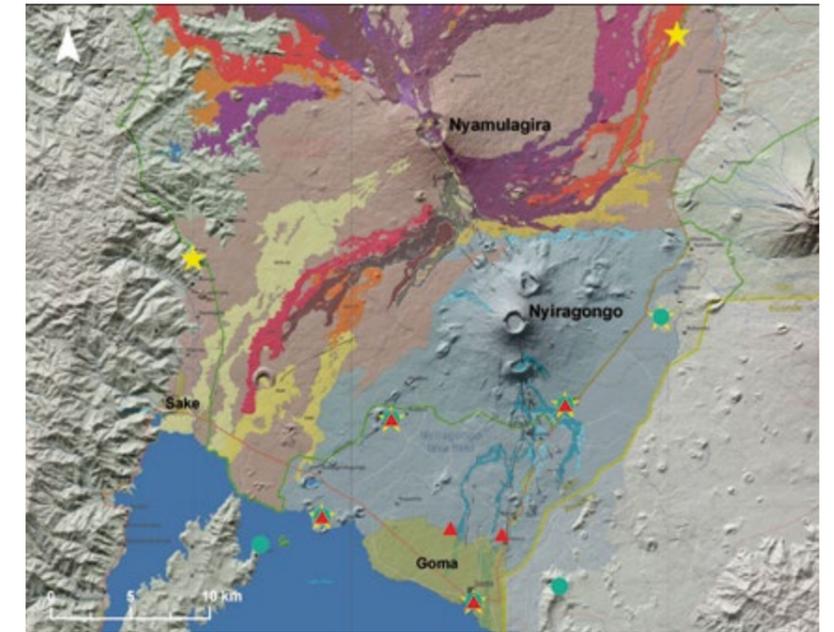
STATIONS AU SOL ET INTERFÉROMÉTRIE RADAR

La pièce maîtresse du projet est l'interférométrie radar par satellite (ou InSAR). Cette technique récente de télédétection permet d'observer sur des séries d'images de 100 kilomètres de côté et avec une résolution sub-centimétrique les déformations du sol liées par exemple à l'activité volcanique. Couplée à un réseau local permanent de stations GPS et d'inclinomètres, l'InSAR ouvre la porte à l'étude des processus géodynamiques qui gouvernent les mécanismes éruptifs. Mieux comprendre l'activité volcanique permet en effet d'améliorer l'évaluation et la gestion des risques qui y sont associées.

Grâce au projet et à l'appui de l'Agence spatiale européenne, l'acquisition systématique de six nouvelles images Envisat-ASAR a été programmée chaque mois au-dessus des Virunga de 2005 à 2012. Cette moisson de données a permis aux chercheurs de produire plus de 3000 interférogrammes distincts, c'est-à-dire des représentations graphiques de variations de hauteur, et d'étudier ainsi les déformations du sol associées à l'activité volcanique.

DANGER: ÉMANATIONS DE GAZ

Le dégazage passif des deux volcans a également été étudié. Une station de mesure de gaz a été installée à Goma afin de suivre les flux de dioxyde de carbone et de radon et de les mettre en parallèle avec l'activité volcanique. Les équipes s'intéressent aux mazuku, des dépressions dans lesquelles du dioxyde de carbone d'origine magmatique s'accumule pour atteindre des concentrations mortelles pour l'homme et les animaux. Quant au radon, il est produit à faible profondeur et véhiculé par le CO₂ vers la surface au travers des fractures. Ces analyses géochimiques permettent une meilleure compréhension de l'activité des deux volcans. L'analyse des flux des gaz et du lien



possible entre leurs variations et l'activité volcanique vise quant à elle le développement de systèmes d'alerte. En liaison avec le projet partenaire VISOR (États-Unis), la surveillance satellitaire du panache de dioxyde de soufre est aussi exploitée pour évaluer son impact sur la santé publique et la pollution des eaux de surface.

Le projet a également permis la production d'une nouvelle carte volcanologique de la région et d'une carte mise à jour de la ville de Goma, très utiles à l'établissement de plans de contingence et d'évacuation pour les événements de crise. La fin du projet a été marquée par l'éruption du Nyamulagira en janvier 2010. Cette éruption n'a heureusement pas menacé la population de Goma mais elle a néanmoins permis de tester et de valider l'utilité des différents outils développés.

Carte de localisation des instruments de surveillance des volcans Nyiragongo et Nyamulagira, dont les stations GPS et inclinomètres du projet GORISK. Les coulées éruptives passées sont représentées en différentes couleurs.

Vue nocturne du lac de lave en fusion du Nyiragongo, le plus vaste au monde (environ 200 mètres de diamètre). Par ses débordements réguliers, il contribue à l'élévation progressive de la plate-forme inférieure du cratère (une centaine de mètres par an).





LA LAVE DANS TOUS SES ÉTATS

Le projet a fait naître un réseau, le Gorisk Scientific Network, qui maintient les services développés et continue activement l'étude et la surveillance de l'activité volcanique dans le bassin du Kivu. Au sein du programme Stereo II, le projet **Vi-X** approfondit l'étude des processus géodynamiques à l'œuvre dans les Virunga afin d'améliorer l'évaluation des risques volcaniques. L'un de ses objectifs est d'exploiter la dernière génération d'images radar à haute résolution, issues de la constellation de satellites TerraSAR-X et TanDEM-X.

Les premiers résultats sont prometteurs : sur base d'une série temporelle d'images TanDEM-X, les chercheurs ont produit des modèles numériques de surface (MNS) à très haute résolution spatiale avant et après la dernière éruption du Nyamulagira, ce qui a permis d'obtenir pour la première fois une estimation précise du volume de lave émis.

Le MNS a également révélé des détails du relief qui n'étaient pas détectables sur base des données disponibles précédemment, mais qui ont toute leur importance lorsqu'on sait que les laves du Nyiragongo, très fluides, suivent des trajectoires qui peuvent être déviées par de très faibles éléments topographiques. Ce MNS plus précis autorise ainsi des simulations de coulées plus fiables et donc une meilleure estimation de la probabilité d'invasion par la lave.

Une technique permettant de surveiller les variations de hauteur du lac de lave semble également prometteuse et constituerait un nouvel outil de prévision de grande importance. En effet, on observe que le lac de lave, au gré de ses débordements successifs sur les plate-formes dans le cratère, s'élève progressivement, augmentant le risque de fissuration de l'édifice et d'épanchement de la lave.

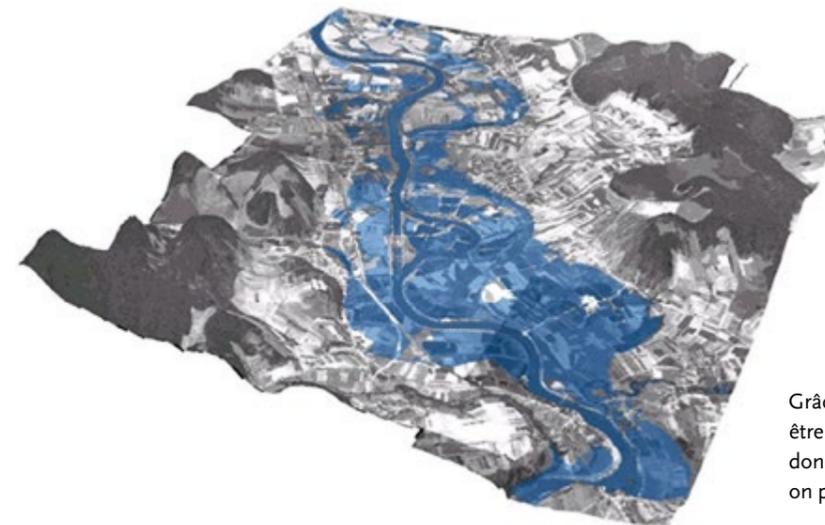
ALERTE AUX INONDATIONS

Si le nombre de catastrophes géophysiques (éruptions volcaniques, séismes...) reste relativement stable, il n'en est pas de même pour les événements extrêmes de nature hydrométéorologique. Aujourd'hui, ceux-ci sont responsables d'environ deux tiers des dommages causés par les catastrophes naturelles. Pour la seule année 2013, près de 100 inondations catastrophiques ont été recensées à travers le monde, faisant plus de 8000 morts. Selon le dernier rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la progression de ces phénomènes reflète le réchauffement du système climatique.

Mais les dégâts encourus et le coût économique des inondations sont aussi liés à d'autres paramètres. L'évolution démographique et nos choix de vie par exemple, qui impliquent un nombre croissant de personnes vivant dans des zones sujettes aux inondations, mais aussi les types de pratiques agricoles qui déterminent la manière dont les sols et les éléments du paysage interviennent dans la régulation des eaux.

En Europe, les inondations sont les catastrophes les plus fréquentes. En 2013, elles ont affecté près d'un million et demi de personnes. Les instances européennes préconisent donc un ensemble de mesures pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation, afin d'en atténuer autant que possible les conséquences.

Comment lutter contre les inondations grâce aux images satellitaires ? **HYDRASENS**, un projet



Grâce aux données radar, la zone inondée peut être délimitée précisément. En drapant ces données sur un modèle numérique de terrain, on peut obtenir une estimation du niveau de l'eau.

d'envergure, a réuni cinq équipes de recherche belges et luxembourgeoises pour mieux comprendre les différents processus qui influencent les inondations dans les bassins versants et tenter de développer des outils opérationnels plus fiables, comme des modèles de prédiction des crues. La protection des habitants est en effet directement liée à la fiabilité de ces modèles.

Traditionnellement, les agences civiles belges travaillent avec des modèles de prédiction des crues qui se basent principalement sur le niveau des rivières, mais qui ne tiennent pas compte du taux de saturation des sols, c'est-à-dire de leur capacité à absorber les eaux. Pour intégrer

ce paramètre important, les chercheurs ont optimisé un modèle couplant l'hydrologie et l'hydraulique, à partir de données radar. Les tests ont porté sur les bassins de la Dyle en Belgique et de l'Alzette au Luxembourg, tous deux soumis à de fréquentes montées des eaux.

HYDROLOGIE ET HYDRAULIQUE

Côté hydrologie, pour estimer la capacité d'absorption d'un périmètre, la variable à connaître est l'humidité du sol. Celle-ci détermine en effet la fraction des précipitations qui va s'infiltrer dans le sol et celle qui va ruisseler directement en surface.



Débordement de la Dyle dans le Brabant wallon.



L'instrument radar à pénétration de sol (ou radar géologique) est monté sur un quad pour effectuer des mesures en temps réel de l'humidité du sol.

Sur le terrain, cette variable est extraite des mesures effectuées à l'aide du GPR, le radar à pénétration de sol (Ground Penetrating Radar). À l'échelle du bassin versant, l'information nécessaire est extraite des données satellitaires du radar à synthèse d'ouverture (SAR). Les valeurs d'humidité du sol dérivées des deux types de capteurs sont ensuite corrélées d'une façon tout à fait innovante.

Côté hydraulique, c'est l'étendue de l'inondation qui est la variable importante. Il était jusqu'alors très complexe (malgré l'apport des données SAR) de cartographier les contours d'une inondation à l'intérieur d'une zone urbaine ou sous un couvert végétal. En fusionnant les données SAR avec des modèles numériques de terrain à haute résolution, une solution à ce problème a été trouvée.

Les UAV (Unmanned Aerial Vehicles) ou drones sont des engins aériens télécommandés utilisés pour des applications très variées. De l'avion ultraléger à cet octocoptère, ils peuvent emporter différents types de charge utile (imageurs, instruments GPS, météo...). Leur flexibilité et leur réactivité en font des instruments de choix pour le suivi des catastrophes.



DES RISQUES CALCULÉS
GORISK
VI-X
HYDRASENS
FLOODMOIST
RIMS
SPRINT

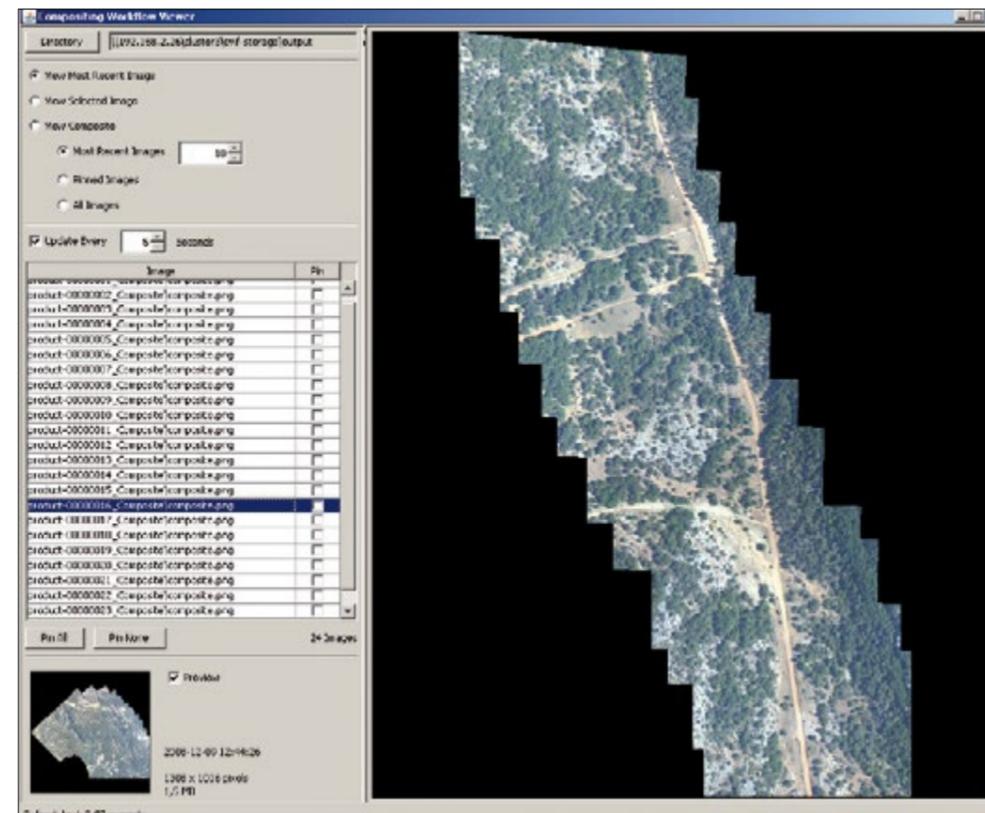
L'extraction, à partir des données SAR, de ces deux variables, humidité du sol et étendue d'inondation, est une avancée importante; leur intégration dans le modèle de prévision des crues rend en effet celui-ci plus performant. À chacune de ses étapes, la calibration du modèle est améliorée grâce à l'injection de données actualisées.

PRÉVOIR ET SUIVRE LA CRUE "EN DIRECT"

Comme tous les modèles, les modèles de prédiction des crues utilisés actuellement produisent des erreurs. Il s'agit principalement d'erreurs de timing, d'étendue d'inondation ou de hauteur de submersion. Le projet **FLOODMOIST** explore plus avant l'intérêt d'assimiler les observations d'humidité du sol et d'étendue d'inondation dans ces modèles. Le projet a donc étudié l'utilité des données SAR pour d'une part, la surveillance en continu du niveau de saturation d'eau dans le sol et d'autre part, la localisation précise des zones réellement inondées.

Les chercheurs se concentrent notamment sur le degré d'incertitude des cartes d'inondation issues de l'imagerie SAR. En effet, selon la méthode de cartographie mise en œuvre, le résultat diffère sensiblement. Ils développent donc des techniques pour, dans un premier temps, définir cette incertitude, et ensuite l'intégrer dans le processus d'assimilation des données. Leurs résultats montrent que cette intégration permet d'améliorer la précision du modèle et de ses prédictions.

Les techniques mises au point ont pour l'instant été validées uniquement sur des événements du passé; l'étape suivante est de les tester en utilisant des données SAR enregistrées en temps réel (ou quasi-réel si l'on tient compte du



Grâce au logiciel développé par le projet RIMS, les services de protection peuvent visualiser en ligne une mosaïque géolocalisée de la zone d'intervention.

court décalage entre l'acquisition, le traitement et la transmission). De cette façon, les autorités civiles pourraient s'appuyer sur des modèles alimentés "en direct" par des données satellitaires pour motiver les décisions d'alerte avant la catastrophe, et pour organiser les secours pendant la crise.

De son côté, l'Agence spatiale européenne a montré son intérêt pour ces deux projets et leurs avancées méthodologiques importantes. Dans le cadre du programme européen Copernicus, elle a en effet développé une nouvelle mission d'observation afin de succéder aux missions ERS et Envisat. Appelée Sentinel-1, elle est constituée de deux satellites équipés de ce type de radar à synthèse d'ouverture. Le premier satellite, Sentinel-1A a été lancé en avril 2014 et ses images ont déjà prouvé leur utilité pour nombre de services opérationnels.

UNE MOSAÏQUE D'IMAGES EN TEMPS RÉEL

Dans la gestion des catastrophes, agir vite et au bon endroit est essentiel. Disposer d'une information fiable et immédiate est souvent un problème majeur. Le projet **RIMS** s'est consacré à cette difficulté, en mettant en avant les UAV (Unmanned Aerial Vehicles). Des drones légers jusqu'aux grands avions stratosphériques, ces systèmes sans pilote ne manquent pas d'avantages: d'une part, ils proposent une large gamme de capteurs et d'autre part, ils peuvent être déployés à la demande, offrant une flexibilité et une réactivité inégalées. Pour le suivi des catastrophes, ils constituent donc le chaînon manquant dans

l'ensemble des plates-formes de télédétection. Cependant, pour obtenir des solutions de visualisation en temps quasi-réel, la chaîne complète et automatisée de traitement des données doit être optimisée.

Les chercheurs ont donc élaboré une nouvelle méthode de géocodage: cette étape indispensable consiste à accorder (c'est-à-dire à "caler" et à géoréférencer) une superposition d'images et de couches vectorielles de la même scène prise à différents moments, sous différents angles et par différents capteurs. Cette nouvelle approche atteint des niveaux inédits de fiabilité, de rapidité et de qualité. En effet, si de telles techniques de géocodage automatique existaient déjà, la qualité de leurs résultats n'était pas toujours au rendez-vous. La méthode mise au point permet de sélectionner en temps quasi-réel la meilleure chaîne de traitement à partir du contenu de la scène observée et des données externes disponibles.

Elle a permis la création d'un logiciel prototype qui traite les images directement sur la plateforme UAV, les assemble en mosaïque, et délivre en "live" une observation fidèle et géolocalisée de la zone survolée. Cette visualisation est transmise online et utilisable telle quelle par les services de protection civile. Les autorités publiques et le monde industriel ayant marqué leur intérêt pour cet outil opérationnel, son développement se poursuit, en partenariat avec l'AGIV (Agentschap voor Geografische Informatie) et des sociétés belges spécialisées dans les produits d'imagerie comme Barco et Gatewing.

La Charte a été activée lors de la crue historique du fleuve Paraná en Argentine en juin 2014. Les données Sentinel-1A fournies ont permis de cartographier l'étendue de l'inondation. Sentinel-1A est le premier d'une série de satellites du programme européen d'observation de la Terre Copernicus. Les données des satellites Sentinel seront disponibles gratuitement pour tous. En situations d'urgence, elles pourront même être délivrées dans l'heure suivant leur acquisition.

LA CHARTE INTERNATIONALE "ESPACE ET CATASTROPHES MAJEURES"

Télécommunication, observation de la Terre, météorologie, géolocalisation: les ressources spatiales présentent un intérêt capital dans la gestion des risques. Pour avoir accès à ces ressources en cas de catastrophe, il fallait mettre en place un système centralisé et prioritaire d'acquisition et de livraison de données spatiales. La Charte internationale "Espace et Catastrophes majeures", officiellement entrée en vigueur le 1^{er} novembre 2000, répond à ce besoin et permet de soutenir la gestion des catastrophes et d'en atténuer les répercussions sur les populations. L'ensemble des agences membres de la Charte s'engagent à mobiliser leurs ressources pour produire et diffuser en priorité des images et des cartes des régions sinistrées.

Fondée par les Agences spatiales européenne (ESA) et française (CNES), la Charte a été rapidement rejointe par l'Agence spatiale canadienne puis au fil des ans, par une quinzaine d'agences et d'institutions majeures de tous les continents. La procédure est très simple: en cas de catastrophe, tout utilisateur autorisé peut contacter une ligne téléphonique confidentielle ouverte 24 heures sur 24. Après analyse de la demande, un chef de projet prépare un plan d'acquisition de données nouvelles et un choix d'archives, en utilisant les ressources satellitaires disponibles. En collaboration avec les opérateurs capables de traiter et d'analyser ces données, il fournit le plus rapidement possible les images, les cartes et toute information utile. Depuis sa création, la Charte a été ainsi activée à plus de 400 reprises, pour seconder les organismes de protection et de sécurité civiles confrontés à des événements dramatiques, qu'ils soient d'origine naturelle ou humaine (inondations, tempêtes, incendies, séismes, éruptions, pollution pétrolière, etc.).

www.disasterscharter.org

The screenshot shows the website interface for the International Charter for Space and Major Disasters. It features a navigation menu on the left with categories like 'Home page', 'Charter Activations', 'Map of Activations', 'Media Gallery', 'News', 'About the Charter', 'Advanced search', and 'Useful Links'. The main content area displays a news item titled 'Flood in Argentina'. It includes a small map of South America, a table with event details, and a description of the event. Below the text is a large satellite image titled 'Paraná River's Flood Valley - June, 15 2014', which compares water bodies from TerraSAR X (June 11, 2008) and Sentinel-1 (June 15, 2014). The image shows a significant increase in flooded areas, highlighted in red. Logos for ESA, Copernicus, and DLR are visible at the bottom.

Type of Event	Flood
Location of Event	Argentina
Date of Charter Activation	12 June 2014
Charter Requestor	SIFEM-DNPC
Project Management	CONAE

Paraná River's Flood Valley - June, 15 2014

■ waterbodies from TerraSAR X June, 11 2008
 ■ waterbodies from Sentinel-1 June, 15 2014

Opération de déminage à Petrinja en Croatie centrale. 90 000 mines antipersonnel seraient encore enfouies dans le sol croate. Depuis la fin du conflit en 1995, plus de 500 personnes auraient été tuées par des mines antipersonnel.

LES CHAMPS DE MINES VUS DU CIEL

Malgré la campagne internationale pour l'interdiction des mines antipersonnel et le Prix Nobel de la Paix obtenu en 1997, ce fléau reste de taille. En 2013 (dernière année recensée), on ne comptait pas moins de 3 308 victimes, des civils principalement, dont une majorité de femmes et d'enfants. Actuellement, près de 70 pays sont encore contaminés. À côté des mines elles-mêmes, les munitions non explosées constituent également une menace latente.

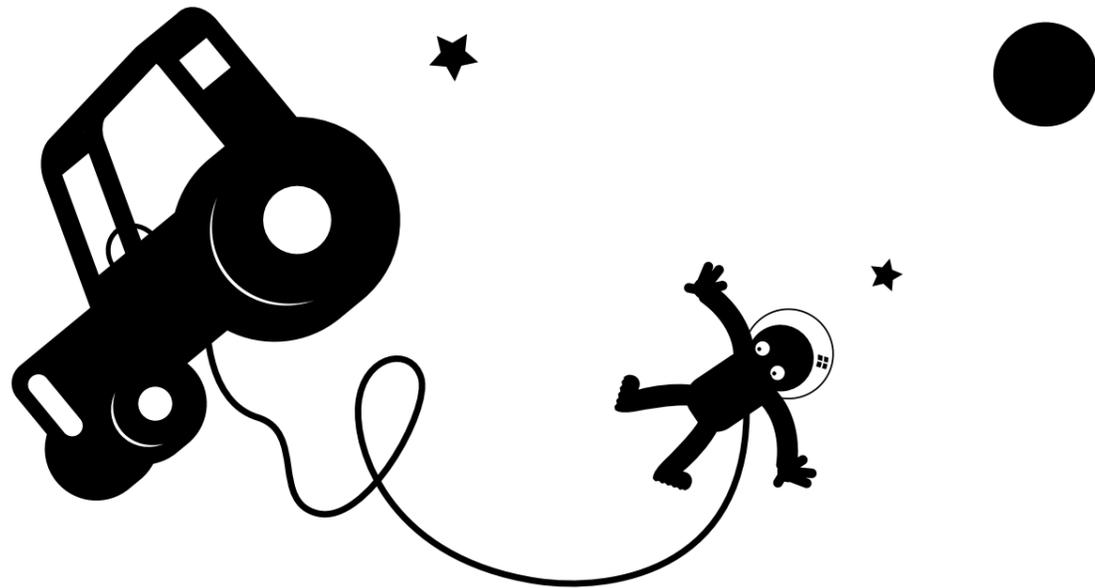
Le projet **SPRINT**, mené par l'École royale militaire, se consacre à cette contamination des zones d'anciens conflits. Pour passer d'une situation de crise à un réel état de paix, les résidus de guerre sont un obstacle important. Ils mettent en péril non seulement l'intégrité physique des habitants mais aussi la possibilité même d'une reconstruction et d'une reprise du développement local. Tenant compte de la disparité des situations sur le terrain, un vaste projet européen, TIRAMISU, vise à fournir à tous les intervenants actifs dans le déminage humanitaire une boîte à outils globale. Pour améliorer le processus de remise à disposition des terres, TIRAMISU veut développer un système géospatial intégré, capable de traiter des données qui diffèrent par leur type (interpréta-

tions visuelles, données historiques, données satellitaires multispectrales, hyperspectrales, radar...), leur résolution et leur source (drone, aéroporté, satellite).

En soutien à ce projet d'envergure, les chercheurs du projet **SPRINT** ont mis au point une technique de localisation des champs de mines en Croatie à partir de données radar. Le principe de base est qu'une zone qui n'est plus du tout fréquentée par la population locale est susceptible d'être dangereuse. L'étude a donc pour but de différencier les zones où il y a des activités humaines de celles où il n'y en a plus. Cette information peut être extraite des changements détectés dans les séries temporelles d'images radar SAR, sur base d'une analyse de la cohérence interférométrique. Ce paramètre renseigne sur les variations de la rugosité de la surface du sol entre deux acquisitions. Une étude précédente menée à la frontière entre la Jordanie et la Syrie, sur base des données SAR des satellites ERS, a en effet montré qu'une activité humaine à un endroit donné entraîne une modification de la cohérence interférométrique et qu'à l'inverse, les zones où cette activité s'est réduite conservent à très long terme la cohérence interférométrique et peuvent effectivement être identifiées comme des zones à risques.



FOCUS SUR LE MONDE AGRICOLE



Cet article se base sur les projets de recherche

GLOBALAM
EVA-3M
ADASCIS
MOCA
SOC-3D
SENSOR
HYPERMIX

Le monde agricole est au centre de défis importants comme la sécurité alimentaire, le respect de l'environnement ou l'essor socio-économique. De l'échelle de la planète à celle de la parcelle, la télédétection se met au service du développement d'outils de suivi et de prévision sans cesse plus performants.

En quelques générations, le monde agricole a connu de profondes mutations accompagnées d'une globalisation de ses enjeux. Le premier est sans conteste la sécurité alimentaire pour tous. Or, la population mondiale devrait atteindre 9,6 milliards d'ici 2050. Pour garantir la nourriture en quantité et qualité suffisantes à cet horizon, la production alimentaire globale devrait, selon les projections de la FAO, progresser de quelque 70 % par rapport au volume actuel! Le défi est de taille lorsqu'on sait que la main-d'œuvre rurale se réduit constamment. De plus, la production agricole est tributaire de conditions climatiques soumises à une variabilité accrue et d'événements météorologiques extrêmes qui s'intensifient. Deuxièmement, les pratiques agricoles sont au cœur des questions environnementales. Elles ont en effet un impact direct sur la qualité des

sols, de l'air et des eaux, mais aussi sur les paysages et les habitats nécessaires à la préservation de la biodiversité. Enfin, les produits agricoles sont des instruments économiques de premier plan, leurs volumes faisant même l'objet de spéculations sur les marchés financiers.

Pour répondre à l'ensemble de ces enjeux, il est indispensable d'améliorer les outils de suivi des pratiques agricoles et de prévision de la production. Ces outils se sont développés parallèlement à l'essor de la télédétection. Depuis le lancement en 1972 de Landsat-1, le premier satellite civil dédié à l'observation des ressources terrestres, de nombreuses applications utiles à l'agriculture ont vu le jour. Elles renseignent sur l'état des végétaux, permettent de cartographier les surfaces cultivées, d'estimer les rendements futurs ou encore d'évaluer les dégâts après des événements extrêmes (sécheresse, inondation, gel, tempête, etc.). L'amélioration constante des résolutions spatiale et spectrale des capteurs profite également à l'agriculture de précision. Celle-ci consiste à moduler l'apport d'eau, d'engrais ou d'autres intrants en fonction des besoins réels au niveau même de la parcelle. Une approche "millimétrée" qui optimise la qualité et le rendement tout en limitant l'impact environnemental.

Les projets de recherche s'appuient aujourd'hui sur un nombre croissant d'instruments d'observation qui offrent une grande variété d'échelles, de gammes spectrales et de fréquences d'acquisition. Le volume de données archivées est également considérable. Nous disposons, par exemple, de plus de 40 ans d'images Landsat (de 80 à 30 mètres de résolution) et SPOT-HR (de 20 à 2,5 mètres), de 36 ans d'images quotidiennes globales du



satellite NOAA-AVHRR (1 kilomètre), de 16 ans d'images VEGETATION (de 1 kilomètre à 300 mètres), de près de 15 ans de données MODIS (de 1 kilomètre à 250 mètres) et de 10 ans d'images MERIS (environ 300 mètres). En explorant les bénéfices spécifiques des différents capteurs et la façon la plus productive de les combiner, les chercheurs ont étendu leurs possibilités et leurs sources d'information afin de faire progresser la surveillance agricole, de la planète (grâce aux modèles agro-météorologiques globaux) à l'échelle de l'exploitation.

L'un des objectifs du Système mondial des systèmes d'observation de la Terre (GEOSS) est d'améliorer le suivi agricole global en vue de mieux assurer la sécurité alimentaire.

NOURRIR 9 MILLIARDS D'HUMAINS EN 2050

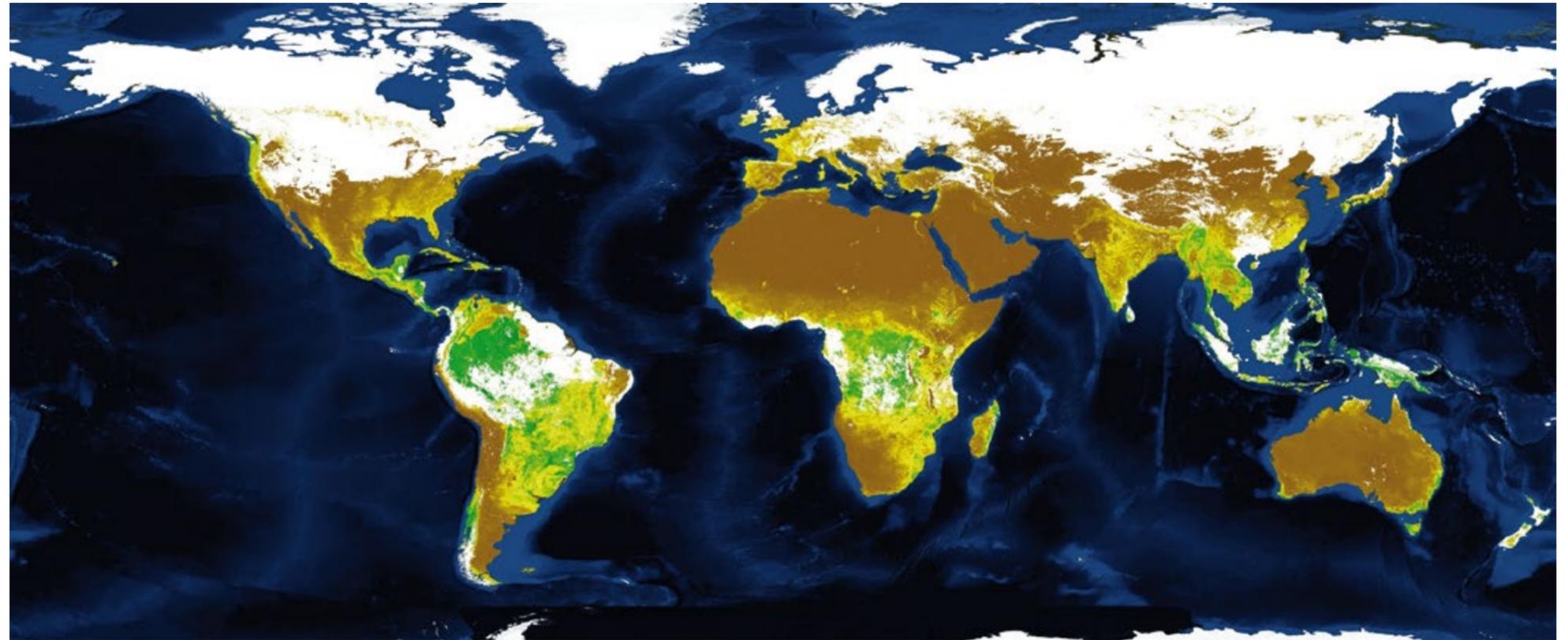
Face à la pression démographique mondiale et à la nécessité absolue d'un approvisionnement agricole accru, la variabilité de la production et des rendements est devenue une préoccupation majeure. Afin d'assurer la sécurité alimentaire, les pouvoirs publics se mobilisent du local au global pour créer des systèmes de suivi. Dès 1988, la Commission européenne a fondé le programme MARS, destiné à faire le lien entre les nouvelles capacités d'observation de la Terre et les techniques de prévisions agricoles. Il fut suivi de l'initiative GEO (Group on Earth Observation) qui œuvre à la création d'un service public mondial d'observation dénommé GEOSS (Global Earth Observation System of Systems). Ces efforts sont secondés par les agences spatiales, par les grands organismes internationaux (Programme alimentaire mondial, FAO, Banque mondiale, etc.) et par une communauté d'instances nationales et régionales qui fournissent de l'aide et de l'information aux agriculteurs.

Dans ce contexte, il est relativement surprenant de constater que, si les progrès technologiques dans le domaine de l'observation de la Terre ont été remarquables depuis la fin des années 1990, les systèmes opérationnels de surveillance n'ont, quant à eux, pas beaucoup évolué. Des avancées scientifiques de pointe intégrant la télédétection ont bien été réalisées, notamment dans la modélisation de la croissance des cultures, mais elles restent sous-exploitées. Ces modèles ont pour objectif de générer de l'information détaillée à l'échelle régionale, continentale et mondiale. Pour cela, ils doivent être alimentés par des données précises, fiables, qui se rapportent à des fenêtres temporelles adéquates et qui couvrent de vastes étendues géographiques présentant des conditions très différentes.

Le projet **GLOBAM** a ainsi couplé le suivi local des cultures par télédétection et les modèles globaux de croissance pour estimer au mieux la production agricole à toutes les échelles.

Quelle est la résolution nécessaire pour identifier les parcelles dans un paysage agricole donné ?

Le projet GLOBAM a utilisé des données de capteurs de basse, moyenne et haute résolution. Ici, le même paysage agricole vu par les capteurs HRV de SPOT 5 (10 m) et MODIS (250 m).



QUELS CAPTEURS POUR QUELS RÉSULTATS ?

L'étude a porté sur trois sites de 300 kilomètres de côté situés en Europe du Nord (comprenant la quasi-totalité de la Belgique), en Asie (Chine) et en Afrique (Éthiopie), de manière à couvrir trois contextes agro-écologiques radicalement différents. Les saisons de croissance du blé d'hiver et du maïs y ont été observées à l'aide de mesures de terrain et de données de capteurs satellitaires de différents types et de différentes résolutions spatiales.

Les propriétés et les avantages de ces différents capteurs ont été explorés et combinés afin d'alimenter des méthodes de surveillance globales qui tiennent compte des particularités locales. L'approche consiste à suppléer les échantillonnages de terrain, irréalisables à de si vastes



échelles, en couplant des variables dérivées de la télédétection avec divers modèles de croissance calibrés différemment pour chacun des sites.

Les résultats du projet ont ouvert une série de pistes méthodologiques permettant d'améliorer la prévision et le suivi de la croissance des cultures. Par exemple, les données du radar SAR, dont le signal actif traverse la couche nuageuse, sont très utiles là où le ciel est souvent couvert. Ces images, lorsqu'elles sont acquises de manière régulière, permettent de compléter l'information fournie par les images optiques. En corrélant ces deux sources de façon innovante, la recherche a amélioré l'extraction de l'indice de surface foliaire, un paramètre important puisqu'il s'agit de la surface de feuillage vert par unité de surface au sol.

Résultat plus surprenant, la contribution intéressante des satellites géostationnaires a été confirmée. Ces satellites qui orbitent à environ 36 000 kilomètres de la Terre sont traditionnellement dévolus aux observations météorologiques. Mais les données des satellites MSG (Meteosat Second Generation) par exemple permettent également d'estimer l'évapotranspiration pour un type de culture précis. Ce paramètre renseigne sur le déficit en eau de la plante (et du sol) et sur son degré de vulnérabilité, qui influencent son développement et donc le rendement attendu. Assimilée dans les modèles de croissance, l'évapotranspiration constitue un apport précieux pour le suivi de la croissance végétale.



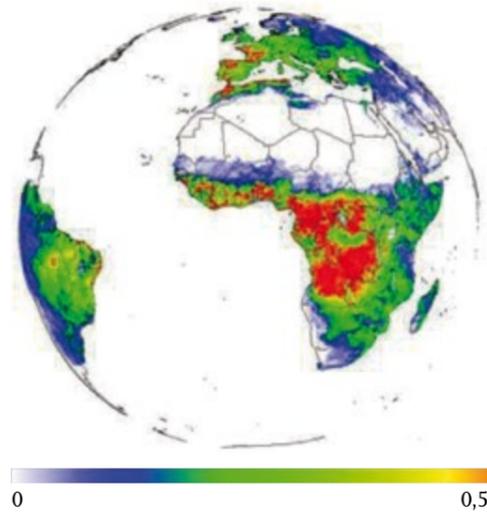
L'indice de surface foliaire (LAI) est dérivé des données globales du capteur VEGETATION. Délivré tous les 10 jours, il est l'un des paramètres permettant d'établir des cartes d'estimation de la production agricole au niveau mondial.



DES MÉTHODES PLUS ROBUSTES

En fin de projet, deux études ont permis de préciser quelles devraient être les évolutions nécessaires des instruments satellitaires et des méthodes d'extraction pour répondre aux défis futurs, notamment en termes de résolution spatiale requise pour plusieurs types de paysages agricoles représentatifs de la diversité mondiale.

En Éthiopie par exemple, les données d'observation à très haute résolution sont recommandées car elles permettent d'appréhender avec le niveau de détail suffisant le relief accidenté mais aussi l'assemblage de petites parcelles abritant souvent une culture mixte de deux ou trois espèces.



L'évapotranspiration (ET), somme de l'évaporation à la surface des terres et des mers et de la transpiration des végétaux, est un composant essentiel du cycle de l'eau. Des cartes globales d'ET sont produites toutes les 30 minutes grâce aux données Meteosat.

La robustesse des méthodes à développer est aussi mise en avant. En effet, il s'agit non seulement d'élaborer des techniques de surveillance applicables à toute région géographique, mais aussi dans des conditions météorologiques et climatiques instables. Pour relever le défi planétaire de la sécurité alimentaire, il est aujourd'hui indispensable de disposer d'outils de suivi et de prévision plus performants intégrant cette variabilité.

Un autre projet, **EVA-3M**, tente de développer une méthode générique permettant de quantifier le processus d'évapotranspiration pour différents types d'occupation du sol et différentes zones climatiques.

Les résolutions spatiale et temporelle doivent être suffisantes pour répondre aux besoins du monde agricole: estimer les besoins en eau, établir les plans d'irrigation, mieux anticiper les alertes à la sécheresse ou affiner la prévision des rendements. Le projet étudie donc comment exploiter au mieux, à l'échelle d'une région ou d'une sous-région, les cartes d'évapotranspiration produites à partir des données des satellites géostationnaires MSG. Si la fréquence de ses observations est très élevée (toutes les 15 minutes), la résolution spatiale par contre n'est que de 3 kilomètres. Les chercheurs tentent donc de compenser ce manque de précision spatiale en couplant ces données de résolution temporelle élevée à des données de satellites polaires offrant une résolution spatiale de l'ordre de 300 mètres.

La tempête de grêle qui s'est abattue sur le pays en juin 2014 a causé des dégâts importants aux cultures mais surtout aux infrastructures. Si elle est reconnue comme calamité naturelle, les agriculteurs touchés pourront bénéficier d'une indemnité du Fonds des calamités.



L'ASSURANCE-RÉCOLTE, DE LA TÉLÉDÉTECTION À L'APPLICATION PRATIQUE

D'année en année, les agriculteurs de nos régions font face à une instabilité croissante de leurs revenus. Ils sont confrontés d'une part aux fluctuations des prix du marché, avec une diminution progressive des mécanismes de compensation de l'Union européenne; et d'autre part, aux aléas climatiques, avec des événements météorologiques extrêmes qui se multiplient (sécheresses, vagues de chaleur, pluies violentes, tempêtes). Pour le monde agricole, une meilleure gestion des risques naturels est donc une nécessité parfois vitale.

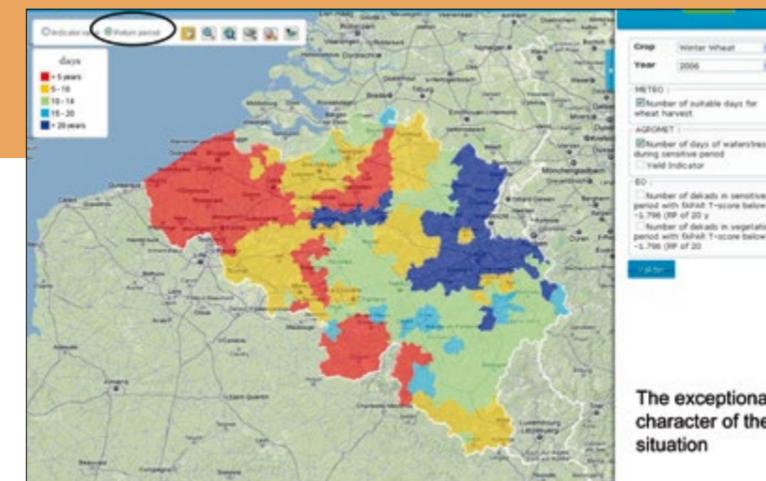
En Belgique, les pertes agricoles dues à une catastrophe sont couvertes par le Fonds des calamités. Les services en charge de sa gestion cherchent à rendre plus réactif et plus efficace le processus d'évaluation des dégâts et de suivi des sinistres. Le projet **ADASCIS** a donc étudié comment soutenir le système d'aide à la décision en se basant sur une information fiable et objective.

Le projet a débuté par une sélection d'indices pertinents qui rendent compte des dégâts subis par les cultures. Ces indices sont dérivés de données météorologiques, de modèles agro-météorologiques et d'observations de capteurs satellitaires à basse et moyenne résolution. Les valeurs des indices sont ensuite comparées à des valeurs de référence établies au départ de données historiques.

À l'échelle régionale et communale, le calcul des indices a ainsi permis d'identifier des zones à problème récurrent (retard de croissance, rendements bas, faible humidité des sols) ou à risque élevé de dégâts aux cultures. À l'échelle des parcelles, une étude détaillée, utilisant des images satellitaires à très haute résolution et des images SAR, a été menée sur deux sites particuliers afin de valider les résultats obtenus grâce aux données de moyenne résolution.

Une application web pré-opérationnelle a été développée pour permettre aux utilisateurs de visualiser et d'analyser les divers indices de dégâts et de risques sous forme de cartes et de graphiques. L'application a été testée lors de la saison de croissance 2011 pour évaluer l'ampleur et l'intensité de la sécheresse du printemps. L'outil ainsi développé permet aux autorités compétentes d'identifier une zone de calamité et de se prononcer sur l'admissibilité des demandes d'indemnisation.

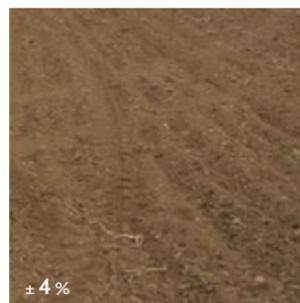
Le projet s'inscrit également dans l'évolution des assurances-récolte. Depuis 2006, des couvertures élargies contre les aléas du climat sont préconisées par les instances européennes. En effet, en cas de calamité, le montant de l'indemnisation européenne perçue par l'agriculteur est directement lié à l'assurance qu'il a souscrite. Le projet a analysé les systèmes d'assurances-récolte en usage dans d'autres pays et a défini une procédure adaptée à la Belgique. Pour les autorités agricoles régionales, l'outil produit peut ainsi servir de base d'information sur la nature et la fréquence des risques encourus. La composition du comité de pilotage du projet reflète l'ensemble de ces enjeux, puisqu'il rassemble, outre le SFP Économie, des groupes d'agriculteurs, des représentants des Régions flamande et wallonne et des acteurs du secteur de l'assurance (Assuralia).



L'application web développée par le projet ADASCIS permet notamment de visualiser le caractère exceptionnel d'une situation. Par exemple le nombre de jours favorables à la récolte de blé par rapport à une année de référence.



L'extraction d'une carotte intacte de sol d'environ 1 m de long se fait à l'aide d'un carottier à percussion. La distribution verticale du carbone est ensuite analysée.



Ces deux types de sols fraîchement labourés peuvent servir d'étalons pour les concentrations en carbone organique : celui de gauche a une teneur en carbone faible, celui de droite une teneur moyenne.

LE CARBONE ORGANIQUE AU CŒUR DE GRANDS DÉFIS

Le carbone organique contenu dans les sols (COS) est un facteur essentiel pour la productivité agricole. Il remplit une série de fonctions biologiques, physiques et chimiques fondamentales qui ont un impact sur la fertilité, la qualité et la stabilité des sols agricoles mais aussi sur la biodiversité ou la toxicité des polluants. Il joue également un rôle clé dans les bilans carbone. En effet, les sols offrent une capacité importante de séquestration du carbone. Il a été démontré que la mise en œuvre de certaines pratiques agricoles permettait d'optimiser la quantité de carbone piégée dans les sols, et donc de diminuer d'autant la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Le nouveau programme de la Politique agricole commune (2014-2020) intègre d'ailleurs dans ses priorités la protection des sols riches en carbone organique et définit la diminution de matière organique comme l'une des principales menaces qui pèsent sur les ressources du sol.

Le Luxembourg a été l'un des premiers pays à prendre l'initiative de mesurer systématiquement la concentration du COS dans ses terres agricoles. L'estimation du COS est directement utile à la mise en œuvre des mécanismes d'octroi de crédits carbone. Il constitue également un indicateur du respect des "bonnes conditions agricoles et environnementales" établies par l'Union européenne. Ces dernières détaillent l'ensemble des règles et des pratiques à suivre pour bénéficier des aides communautaires (entretien des terres et des prairies, maîtrise de l'irrigation, assolement diversifié...).

Le projet **MOCA** a donc étudié comment développer une méthode efficace et opérationnelle d'analyse et de cartographie des concentrations en COS. Les chercheurs ont ensuite tenté de déterminer si la précision obtenue était suffisante pour permettre aux agriculteurs d'évaluer l'impact de nouvelles pratiques agricoles sur ces concentrations. L'obtention des données de terrain nécessaires à un tel recensement par les techniques traditionnelles d'échantillonnage étant chère et fastidieuse, les capteurs hyperspectraux aéroportés constituent une alternative idéale. Cependant, les chercheurs doivent arriver à réduire l'impact négatif de facteurs perturbant le signal, comme le taux d'humidité ou les ombres portées liées à la rugosité du sol. Dans la zone d'étude située au Luxembourg et caractérisée par différents types de sol et une grande variabilité des concentrations en COS, cinq images hyperspectrales acquises avec le capteur AHS-160 ont été traitées, analysées et comparées à des mesures de terrain.

Dans la plupart des cas, les modèles développés ont fourni des estimations de COS suffisamment précises pour répondre aux besoins de l'agriculture extensive. Les avancées méthodologiques du projet profitent directement aux utilisateurs finaux, comme par exemple la société luxembourgeoise Convis qui a utilisé les résultats pour établir des plans de fertilisation et des bilans de qualité du sol.

LA 3^e DIMENSION DU CARBONE

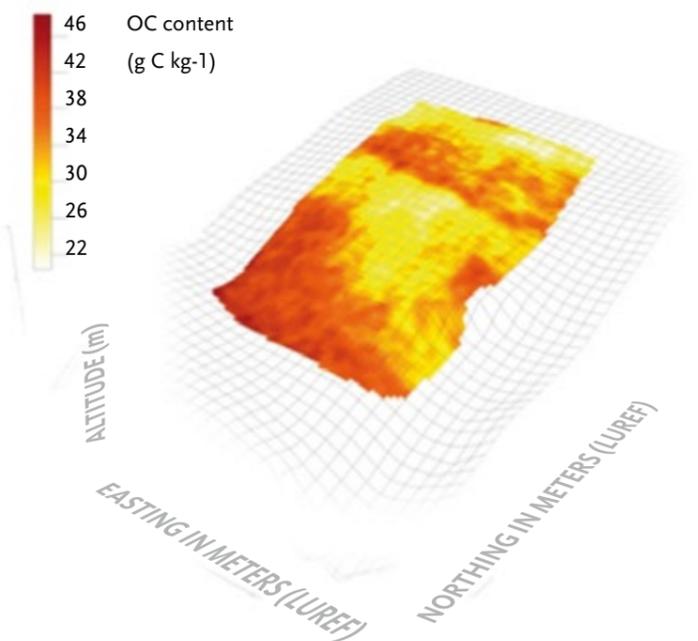
Dans la continuité de cette recherche, le projet **SOC-3D** a étudié comment améliorer l'estimation du stock de carbone en intégrant dans la représentation spatiale du COS sa distribution verticale dans le premier mètre de terre arable. Pour la concentration en surface, un périmètre de 860 km² situé au Luxembourg a été survolé par le capteur hyperspectral APEX (Airborne Prism Experiment). Ses données ont été croisées et validées avec plus de 150 échantillons de sol prélevés dans la zone d'étude. Pour le contenu dans le premier mètre de terre, des "carottes" ont été extraites à l'aide d'un carottier à percussion et chaque couche intacte de 10 centimètres a été scannée par un spectromètre de laboratoire. L'expérimentation sur cette "troisième dimension" vise à obtenir des estimations de concentrations en COS plus proches de la réalité et à pouvoir extrapoler le stock de carbone en tout point du périmètre étudié.

Pour l'estimation des concentrations de surface, les meilleurs résultats ont été obtenus en combinant les données hyperspectrales et des variables géomorphologiques (pente, courbure). Les cartes obtenues donnent un bon aperçu de la variation intraparcelle et montrent clairement que la teneur en COS dépend du type de sol et des variables géomorphologiques. En projetant ces résultats dans une application Google Earth, les utilisateurs peuvent très facilement observer la distribution spatiale du COS. Celle-ci reflète souvent les changements de pratiques agricoles advenus au cours des années ou des différences dans le degré d'érosion.

Ces cartes détaillées sont utiles à deux niveaux : d'une part, elles informent les agriculteurs sur la teneur en matière organique de leurs champs, ce qui leur permet de prendre les mesures de préservation adéquates ; d'autre part, elles alimentent les inventaires nationaux de COS, qui sont au cœur des préoccupations et des nouvelles réglementations de la Politique agricole commune.

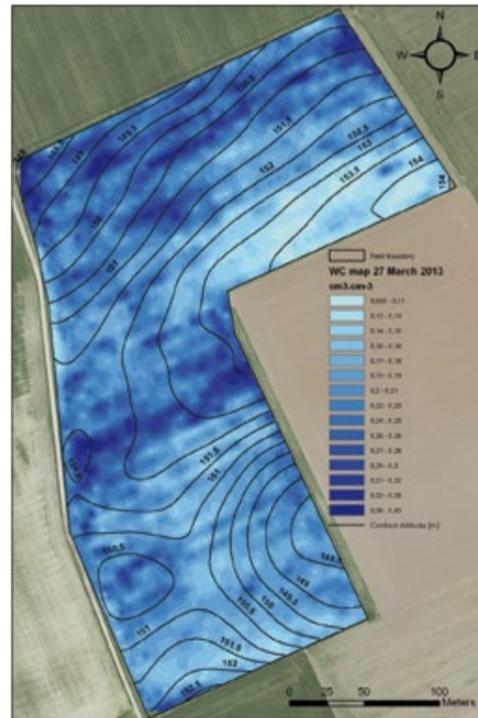


Image Google Earth du sud du Grand-Duché de Luxembourg, sur laquelle a été projetée une carte de la teneur en carbone organique des sols labourés.



L'un des facteurs de variation de la teneur en carbone du sol à l'intérieur même d'une parcelle est la topographie.

Carte à haute résolution de l'humidité du sol d'une parcelle agricole à Gentinnes, dressée grâce aux données du radar à pénétration de sol et drapée sur les courbes de niveau. Plus le bleu est foncé, plus la teneur en eau est élevée.



L'EAU, À LA SOURCE DE TOUT

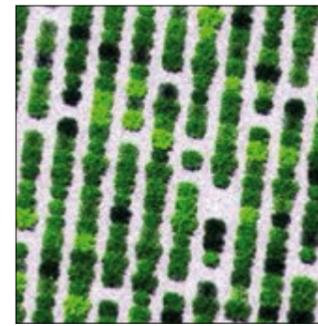
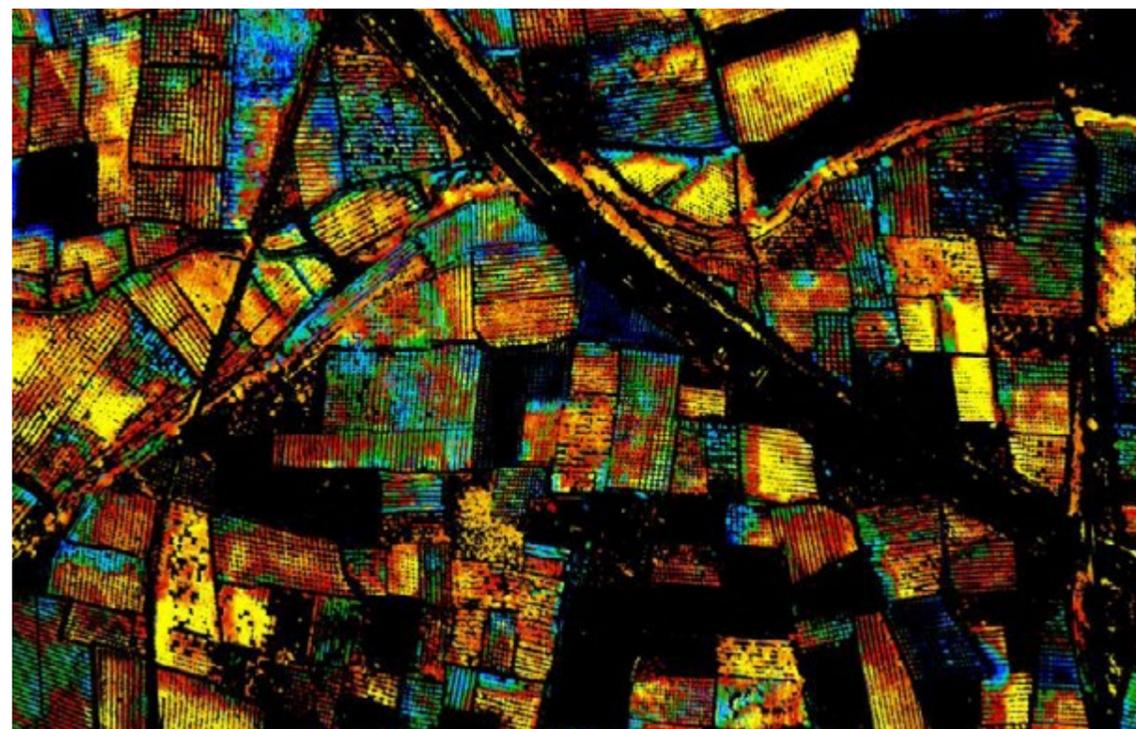
L'humidité du sol est bien entendu un autre paramètre essentiel pour la croissance des végétaux, mais elle joue aussi un rôle majeur dans nombre de processus du cycle hydrologique (infiltration, ruissellement, absorption par les racines, évaporation), dans les échanges énergétiques avec l'atmosphère et donc également dans le système climatique. À toutes les échelles, du champ au bassin versant, son estimation grâce à des instruments de télédétection aéroportés ou satellitaires, en particulier les radars, s'est généralisée. Cependant l'humidité du sol est par nature très variable dans le temps et dans l'espace et il est difficile d'obtenir suffisamment de données de terrain pour calibrer et valider efficacement les méthodes de traitement des données SAR (Synthetic Aperture Radar).

Pour diminuer le degré d'incertitude encore élevé de ces méthodes, le projet **SENSAR** cherche à intégrer l'apport d'un nouveau type de radar, le radar à pénétration de sol (GPR pour Ground Penetrating Radar). Celui-ci pourrait en effet permettre de combler l'écart d'échelle qui subsiste entre la télédétection et les prélèvements de terrain traditionnels. Le perfectionnement des méthodes de traitement des données SAR devrait permettre, à terme, la production de cartes d'humidité du sol plus fidèles à la variabilité locale. Plusieurs zones d'étude situées en Belgique et présentant différents types de sol et de topographie sont explorées par le projet, avec pour objectif l'établissement de cartes directement utilisables par les administrations publiques, belges ou internationales, ou par des organismes privés comme les compagnies d'assurances ou les associations d'agriculteurs.

HYPERSPECTRAL ET HYPERSPATIAL

Le projet **HYPERMIX** s'est intéressé à une problématique fondamentale de la télédétection : lorsque les ingénieurs conçoivent un capteur satellitaire, ils doivent faire un compromis entre la résolution spatiale et la résolution spectrale, en optimisant le rapport signal (information utile) sur bruit (information non significative), qui indique la qualité de l'enregistrement. Le capteur satellitaire Hyperion, par exemple, offre actuellement la résolution spectrale la plus élevée disponible depuis l'espace (220 bandes spectrales), mais sa résolution spatiale n'est que de 30 mètres. D'un autre côté, des capteurs tels que Pléiades, QuickBird ou WorldView-2 offrent une très haute résolution spatiale (environ 50 centimètres en panchromatique et 2 mètres en multispectral), mais leur résolution spectrale est nettement inférieure (4 à 8 bandes spectrales). Quant aux capteurs hyperspectraux aéroportés, comme APEX, ils combinent souvent les avantages d'une résolution spectrale inégalée et d'une très bonne résolution spatiale (0,5 à 7 mètres) mais c'est alors le champ de vision qui est réduit.

De nombreuses applications, telles que la cartographie détaillée de la couverture des sols, l'étude de la dynamique de la végétation ou l'évaluation de son état requièrent des informations spatialement et spectralement précises. L'équipe de recherche a donc développé des méthodes de fusion des données hyperspectrales et hyperspatiales, afin de générer un produit qui combine leurs qualités respectives. Le test a porté sur des vergers d'agrumes situés dans la région de Valence en Espagne et à Loksbergen dans le Limbourg. Une image à 215 bandes spectrales et 2 mètres de résolution fournie par



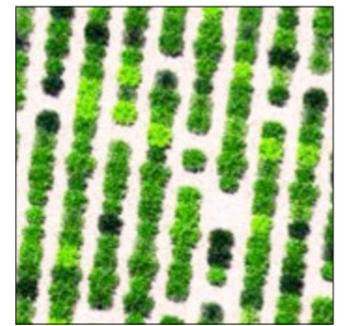
Résolution spatiale élevée

+



Résolution spectrale élevée

=



Résolutions spatiale et spectrale élevées

le capteur APEX, et une image à 3 bandes spectrales et 20 centimètres de résolution fournie par un micro-drone ont ainsi été fusionnées pour générer une image à 215 bandes spectrales et 20 centimètres de résolution.

Ce produit fusionné a permis d'extraire des estimations plus précises de certains paramètres biophysiques (concentrations en chlorophylle, teneur en eau...) des arbres fruitiers. Le niveau de stress hydrique des arbres, paramètre influençant directement la qualité des fruits, a pu être cartographié avec précision. Les tests ont également porté sur un verger virtuel situé dans un environnement aux conditions simulées. Les avancées méthodologiques produites ont été mises à la disposition de la communauté des chercheurs en télédétection.

L'indice de réflectance photochimique (PRI) traduit la variabilité inter et intra parcelle(s) de l'état de santé des plantes et permet par exemple de déterminer avec précision les besoins en eau au sein de chaque parcelle.

Vergers d'agrumes dans la région de Valence en Espagne, survolé par un drone équipé d'un capteur hyperspectral.





CROISSANCE URBAINE ET DÉFIS HUMAINS



La ville est sans cesse plus complexe et soumise à de nombreux défis.

Pour y répondre, la télédétection est utilisée sur tous les fronts : elle aide à mettre à jour l'information nécessaire, améliore les outils de diagnostic et génère de nouveaux indicateurs de la qualité de vie.

En 2008, notre planète a atteint le point d'inflexion où la population urbaine globale a dépassé la population rurale. Le nombre de citadins est passé d'un homme sur dix en 1990 à plus d'un homme sur deux aujourd'hui. En 1970, Tokyo et New York étaient les seules agglomérations de plus de dix millions d'habitants. Depuis, le nombre de mégapoles a décuplé et continue de croître, et ce principalement dans les pays en développement. Quant aux cités de plus d'un million d'habitants, elles se comptent par centaines, en Europe occidentale notamment, où plus de deux habitants sur trois sont citadins. La ville est donc confrontée aux grands enjeux de la durabilité, à l'intersection de la cohésion sociale, du développement économique et de la préservation de l'environnement. Elle est au cœur d'une gestion en évolution continue et pour laquelle les outils de télédétection se révèlent très utiles.

MIEUX CERNER LA DYNAMIQUE URBAINE

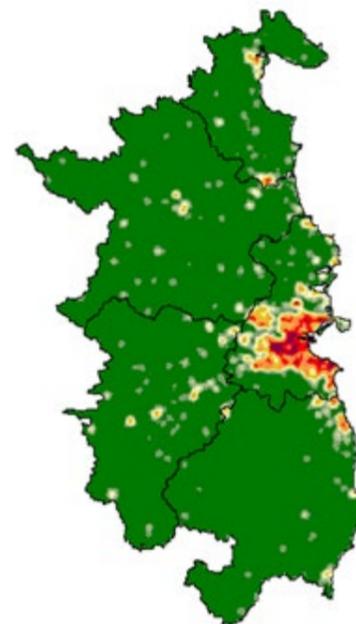
La ville est animée de changements quasi permanents. Ses limites extérieures sont sans cesse repoussées et en son sein, les restructurations de quartiers, les nouvelles constructions ou la création d'espaces verts se succèdent. Ces changements affectent tant l'environnement humain que naturel. Pour maintenir la qualité de vie des habitants face à cette dynamique, les autorités locales doivent impérativement en connaître les causes, la chronologie et les effets. Plusieurs projets de recherche ont étudié ces paramètres en s'appuyant sur les informations spatiales et temporelles de plus en plus détaillées fournies par la télédétection.

Le projet **MAMUD** a ainsi utilisé des images à haute résolution et des séries temporelles à

moyenne résolution pour mesurer l'impact de la croissance urbaine sur la structure du paysage et sur l'accessibilité des zones vertes pour les résidents. Les méthodes ont été développées et testées pour les villes de Dublin et Istanbul. Toutes deux ont en effet connu une expansion considérable : alors que Istanbul absorbe continuellement l'exode rural depuis près d'un demi-siècle, Dublin a été dopée par une forte effervescence économique, du début des années 1990 à la crise financière de 2008.

Un autre projet, **VALI-URB**, a exploré comment les images à haute et très haute résolution peuvent encore améliorer la caractérisation du tissu urbain et des changements qu'il subit. L'étude a porté spécifiquement sur l'évolution,

2010

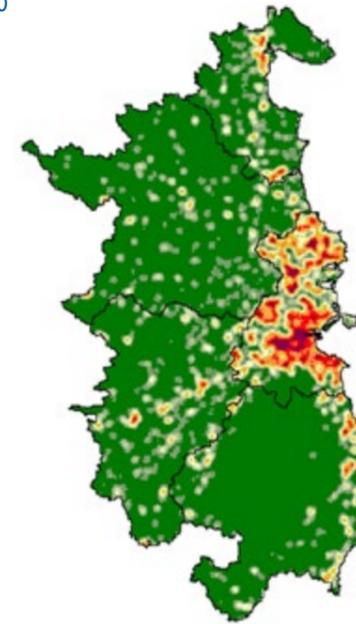


dans la ville et sa périphérie, des surfaces bâties et de la végétation, toutes deux constituant un équilibre fragile qu'il faut suivre en continu.

VERS UN MODÈLE PLUS JUSTE

La gestion urbaine se fait souvent à l'aide de modèles qui simulent l'évolution probable de la situation. La Commission européenne et ses grandes instances comme l'Agence européenne de l'Environnement les utilisent pour évaluer l'impact de nouvelles directives et recommandations. En affinant l'extraction d'information sur l'occupation du sol en milieu urbain à partir des données satellitaires, le projet **MAMUD** a pu améliorer tant les cartes existantes que le modèle de croissance urbaine **MOLAND** utilisé depuis 2002.

2050



Degré d'urbanisation de la ville de Dublin en 2010 et projection pour 2050.

Vues satellites d'Istanbul en 1990 (en haut: image Landsat 5 à 30 m de résolution) et en 2009 (en bas: image SPOT 5 à 10 m de résolution). Sur ces images en fausses couleurs, l'extension de la ville est nettement visible en gris-vert.



Un tel modèle requiert, outre des paramètres comme les catégories socio-économiques, la topographie ou l'infrastructure routière, des informations spatiales détaillées sur l'occupation des espaces urbains. Les images satellitaires sont ici très utiles, même si l'occupation du sol ne peut être dérivée directement des mesures spectrales. Une méthode a donc été développée pour déduire l'occupation des sols à partir des formes urbaines, grâce à des cartes dérivées des images satellitaires qui rendent compte de la structure et de la densité du bâti. Cette information permet ensuite de calibrer le modèle MOLAND, c'est-à-dire d'ajuster ses paramètres de façon à obtenir un accord optimal entre l'occupation des sols prévue et celle réellement observée par télé-détection.

Le projet **ASIMUD**, quant à lui, s'est penché sur le degré d'incertitude des prédictions. Celui-ci dépend des incertitudes liées tant aux paramètres initiaux qu'aux données de référence utilisées pour la calibration. Les chercheurs ont développé une méthode de calibration automatique qui intègre, à chaque étape de la procédure de simulation, des données satellitaires récentes d'occupation des sols. En termes très simples, l'équipe a démontré qu'en assimilant certaines données réelles dans la dynamique de simulation, le modèle devient plus performant: il valide les données confirmées et supprime les autres, réduisant ainsi le degré d'incertitude de l'ensemble de la chaîne. L'algorithme développé a été mis à la disposition des utilisateurs potentiels, sous la forme de scripts de programmation

(en langage informatique Python) sous licence Open Source. Ces avancées profitent notamment au *Ruimte Model Vlaanderen*, un modèle d'occupation des sols utilisé comme outil d'aide à la décision par plusieurs organismes flamands (Agentschap voor Natuur en Bos, Vlaamse MilieuMaatschappij, Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek).

DES PIXELS IMPERMÉABLES

De grande ampleur, le projet **MAMUD** a également exploré l'impact de la croissance urbaine sur l'hydrologie. Les constructions de bâtiments ou d'équipements urbains (parkings, routes asphaltées, etc.) réduisent en effet fortement la perméabilité des sols. Cette imperméabilisation massive limite l'infiltration normale des eaux de pluie et accélère le ruissellement, ce qui augmente et aggrave les risques d'inondation en cas de fortes intempéries. Traversée par trois cours d'eau, la ville de Dublin subit fréquemment de tels épisodes qui mettent ses habitants en danger et provoquent des dégâts matériels importants.

Dans le nord de la ville, le bassin versant de la rivière Tolka, particulièrement vulnérable, a servi de zone d'étude. Assistés par le Conseil municipal de Dublin et le Trinity College, les chercheurs ont pu établir, à partir de séries temporelles satellitaires, des cartes détaillant le coefficient de ruissellement dans le bassin versant pour 1988 et 2001. Leur comparaison met en évidence l'importante augmentation des surfaces imperméables, à coefficient élevé, ce qui reflète bien le phénomène d'urbanisation



durant cette période. Sur cette base, un modèle de prédiction des inondations a été développé. Il tient compte non seulement des données pluie/débit mais également des changements dans la densité des différentes affectations du sol (résidentiel, commercial, industriel, récréatif, etc.). Pour les autorités, de tels outils permettent d'orienter les politiques et les décisions d'aménagement vers des choix plus sûrs.

PLÉIADES, DES CAPACITÉS INÉDITES POUR LA CARTOGRAPHIE URBAINE

Très peu de temps après leur lancement, les satellites Pléiades ont délivré des images directement utiles à de nombreux projets de recherche. Lancés respectivement en décembre 2011 et 2012, les satellites jumeaux Pléiades 1A et 1B forment une constellation de nouvelle génération qui complète les services offerts par les satellites SPOT. En orbite à 694 kilomètres d'altitude, les satellites Pléiades peuvent prendre jusqu'à 1 000 clichés par jour avec une capacité de revisite quotidienne. Légers et agiles, ils sont capables de tourner sur eux-mêmes pour varier les angles de vue, ce qui permet d'acquérir des images stéréoscopiques grâce auxquelles le relief du terrain peut être restitué. Si leur champ de vision est plus étroit que celui des satellites SPOT, leur résolution spatiale, en revanche, atteint 50 centimètres, ce qui autorise un véritable zoom sur les zones observées. Précision, répétitivité, stéréoscopie, les images Pléiades ont tous les atouts pour la cartographie du tissu urbain, particulièrement hétérogène et soumis à des changements fréquents.



Les satellites Pléiades ont été développés sous la responsabilité du CNES, l'Agence spatiale française, mais parmi les pays partenaires du programme, la Belgique occupe une place importante. En retour de cette participation, la Politique scientifique fédérale peut offrir un quota d'images à tarifs préférentiels aux utilisateurs établis en Belgique qui remplissent une mission de service public, pour accomplir des tâches dans le cadre de cette mission et pour des services non marchands. Elle a donc mis en place un système de distribution et d'archivage de données Pléiades, appelé *Belgian Pléiades Archive*. Pour en savoir plus, visitez le portail [Belgian Pléiades Archive: pleiades.belspo.be](http://pleiades.belspo.be)

UN MAILLAGE VERT SANS ACCROC

Si l'aménagement du territoire nécessite de bons outils d'aide à la décision, c'est aussi le cas pour les politiques environnementales qui y sont intimement liées. Adhérant aux efforts collectifs de gestion "verte" et durable, les villes s'engagent à respecter une série d'impositions locales et européennes (Directive Habitats, Stratégie paneuropéenne pour la diversité biologique et paysagère, etc.).

La Région bruxelloise, par exemple, est soucieuse de préserver et d'entretenir le maillage vert qui quadrille la ville. En milieu urbain, les zones vertes remplissent de nombreuses fonctions : elles régulent la pollution et l'écoulement des eaux, elles constituent pour les citadins un poumon d'aération dans un tissu urbain très dense et, lorsqu'elles sont connectées, elles assurent la continuité des corridors écologiques qui libèrent le passage des espèces animales et végétales vers les zones vertes environnantes.

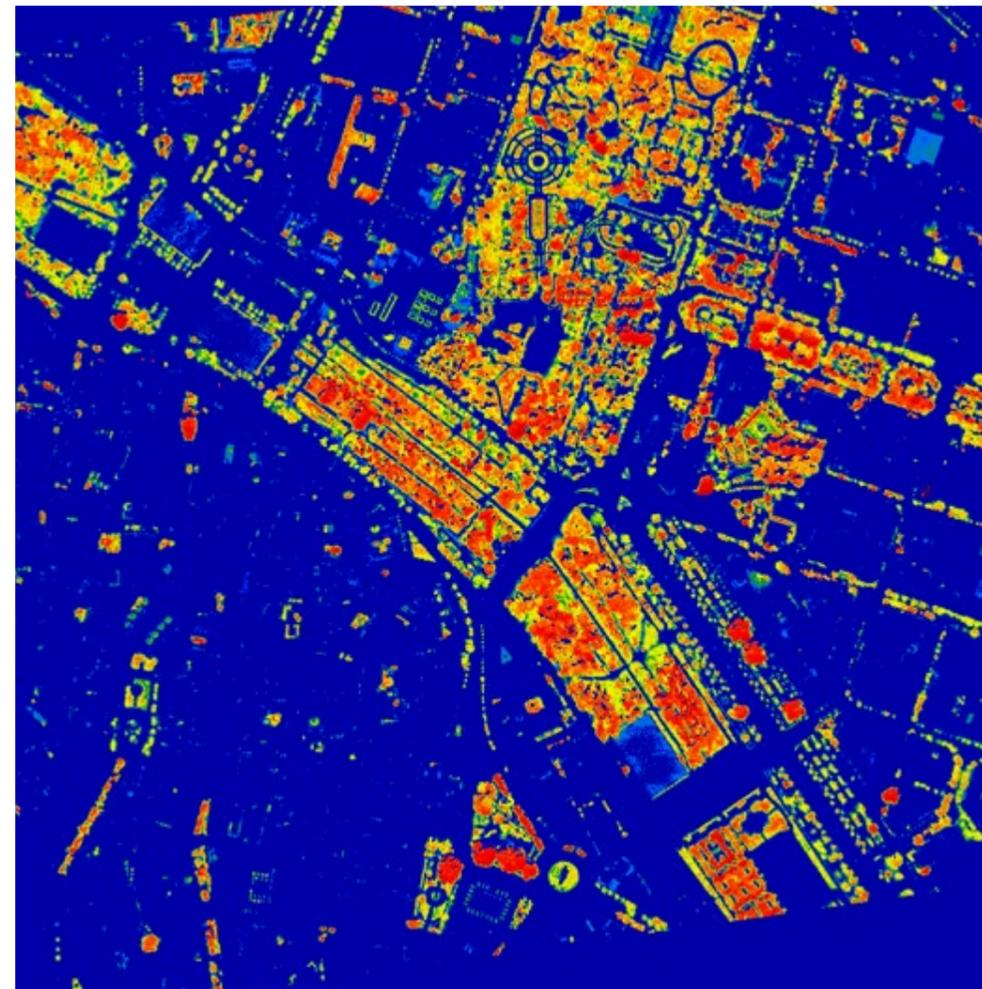
Pour obtenir une information à jour sur ces corridors, le projet **VALI-URB** a étudié comment caractériser et répertorier la totalité des espaces verts bruxellois : ceux de l'espace public mais aussi les éléments moins accessibles comme les toitures végétales, les sentiers privés, les jardins ou les parcs à l'intérieur des îlots. L'imagerie satellitaire offre en effet une vue de la totalité des superficies urbaines, y compris ces zones vertes hors d'atteinte. De plus, les satellites de dernière génération, comme Pléiades, fournissent des images de vastes étendues, avec une résolution qui atteint 50 centimètres, ce qui permet un

inventaire cartographique précis et l'analyse des changements. Les chercheurs, en combinant des données satellitaires à différentes échelles avec des cartes topographiques existantes, ont développé une méthode de cartographie des corridors écologiques consolidée et reproductible. Élaborée à Bruxelles, la méthode a été transposée et testée sur deux villes françaises de moyenne importance : Strasbourg et Rennes, et ce en partenariat avec des universités locales et certaines autorités intéressées par ces résultats pour la gestion de leur territoire.

LA VÉGÉTATION, SENTINELLE DE LA QUALITÉ DE L'AIR

La qualité de l'air est un autre grand défi urbain. Elle est localement influencée par l'agencement des rues et l'importance du trafic qui y circule. Les indices de qualité de l'air auxquels nous sommes maintenant habitués sont calculés à partir des concentrations de plusieurs polluants atmosphériques, mesurés séparément (CO_2 , NO_2 , SO_2 , ozone, etc.).

À la recherche d'une approche plus intégrée, le projet **BIOHYPE** s'est intéressé à la végétation urbaine, constamment exposée à l'ensemble des polluants. Le feuillage pollué, qui a accumulé les différentes substances pendant toute sa saison de croissance, ne réfléchit pas la lumière exactement de la même manière qu'un feuillage sain, non stressé. Son observation par télédétection pourrait donc être un bon indicateur du niveau de pollution, tout comme le canari suffoquant dans la mine de charbon donnait l'alerte sur le manque d'oxygène.



Pour la ville de Valence, les valeurs d'un index de végétation (extrait de données hyperspectrales) représentées en couleurs permettent de visualiser les arbres individuellement.

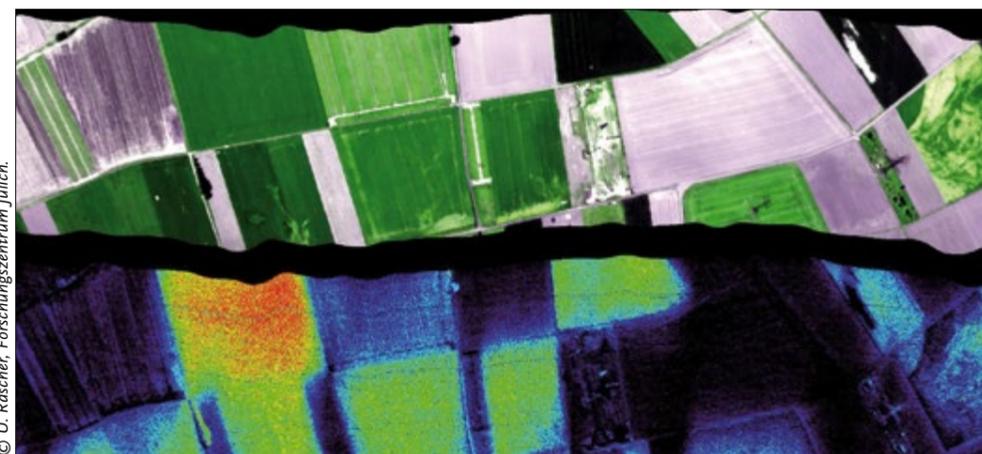
Mesure de la fluorescence chlorophyllienne induite par le rayonnement solaire grâce à un spectromètre portatif.



L'INDICATEUR À SUIVRE : LA FLUORESCENCE

Le projet, réalisé en collaboration avec l'Université de Valence en Espagne, a été mené sur deux sites d'étude, les villes de Gand et de Valence. Quatre espèces d'arbres courantes dans les rues de cette dernière ville ont été sélectionnées ; des échantillons d'arbres implantés dans des zones de trafic intense ont été observés et comparés à d'autres situés dans des zones plus calmes. Une batterie complète de mesures de réflectance ont été relevées soit directement sur le terrain, soit grâce à un spectromètre aéroporté. En plus du rayonnement solaire réfléchi, les plantes

émettent une radiation faible, la fluorescence chlorophyllienne. Les chercheurs ont pu mettre en évidence que celle-ci variait effectivement en corrélation avec l'intensité du trafic urbain. Les premiers résultats tendent donc à montrer que la fluorescence pourrait à terme devenir un bio-indicateur de pollution intéressant, par exemple pour orienter des politiques de protection des habitants et évaluer l'impact des mesures mises en place. L'Agence spatiale européenne prévoit d'ailleurs une mission spécifiquement consacrée à la fluorescence, avec le lancement du satellite **FLEX** – pour *Fluorescence Explorer*.



Fluorescence de différents types de végétation, capturée par le capteur aéroporté Hyplant, dans le cadre de la préparation de la mission FLEX de l'ESA.

LES FORÊTS, UN PATRIMOINE VITAL À PROTÉGER

Comment préserver les forêts ?

Comment soutenir les efforts

internationaux pour stopper

la déforestation ?

Quels outils développer

pour une gestion durable

des ressources forestières ?

La recherche en télédétection

explore ces questions

devenues capitales.

Les forêts couvrent plus de 4 milliards d'hectares, soit près d'un tiers des terres émergées de la planète. Si seulement 300 millions de personnes y vivent, plus d'un quart de la population mondiale, c'est-à-dire 1,6 milliards de personnes, dépendent des ressources forestières pour leur subsistance. Ce milieu exceptionnel assure de multiples fonctions qui motivent la communauté internationale à mettre en place une gestion durable des ressources forestières.

Au niveau économique, l'exploitation des forêts fournit chaque année plus de 3 milliards de m³ de bois et nourrit un commerce important de produits non ligneux : poissons, gibier, rotin, bambou, liège, résine, noix, champignons, épices, huiles essentielles, miel, etc.

Les forêts jouent également un rôle social de premier plan : quotidiennement utilisées à des fins de loisirs, d'activités récréatives, de tourisme, d'éducation et de conservation du patrimoine, elles sont partout un point de contact privilégié entre l'homme et la nature.

Au point de vue environnemental enfin, les écosystèmes forestiers sont au centre de processus fondamentaux.

Ils contribuent à :

- l'épuration de l'air (extraction des poussières, production d'oxygène par les forêts en accroissement) ;
- la préservation et la stabilisation des sols (protection contre l'érosion) ;
- la purification de l'eau (trois quarts de l'eau douce accessible provient des bassins versants des forêts) ;
- la régulation hydrologique (prévention du risque d'inondation grâce à leur capacité de rétention) et thermique (humidification et rafraîchissement de l'atmosphère ambiante grâce à l'évapotranspiration).

Ils offrent aussi des habitats très divers à la faune et à la flore, hébergeant ainsi 80 % de la biodiversité mondiale.

Depuis les années 1980, leur impact crucial sur la (dé)régulation du climat est mis en avant. Les écosystèmes forestiers (y compris la biomasse, le bois mort et le sol) "séquestrent" plus de 650 milliards de tonnes de carbone, soit plus que la totalité du carbone présent dans l'atmosphère. La déforestation massive, en particulier dans les grandes forêts primaires de la ceinture tropicale (Amazonie, Afrique centrale, Asie du Sud-Est), en libérant ces stocks de carbone, contribue à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc au réchauffement climatique. En 2008, sous l'égide des Nations Unies, l'initiative REDD a vu le jour (Réduction des émissions issues de la déforestation et de la dégradation des forêts), afin d'inciter les États concernés à préserver leurs forêts tropicales. Son principe est de donner aux pays en développement qui renoncent à la déforestation ou la réduisent, des compensations financières pour combler le manque

à gagner induit par ce renoncement. Le programme REDD a rapidement été élargi à REDD+ qui inclut la gestion durable des forêts, ainsi que des mesures de conservation et d'accroissement des stocks de carbone forestier par le biais de restaurations ou de nouvelles plantations. Ces initiatives s'inscrivent dans une volonté affichée au niveau international de freiner le déboisement (environ 13 millions d'hectares en moyenne chaque année, ce qui correspond à deux fois la superficie de l'Irlande), et de préserver durablement l'ensemble des bienfaits fournis par les forêts.

La recherche en observation de la Terre contribue à ces efforts en permettant le développement d'outils d'estimation et de surveillance plus performants, de l'échelle globale (bilan carbone, vastes changements du couvert, productivité...) jusqu'au niveau le plus local (étendue, composition, structure ou état sanitaire du peuplement).



Cet article se base sur les projets de recherche

VEGECLIM
UNESCO-WATCH
FOMO
GRAZEO
HYPERFOREST
ECOSEG



PUITS OU SOURCE DE CARBONE ?

Pour soutenir les programmes de réduction des gaz à effet de serre, il est essentiel de pouvoir quantifier et prévoir la dynamique de la végétation et des flux de carbone qui y sont associés. La végétation constitue en effet un puits de carbone primordial. Par la photosynthèse, elle assimile le CO₂ présent dans l'atmosphère pour produire de la matière organique et réduit ainsi la concentration des gaz à effet de serre responsables du réchauffement climatique. Mais les interventions de l'homme inversent la tendance. La déforestation et la dégradation des forêts constituent même les mécanismes majeurs de basculement de puits de carbone en sources de carbone. On estime en effet que les feux volontaires, l'exploitation non durable et la conversion des forêts en pâturages, terres agricoles et infrastructures diverses sont responsables d'environ 20 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, soit plus que la totalité du secteur des transports.

Ces perturbations anthropiques, bien qu'ayant un effet déterminant, étaient jusqu'à présent peu prises en compte dans les modélisations du cycle du carbone, notamment dans le modèle ORCHIDEE. Ce modèle global et dynamique de la biosphère continentale inclut des processus biophysiques, biogéochimiques et écologiques. Il prend en compte les flux de CO₂ et d'énergie entre le sol et l'atmosphère ainsi que certaines composantes hydrologiques et est exploité dans les grands modèles climatiques utilisés par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) ou par le programme REDD. Outre les perturbations anthropiques, la variabilité saisonnière et interannuelle des flux de carbone à l'échelle des régions tropicales constitue un autre paramètre à définir avec plus de précision.

Des réseaux de "tours à flux" fournissent des mesures des quantités de carbone échangées entre un écosystème (ici la forêt amazonienne) et l'atmosphère. Ces mesures, couplées à d'autres données, permettent de suivre en continu le devenir du CO₂ dans une forêt.



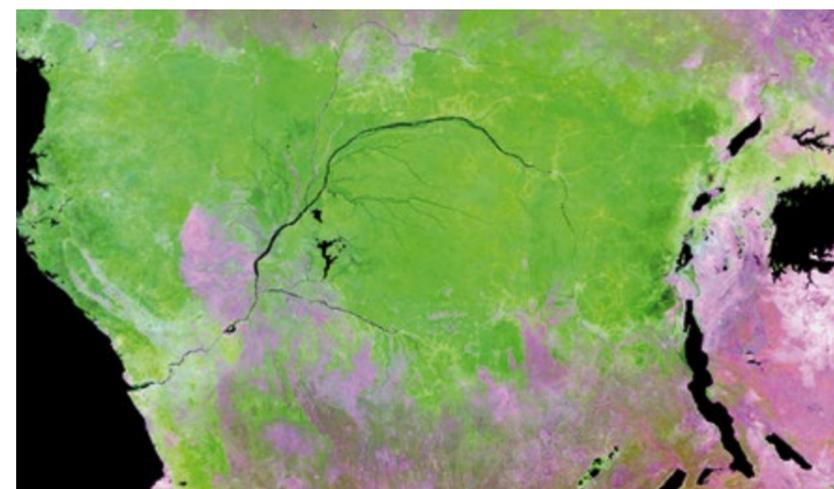
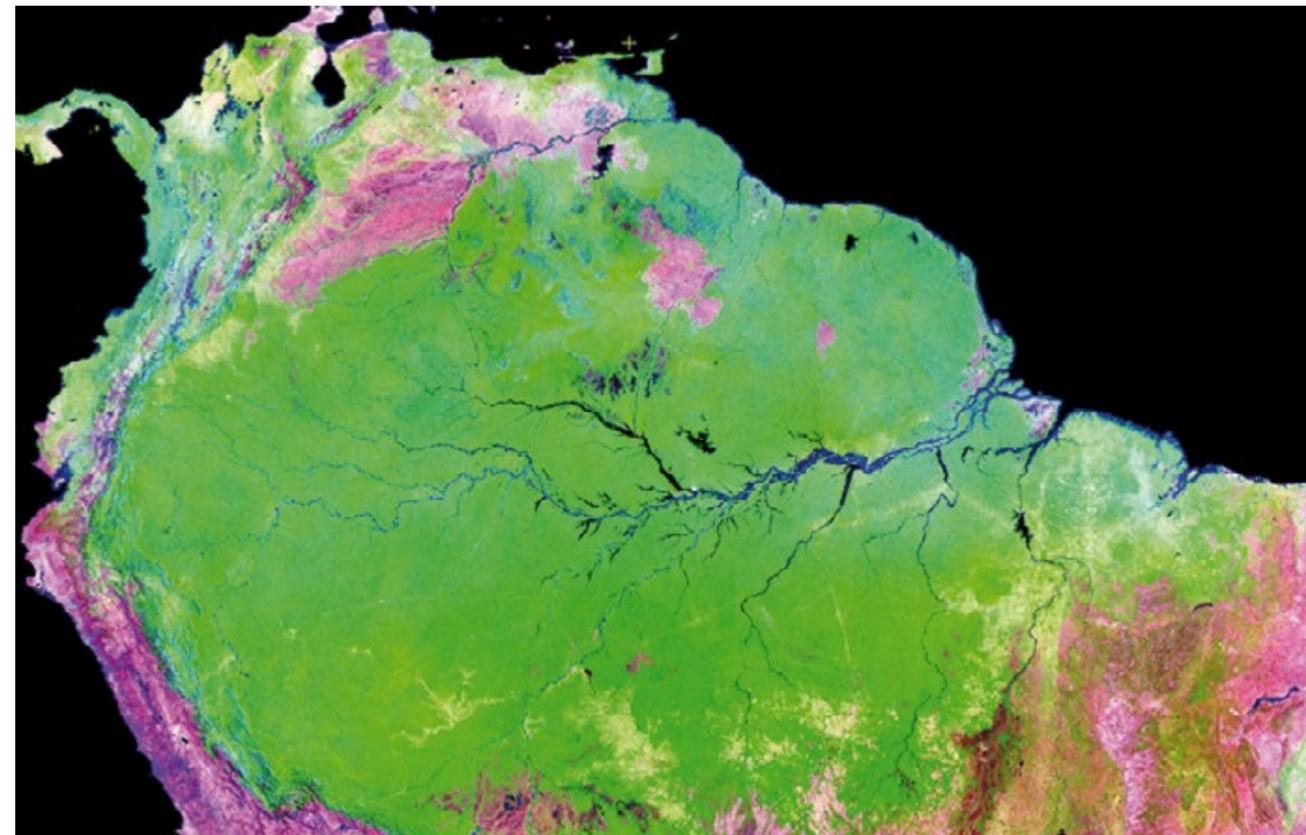
FORÊTS DU MONDE
VEGECLIM
UNESCO-WATCH
FOMO
GRAZED
HYPERFOREST
ECOSEG

Le but du projet **VEGECLIM** est d'améliorer la prévision du cycle du carbone terrestre dans les régions tropicales et ceci en intégrant de façon dynamique, dans le modèle global ORCHIDEE, les caractéristiques de la surface continentale obtenues à partir de 10 ans de séries temporelles d'images SPOT VEGETATION (type de végétation, évolution saisonnière et annuelle, zones sèches, coupées, brûlées, etc.). La principale innovation de ce grand projet de cinq ans est la mise en place d'une étroite collaboration entre les chercheurs en observation de la Terre et les experts en modélisation de la surface terrestre.

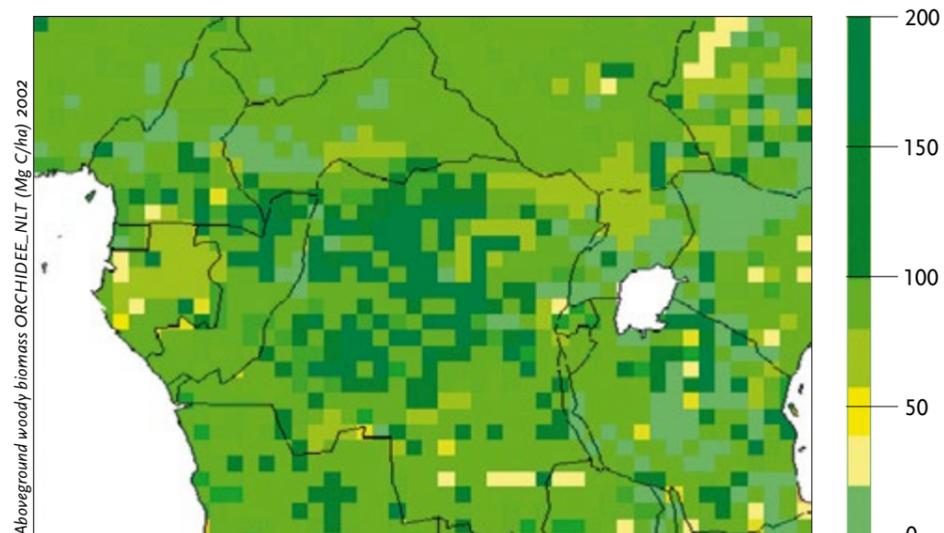
Traditionnellement les modèles globaux ou régionaux sont alimentés par des informations provenant de cartes existantes, de relevés de terrain, de données climatiques ou de données satellitaires de faible résolution (de l'ordre de 4 kilomètres) et statiques (à un moment donné). En intégrant dans le modèle ORCHIDEE la dimension temporelle et les classifications de sol plus précises dérivées de SPOT VEGETATION (1 kilomètre de résolution), les chercheurs ont pu améliorer l'estimation des stocks et des flux réels de carbone dans les bassins de l'Amazonie et du Congo.

Ils ont notamment testé le modèle avec les résultats de simulation de déforestation en République démocratique du Congo (RDC), afin d'établir des projections de l'évolution des stocks et des flux de carbone jusqu'en 2035 selon différents scénarios climatiques. Les avancées du projet **VEGECLIM** devraient donc permettre de déterminer si le bilan en carbone terrestre de la RDC reste négatif ou devient positif, faisant basculer la RDC de puits en source de carbone. Jusqu'ici relativement préservée, la forêt primaire d'Afrique centrale, deuxième massif forestier tropical après la forêt amazonienne, est en effet de plus en plus menacée par la dégradation et la déforestation, principalement au profit de l'exploitation industrielle. Les résultats obtenus contribueront donc à définir les politiques les plus pertinentes à adopter dans le cadre des mécanismes REDD+ ou d'autres stratégies d'atténuation des facteurs du changement climatique. L'étude pourrait d'ailleurs s'étendre à l'ensemble du bassin du Congo grâce à une modélisation optimisée des changements de la couverture des sols.

Outre ces résultats, deux produits globaux ont été mis à la disposition de la communauté scientifique : une carte pluriannuelle de la couverture terrestre et une base de données de référence sur la phénologie du feuillage. Par ailleurs, une carte globale des forêts du monde a été créée et utilisée comme pivot d'une exposition grand public destinée à attirer l'attention sur l'importance mais aussi la vulnérabilité des forêts.



Composites fausses couleurs des bassins de l'Amazonie et du Congo produits sur base d'images journalières SPOT VEGETATION. Pour le bassin du Congo, la carte donne la biomasse ligneuse aérienne (troncs, branches, feuilles...) en Mg C/ha, telle qu'estimée par le modèle ORCHIDEE.





L'EXPOSITION *IMAGING THE WORLD'S FORESTS*

À l'occasion de l'Année internationale des forêts, en 2011, l'exposition itinérante *Imaging the world's forests* a été réalisée conjointement par la Politique scientifique fédérale, le VITO (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek) et l'Université catholique de Louvain. Son objectif est de montrer au grand public l'utilité de l'observation de la Terre par satellite pour la gestion et la préservation des forêts du monde. Une série d'images satellitaires remarquables y mettent en évidence de grands enjeux actuels : déforestation et reforestation, feux de savanes et de forêts, mangroves menacées, etc. Une carte globale des forêts du monde, classifiées en 7 types principaux, a également été produite à partir d'images SPOT VEGETATION récoltées pendant 10 ans (2000-2010). L'exposition a circulé à Louvain, Bruxelles, Charleroi, Mons et dans les Centres régionaux d'initiation à l'environnement de la Région wallonne, et est toujours visible à l'Euro Space Center à Transinne, ainsi qu'en ligne sur le site eoedu.belspo.be/forests.



© Ricardo Eumari/BrazilPhotos.com



Les forêts tropicales ombrophiles de Sumatra en Indonésie font partie des sites du patrimoine forestier en péril. Sur cette image SPOT, on voit clairement que la déforestation, déjà importante dans la zone tampon, commence à grignoter les frontières du site.

AIDER L'UNESCO À SURVEILLER LES FORÊTS TROPICALES

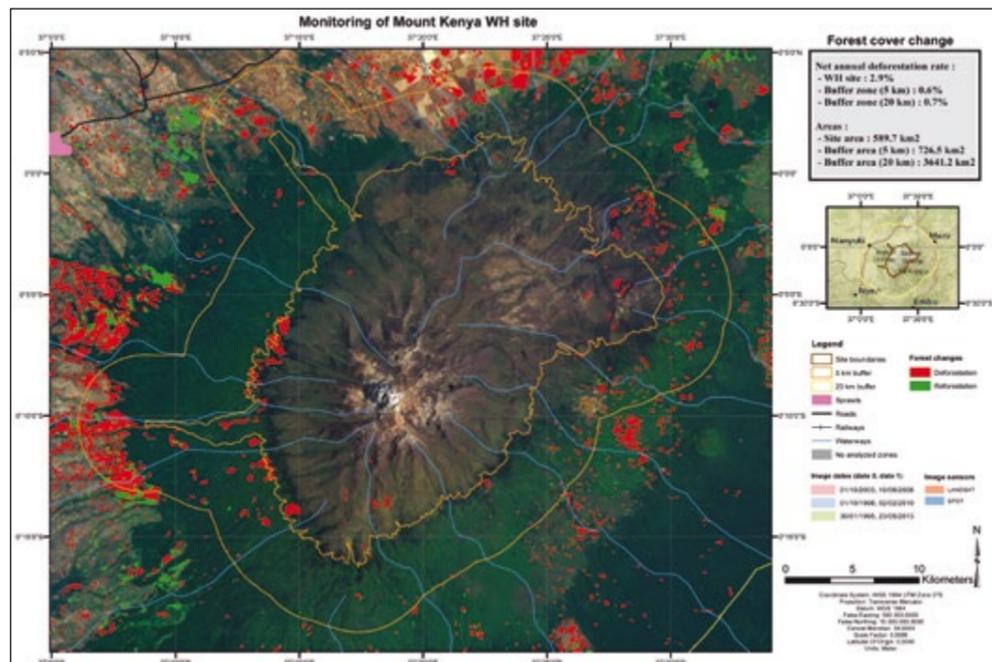
Les forêts tropicales ont une valeur naturelle et culturelle inestimable. Outre leur rôle primordial dans la régulation du climat et dans le cycle de l'eau notamment, elles constituent un réservoir de biodiversité sans pareil. Les forêts tropicales humides en particulier hébergent à elles seules plus de la moitié des espèces animales et végétales de notre planète. Afin de préserver cette richesse exceptionnelle, l'Unesco a déjà classé au rang de patrimoine mondial plus de 80 sites composés majoritairement de forêt tropicale humide. Si le Comité du patrimoine mondial décide du classement d'un site, il doit également en examiner l'état de conservation, de façon à pouvoir prendre des mesures lorsque le site est menacé. Or, l'évaluation annuelle de l'état de conservation des différents sites est rendue difficile par leurs superficies importantes et leur inaccessibilité. À titre d'exemple, 18 % seulement des sites inscrits au patrimoine mondial ont été évalués lors du Comité tenu en 2013.

Pour gérer et donc protéger au mieux ce précieux patrimoine, l'Unesco devrait disposer d'outils semi-automatiques de détection des changements. Le défi du projet **UNESCO-WATCH**

est par conséquent de développer une méthode opérationnelle basée sur l'imagerie satellitaire pour évaluer, à intervalles réguliers, l'état de conservation des forêts tropicales humides classées au patrimoine mondial. Afin d'observer les pressions externes s'exerçant sur ces sites, une zone tampon de 20 kilomètres a été tracée autour du périmètre du site protégé. Le suivi de cette zone tampon permet également de déterminer l'impact des mesures de protection aux alentours directs du site concerné.

Les chercheurs ont sélectionné 15 sites-tests qui diffèrent par leur type de végétation (des mangroves aux forêts de montagne), leur étendue (de 150 000 hectares à plus de 5 millions) et leur localisation géographique (répartis sur toute la ceinture tropicale). Au total, la superficie des sites analysés correspond à environ cinq fois la Belgique. Les sites choisis ont en commun une biodiversité exceptionnelle, certains hébergeant des espèces emblématiques comme le panda géant dans le Sichuan (Chine), le jaguar à Calakmul (Mexique) ou les gorilles du Parc des Virunga (en RDC). L'étude a analysé un très grand nombre d'images

Exemple d'un fichier pdf cliquable fourni aux gestionnaires de sites du patrimoine. Pour le site du Mont Kenya, les zones de déforestation sont marquées en rouge, les zones de reforestation en vert, le périmètre du site du patrimoine en brun foncé et celui de la première zone tampon (5 km) en brun clair.



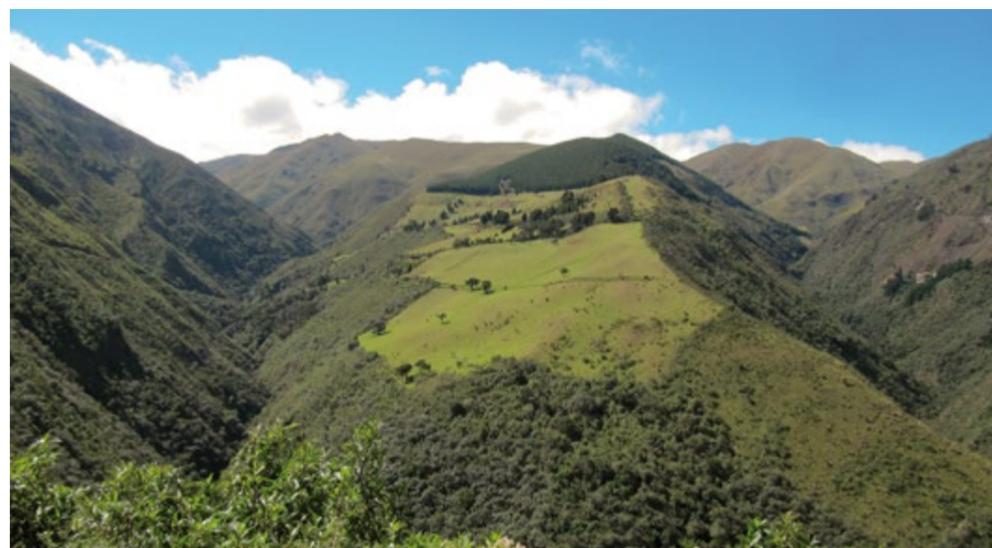
Landsat (30 mètres de résolution) et SPOT HR (10 mètres) couvrant trois périodes : les années 1990, 2000 et 2010. L'originalité du traitement des images consiste à regrouper des pixels voisins ayant des caractéristiques semblables, appelés objets. Ces objets ont une superficie moyenne d'un hectare. La détection de changement se réalise ensuite sur ces objets pour visualiser les variations par entités et non par pixels. Cette approche permet de tenir compte du contexte autour de chaque pixel et contribue à une meilleure caractérisation de la dynamique du changement.

À titre de prototypes, des cartes de 12 des sites sélectionnés ont été produites sous forme de fichiers pdf interactifs, afin de faciliter leur utilisation tant par l'Unesco que par les gestionnaires locaux. Ces cartes permettent de visualiser les changements du couvert végétal à l'intérieur de la zone protégée, qu'ils soient négatifs (déforestation, dégradation) ou positifs (refores-

tation, régénération), mais aussi d'identifier les menaces potentielles qui naissent le long de ses frontières (défrichage, déboisement, extension des terres agricoles, etc.).

INVERSER LE MOUVEMENT : LA REFORESTATION

D'une importance cruciale pour toutes les formes de vie, les forêts sont pour l'homme une source qui semble inépuisable de biens et de services écosystémiques. Si l'augmentation de la demande agro-alimentaire globale accélère la conversion des forêts en terres agricoles, dans certaines parties du monde pourtant le couvert forestier est en expansion. La "transition forestière" qualifie le passage de la déforestation à la reforestation. De nombreux pays industrialisés ont déjà expérimenté cette transition tandis que, dans la plupart des pays en développement, elle n'en est qu'à ses débuts ou n'a pas encore eu lieu.



Dans les Andes équatoriennes, la déforestation est clairement visible au centre de cette photo. Un peu plus haut, on discerne également des îlots de pins et eucalyptus, arbres exotiques replantés au détriment de l'écosystème naturel.

FORÊTS DU MONDE
VEGECLIM
UNESCO-WATCH
FOMO
GRAZED
HYPERFOREST
ECOSEG

Le projet FOMO a pour objectif d'évaluer la dynamique de ces transitions forestières, ainsi que leur impact sur les services écosystémiques. L'étude porte en particulier sur des régions montagneuses car l'abandon des terres agricoles et la régénérescence de la forêt se produisent le plus souvent sur des terres marginales c'est-à-dire peu productives et/ou à l'accès difficile. Afin de permettre une analyse comparative, trois sites ont été choisis dans des contextes géographiques très différents : les montagnes des Carpates en Europe de l'Est, les Andes du Nord en Équateur et une vallée au Bhoutan dans la chaîne de l'Himalaya.

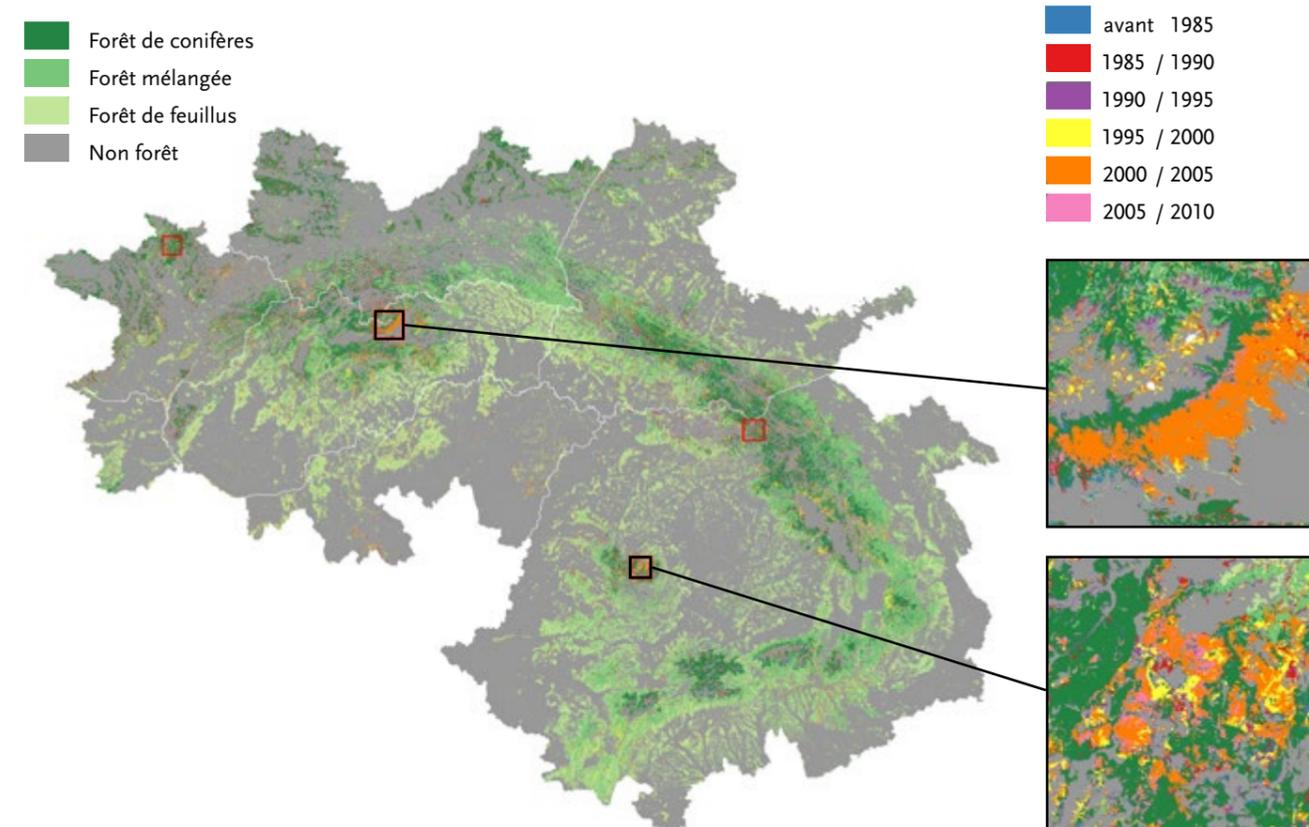
Pour développer des outils de suivi des changements du couvert forestier dans les régions montagneuses, l'imagerie satellitaire est une source d'information privilégiée. Elle fournit en effet des données détaillées, fiables, actualisées et à moindre coût sur des zones peu accessibles. Au terme de cinq ans, la recherche a mené à des avancées méthodologiques importantes :

- des techniques de correction atmosphérique et topographique (effets d'ombres) ont été optimisées pour les terrains montagneux. Le relief escarpé et accidenté perturbe en effet la "lisibilité" des images ;
- un processus automatique de cartographie du couvert forestier à large échelle a été développé à partir d'un assemblage d'images Landsat (30 mètres de résolution) ;
- des méthodes innovantes ont été mises au point pour détecter les changements du couvert

forestier sur des périodes courtes ou longues. Basées sur des images WorldView-2 à très haute résolution, ces méthodes sont suffisamment précises pour permettre d'identifier les espèces d'arbres. En Équateur, par exemple, les chercheurs ont pu déterminer la présence de bosquets de pins ou d'eucalyptus, des espèces exotiques qui ont été implantées au détriment de l'écosystème naturel à cette altitude, le paramo. Ces reboisements sont soutenus par le gouvernement pour favoriser la production de bois et participer aux efforts de séquestration du carbone dans le cadre des programmes de lutte contre le réchauffement climatique. Ces bénéfices sont néanmoins contrebalancés par une série d'effets négatifs tels que le déclin de la biodiversité et une diminution de la capacité à emmagasiner l'eau, ce qui entraîne une perturbation de la régulation des débits d'eau et une menace potentielle pour la stabilité des pentes après les récoltes.

Le projet FOMO a ainsi d'une part mis en évidence les liens qui existent entre les changements du couvert forestier et la prestation des services écosystémiques et d'autre part produit des outils de détection et de quantification de ces liens. Ces résultats constituent un apport important pour les décideurs et les gestionnaires des écosystèmes forestiers, que ce soit au niveau local, régional, national ou global. Ils peuvent en effet les aider à adopter des stratégies d'utilisation des terres plus adaptées à une gestion durable des ressources fournies par les forêts.

Carte des forêts de la chaîne des Carpates réalisée à partir d'une mosaïque d'images Landsat. Les encarts permettent de visualiser le détail des perturbations subies par les forêts entre 1985 et 2010 (en vert, les zones stables, les autres couleurs correspondent à des périodes différentes de perturbations).



QU'EST-CE QU'UNE FORÊT ?

Selon les définitions de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), les forêts sont "des terres portant un couvert arboré supérieur à 10 % sur une superficie de plus de 0,5 hectare. Les arbres devraient pouvoir atteindre une hauteur minimale de 5 mètres à maturité". Quant aux forêts primaires, elles sont "des forêts formées d'espèces indigènes où aucune trace d'activité humaine n'est clairement visible et où les processus écologiques ne sont pas sensiblement perturbés."

Par ailleurs, la Conférence ministérielle pour la protection des forêts en Europe, tenue en 1993 à Helsinki, définit la gestion durable des forêts comme "la gestion et l'utilisation des forêts et des terrains boisés d'une manière et à une intensité telles qu'elles maintiennent leur diversité biologique, leur productivité, leur capacité de régénération, leur vitalité et leur capacité à satisfaire, actuellement et pour le futur, les fonctions écologiques, économiques et sociales pertinentes aux niveaux local, national et mondial, et qu'elles ne causent pas de préjudices à d'autres écosystèmes."



LA SAVANE, UNE FORÊT PARTICULIÈRE

Parsemée d'une basse végétation d'arbres et d'arbustes, la savane est un type particulier de forêt qui requiert des outils spécifiques de surveillance. Le projet **GRAZEO** s'est focalisé sur le Parc national Kruger en Afrique du Sud, dont les savanes s'étendent sur plus de deux millions d'hectares. Le projet met l'accent sur la structure, la composition et la qualité de la végétation naturelle, des facteurs clés de l'habitat et du comportement des grands herbivores locaux.

L'objectif principal de **GRAZEO** est en effet d'améliorer les modèles développés par le projet **EPISTIS** (voir section Épidémiologie, page 70) pour estimer le risque de transmission de la fièvre aphteuse entre les buffles sauvages confinés dans la réserve animalière et le bétail situé en dehors. L'abondance et la qualité du fourrage sont des paramètres déterminants pour la distribution du bétail et des buffles dans les pâturages de savane. Leur évaluation, couplée au risque

de destruction des clôtures, permet donc de mieux cerner les risques de contact entre ces deux populations.

Dans cette optique, **GRAZEO** a exploré le potentiel des données WorldView-2 pour la cartographie des espèces d'arbres (solitaires ou en bosquets), des surfaces enherbées, de la biomasse herbacée ainsi que de la concentration en azote, tous des indicateurs de disponibilité et de qualité du fourrage. Ces indicateurs sont ensuite introduits dans des modèles adaptés et divers scénarios sont testés afin de déterminer leur contribution dans l'estimation des risques de contact.

En tirant profit des avantages du capteur WorldView-2, les chercheurs ont pu développer de nouvelles méthodes permettant la production de cartes régionales détaillées pour les environnements de savane, jusqu'alors généralement non disponibles. La très haute résolution spatiale



La différence de couverture végétale entre l'intérieur et l'extérieur du Parc Kruger est clairement visible sur cette photo. Au sein du Parc (à gauche), les gestionnaires maintiennent une végétation de type savane tandis que de l'autre côté des barrières, la végétation naturelle est intacte.

des images (de l'ordre de 50 centimètres) permet de faire face à la grande variabilité spatiale des savanes (alternance de prairies herbeuses et de bouquets d'arbres) et est compatible avec les distances parcourues par les animaux.

Le capteur offre également une diversité spectrale particulière : en plus des bandes spectrales usuelles du visible et du proche infrarouge, 4 canaux supplémentaires sont disponibles, parmi lesquels le jaune et le red-edge qui autorisent une meilleure discrimination arbres/herbe.

Les résultats de **GRAZEO** servent en première instance à combattre la propagation de la fièvre aphteuse autour du Parc Kruger. L'objectif est de fournir aux gestionnaires du Parc l'information nécessaire pour adapter la lutte contre cette maladie très contagieuse, en leur permettant

notamment de localiser les zones prioritaires d'intervention (vaccination, renforcement des clôtures, etc.).

Mais la portée des résultats dépasse ce cas d'étude. La méthodologie et les produits développés peuvent en effet être utilisés pour le suivi des changements au niveau régional dans tous les écosystèmes de savane.

Ils devraient aider à mieux comprendre l'impact sur ces écosystèmes particuliers de facteurs environnementaux locaux (utilisation des sols, densité du bétail et des autres populations d'animaux, feux de brousse) ou globaux (l'évolution climatique).



DES PEUPELEMENTS EN 3D

Une gestion durable de la forêt ne peut se concevoir sans un suivi de son état général. Les gestionnaires forestiers doivent disposer de données fiables et régulièrement mises à jour sur des paramètres importants comme la diversité des peuplements, les espèces qui les composent et la vitalité des arbres. Le travail de récolte de données sur le terrain, autrefois long et fastidieux, est actuellement de plus en plus soutenu par des instruments de télédétection aéroportés de différents types. L'imagerie hyperspectrale, par exemple, se montre utile pour identifier les espèces d'arbres et appréhender l'état sanitaire du feuillage, mais ses observations ne portent que sur la partie supérieure de la forêt, la canopée. Le LiDAR, capteur actif émettant un faisceau laser, fournit quant à lui, de l'information en 3D sur la structure de la forêt (hauteur des arbres, présence de sous-étages) et sur sa densité.

Le projet **HYPERFOREST** a cherché à déterminer si l'information en trois dimensions offerte par le LiDAR peut enrichir le traitement des images hyperspectrales de façon à pouvoir fournir aux gestionnaires forestiers une information plus fiable et plus détaillée.

Les chercheurs ont sélectionné trois sites forestiers situés en Flandre et présentant une structure de complexité croissante : la réserve intégrale Kersselaerspleyn, en Forêt de Soignes, qui présente un peuplement homogène de hêtres ; la Forêt de Wijnendale, l'un des plus importants domaines forestiers de Flandre occidentale, où l'essence dominante, le chêne, côtoie des érables, hêtres, noisetiers, mélèzes... ; et l'Aelmoeseneiebos, la forêt expérimentale de l'Université de Gand aux essences mixtes (chêne, hêtre, frêne, mélèze...) et au sous-bois foisonnant.

Mené durant cinq ans, le projet a livré des résultats concrets, largement documentés et publiés :

- la correction géométrique des images hyperspectrales a pu être améliorée. La hauteur d'un arbre provoque en effet un déplacement de sa position sur une image hyperspectrale. Grâce au LiDAR, cette composante verticale peut être prise en compte et l'emplacement de la couronne peut donc être déterminé avec plus de précision ;
- les informations supplémentaires fournies par le LiDAR ont également permis d'améliorer la classification des espèces d'arbres et de déterminer plus précisément le degré de fermeture du couvert, qui est un indicateur important de l'état de la forêt ;
- d'autres apports des données LiDAR ont été mis en évidence. Celles-ci permettent notamment de déterminer si une partie de la couronne est exposée au soleil ou non, l'identification de l'espèce étant plus difficile dans ce dernier cas. Elles se montrent aussi utiles pour mieux délimiter les couronnes d'arbres.

Pour affiner encore les résultats, le projet **HYPERFOREST** a exploité, parallèlement aux données aéroportées, deux autres sources d'information. D'une part, un capteur LiDAR placé au sol qui aide à générer une représentation plus claire de la strate inférieure de la forêt. D'autre part, un modèle complexe dénommé DART qui permet de relier le signal hyperspectral enregistré et les propriétés biophysiques et biochimiques de la végétation, ces dernières influençant de manière directe l'état sanitaire des arbres.

Par l'intermédiaire de l'Institut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO), l'un des partenaires du projet, les gestionnaires de forêts ont été impliqués dans toutes les étapes de l'étude. Ils ont non seulement collecté des données de référence sur le terrain mais ont également veillé à la pertinence des recherches pour les utilisateurs finaux. Les types de produits et d'applications à mettre au point ont sans cesse été discutés et adaptés aux besoins réels (par exemple la cartographie des espèces et le degré de fermeture du couvert). Les résultats finaux ont d'ailleurs été présentés aux utilisateurs à l'occasion d'un workshop qui leur était destiné.

La Forêt de Wijnendale vue par le capteur hyperspectral APEX en fausses couleurs et en couleurs réelles. L'image fausses couleurs est produite à partir des valeurs enregistrées dans 3 longueurs d'ondes précises situées dans le proche infrarouge, dans le rouge et dans le bleu.

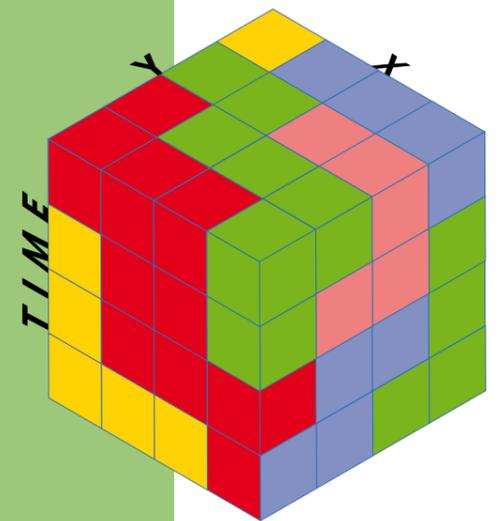
La végétation apparaît en rouge et les différentes tonalités de rouge traduisent soit différents stades d'évolution, soit des espèces différentes.

CARTOGRAPHIER LA DYNAMIQUE

Plusieurs études ont déjà exploré l'utilité des séries temporelles d'images satellitaires pour suivre l'évolution de la végétation. La majorité des techniques traditionnelles comparent les réponses spectrales d'un ensemble de pixels donné sur une période donnée, par exemple tous les mois durant 10 ans. Mais ces approches ne prennent en général pas en compte ni le contexte spatial (la valeur des pixels ou groupes de pixels voisins), ni le contexte temporel (les valeurs des mêmes pixels à des périodes différentes). De plus, ces procédures se basent rarement sur une classification hiérarchique, c'est-à-dire qui regroupe les données, de niveau en niveau, en segments similaires. Elles ne parviennent donc pas à mettre en évidence les mécanismes spatio-temporels complexes qui sont à l'œuvre dans la nature, où la plupart des processus écologiques sont reliés spatialement et organisés de façon hiérarchique.

L'objectif du projet **ECOSEG** est par conséquent de développer une méthode de classification optimisée qui inclut l'information temporelle dans la segmentation hiérarchique de l'image. De manière innovante, le projet tente d'intégrer le contexte d'un pixel dans toutes ses composantes (spectrale, spatiale et temporelle) afin de pouvoir préciser sa classification dans un niveau hiérarchique inférieur.

Le milieu forestier constitue un environnement idéal pour valider une telle méthode, du fait de la complexité de ses réponses, tant spatiales que temporelles, aux facteurs de stress (par exemple, les insectes et autres agents pathogènes, la sécheresse, les feux). Des séries temporelles de plusieurs paramètres biophysiques ont donc été utilisées comme indicateurs clés de la santé des forêts. Au terme du projet, les chercheurs ont développé une méthodologie et un algorithme qui devraient permettre de déterminer avec plus de précision la dynamique des écosystèmes forestiers et donc de mieux comprendre leur fonctionnement.



Cet article se base sur les projets de recherche

APLADYN
ANAGHLIA



VOIR LE PASSÉ GRÂCE AUX TECHNIQUES D'AVENIR

Jusqu'ici peu exploitée dans le domaine de l'archéologie, la télédétection se positionne comme une technique intéressante pour mieux connaître et donc mieux préserver les sites, mais aussi pour découvrir des vestiges du passé non détectés par les méthodes plus traditionnelles.

Si la gestion agricole ou l'aménagement du territoire ont déjà assimilé dans leurs pratiques l'usage de la télédétection, il s'agit d'une approche plus récente dans le domaine de l'archéologie. Traditionnellement, la collecte d'information y provient surtout d'innombrables sondages, patiemment et laborieusement effectués, avec l'appui de cartes et de photos aériennes qui donnent une vue d'ensemble. Or aujourd'hui, les instruments satellitaires offrent des résolutions spatiales et spectrales qui ne cessent de s'améliorer. Des équipes de recherche tentent donc d'explorer la valeur ajoutée qu'ils pourraient apporter par la précision, la rapidité et l'étendue de leurs observations.

LES PYRAMIDES MENACÉES

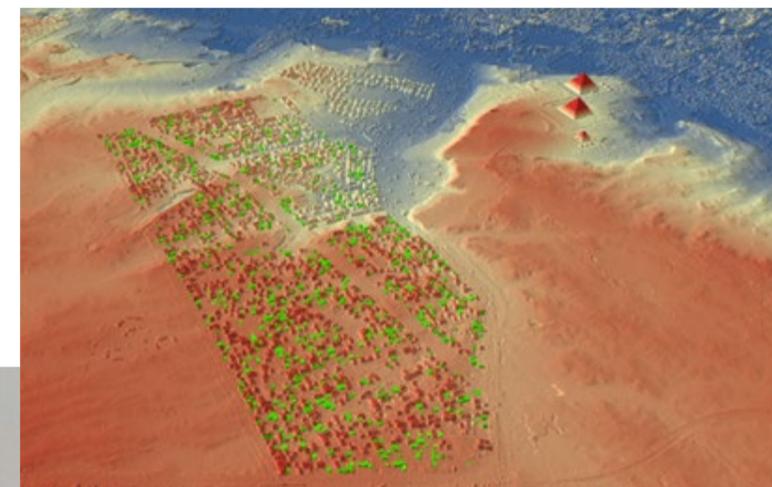
Le projet **APLADYN** s'est concentré sur la vallée du Nil et le site archéologique par excellence, les pyramides de Gizeh. À l'image d'autres grands ensembles fluviaux, le Nil est l'axe d'une vallée fertile mythique, qui a abrité l'émergence et l'expansion de trois millénaires de civilisation égyptienne. Pour le chercheur comme pour le commun des mortels, le patrimoine culturel et naturel qu'il recèle est inestimable.

Mieux comprendre la dynamique des lieux, et les liens tissés entre l'homme et son environnement, donne certainement des clés pour étudier

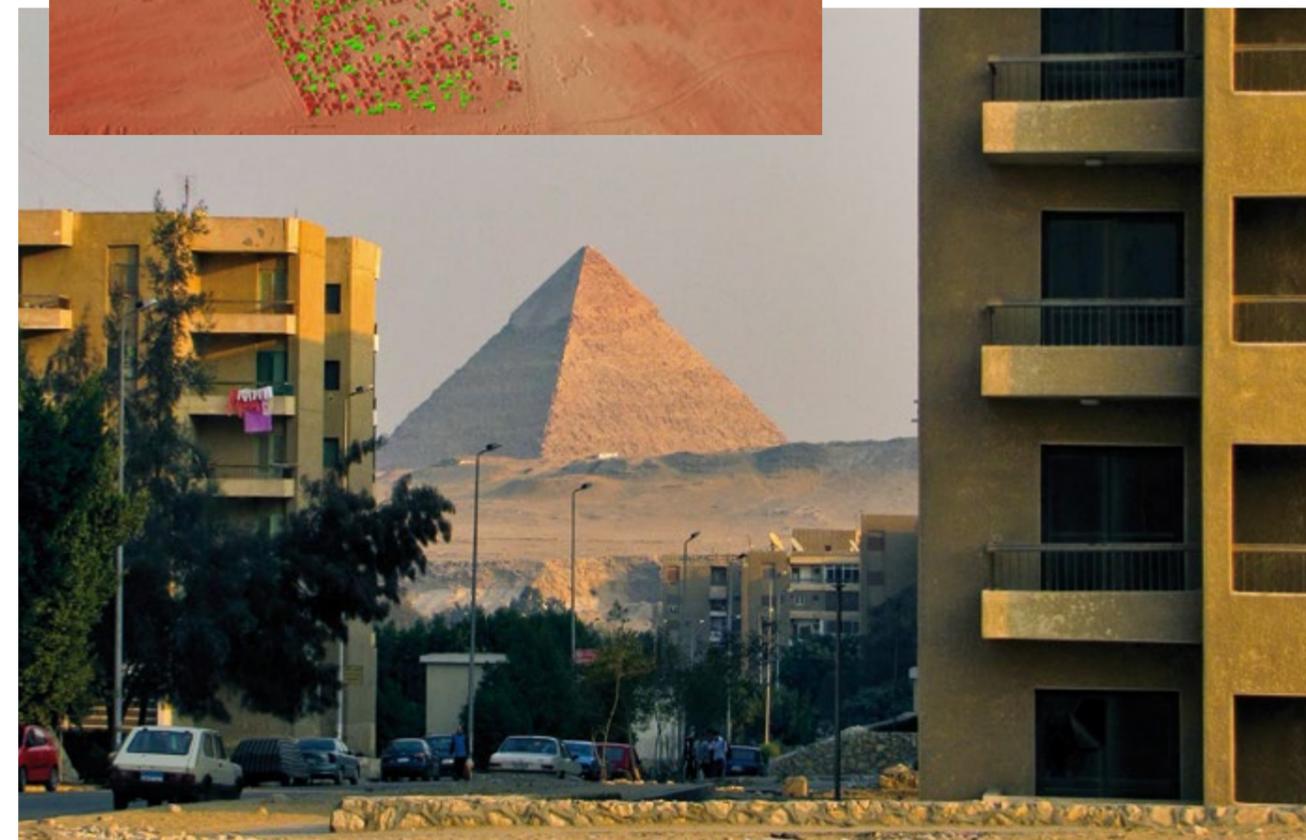
le passé. En déterminant, par exemple, où passaient les anciens chenaux et le lit du fleuve, on peut localiser plus justement les zones probables d'occupation humaine dans l'Antiquité.

L'observation fine du paysage donne également des clés pour l'avenir, en précisant les menaces qui pèsent sur ces sites uniques. De nouvelles méthodes intégrant les données de télédétection ont permis de mettre en évidence la croissance rapide de l'urbanisation du Caire, mais aussi la migration des dunes de sable qui avanceraient en moyenne de 4 mètres par an. En mettant en parallèle les images Landsat des 40 dernières années, l'équipe scientifique a montré que cette progression manifeste des dunes ne parvient toutefois pas à compenser l'extension continue des terres agricoles de la plaine fertile vers le désert. La télédétection a donc aidé à quantifier à la fois les risques d'ensablement et la pression anthropique.

Grâce aux méthodes développées, estimer la progression de ces phénomènes devient possible en extrapolant les changements futurs à partir des évolutions passées. De tels modèles sont indispensables aux responsables locaux pour prendre les mesures de sauvegarde qui s'imposent.



Un modèle numérique d'élévation a été créé en comparant deux sets d'images stéréoscopiques à haute résolution. Il permet de mettre en évidence et de quantifier la dégradation du plateau de Gizeh par les nouveaux lotissements qui s'implantent. Pour le quartier appelé "Pyramid Gardens" (Hada`iq al-Ahram), situé au sud-ouest du site archéologique, les constructions érigées entre 2009 et 2011 sont colorées en vert.



LA CHASSE AU TRÉSOR ARCHÉOLOGIQUE

Identifier de façon automatique, en tout point du globe, une zone à haut potentiel archéologique est bien entendu l'un des objectifs poursuivis par les chercheurs. Les activités humaines du passé lointain ont laissé des traces dans la composition des sols, et celles-ci peuvent se traduire par des modifications du couvert végétal. Parvenir à caractériser ces traces est un défi passionnant, exploré par le projet **ANAGHLIA**.

La richesse archéologique étant intimement liée au relief du paysage, il est important d'obtenir une topographie détaillée du site étudié. C'est pourquoi les chercheurs intègrent dans leurs méthodes les données LiDAR : ce système actif balaie de son signal laser les surfaces survolées, même à travers les nuages ou la végétation. Le signal retour est intercepté et renseigne sur la position et l'altitude de milliers de points

de contact au sol, fournissant ainsi le contexte (micro)topographique nécessaire à l'analyse et l'interprétation des signaux spectraux.

Par ailleurs, l'importante quantité d'information fournie par les données hyperspectrales permet de mettre en évidence certaines propriétés géo-physiques du sol indiquant que le site a probablement été occupé jadis : la présence de particules de charbon de bois, d'infimes fragments de terre cuite ou une quantité de matière organique anormalement élevée font partie des éléments recherchés. En combinant de façon innovante les deux sources d'information, les chercheurs comprennent mieux comment les vestiges existants se distribuent à la surface du sol, et comment les éléments du paysage peuvent les exposer ou au contraire les dissimuler.



Pour le projet ANAGHLIA, deux zones d'étude très contrastées ont été choisies. L'une d'elles est le bassin versant du Raganello en Calabre où ont été découverts plus de 150 sites archéologiques datant principalement de l'âge du bronze et des périodes hellénistiques.

SOUPLE, RAPIDE ET BON MARCHÉ : LE DRONE

Autre apport technologique, pour valider ces résultats avec des mesures prises sur le terrain, sans y consacrer un temps considérable, l'UAV (Unmanned Aerial Vehicle) se montre très utile. Mieux connu sous le nom de drone, cet engin télécommandé embarque une caméra ou un appareil photo. La programmation des paramètres à enregistrer et les modifications de trajectoire se font très aisément.

Cette facilité de programmation, sa maniabilité et son coût relativement faible expliquent le récent succès du drone. Désormais il n'est en effet plus rare de voir un centre de recherche académique ou un organisme privé s'équiper de son propre drone d'observation.



BIODIVERSITÉ, UNE RICHESSE À PRÉSERVER

Pour tenter d'enrayer le recul de la biodiversité, une approche nouvelle se met en place. Pluridisciplinaire, à large échelle et intégrée, elle propose d'observer l'écosystème de manière globale, dans toute sa complexité. Au service de cette démarche dite écosystémique, la télédétection s'avère un outil de premier choix.

La biodiversité continue à perdre du terrain, menacée par le réchauffement climatique et les activités anthropiques. L'Union internationale pour la Conservation de la Nature annonce des chiffres alarmants : ce sont près de 30 % des espèces répertoriées qui seraient menacées d'extinction. Pour espérer freiner le phénomène, les efforts de conservation doivent s'intensifier et gagner en efficacité. Réseau écologique panaméricain, corridor climatique australien, convention alpine, trame verte française ou réseau européen Natura 2000... les projets de grande envergure se multiplient.

Pour ces grands projets comme pour des initiatives plus locales, l'approche globale est maintenant privilégiée ; l'écosystème est appréhendé dans son entièreté. Dans cette perspective, les images satellitaires ont un rôle à jouer. Elles combinent en effet des avantages non négligeables pour le monitoring de la biodiversité : obtenues par une technique non-invasive, elles permettent l'observation de grandes étendues et ceci à des résolutions de plus en plus fines. De plus, la répétitivité des prises de vue permet aux chercheurs de disposer d'une palette d'informations tout au long de l'année et des saisons.

Un mode d'acquisition en particulier, l'imagerie hyperspectrale, s'impose naturellement pour l'étude de la biodiversité. Véritable révolution technologique, elle offre aux chercheurs des données bien plus précises et nombreuses que l'imagerie multispectrale classique. Une incroyable masse d'informations à la disposition des scientifiques mais également un véritable challenge quand il s'agit de les traiter et les stocker. Après de nombreuses explorations méthodologiques et de mises au point de procédés de traitement et d'analyse des images hyperspectrales, les chercheurs les utilisent dorénavant pour des études appliquées. Les équipes belges nous livrent des résultats concrets dans le domaine de la biodiversité.

UNE ÉVALUATION TOUS LES SIX ANS

En Europe, protéger la biodiversité est devenu une priorité. Afin de définir un cadre d'action

commun, le réseau Natura 2000 a été institué dès 1992. Chaque pays dresse une liste de sites d'intérêt et s'engage à surveiller de manière continue leur état de conservation. Tous les six ans, un rapport d'évaluation doit être fourni à la Commission. Cet engagement implique un travail de collecte de données de terrain considérable, à la fois coûteux et fastidieux. Dans un souci d'efficacité, les organismes de contrôle devraient idéalement pouvoir s'appuyer sur des outils pratiques et fiables, comme des cartes détaillées et récentes, des indicateurs de qualité des habitats identifiés, ou des modèles liant des types d'habitat précis à des zones de végétation. Les 18 chercheurs belges et néerlandais du projet **HABISTAT** ont travaillé sur le sujet pendant plus de quatre ans et demi. Leur objectif : développer une méthode permettant d'obtenir une carte détaillée des habitats et des indicateurs de leur qualité, grâce à des données hyperspectrales.

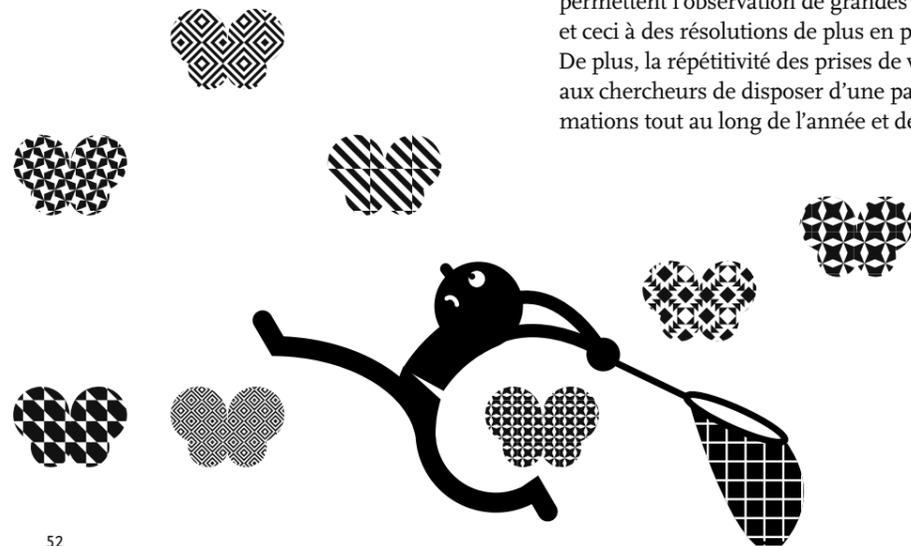


L'image hyperspectrale en couleurs vraies du site Kalmthoutse Heide acquise en juin 2007 et la carte des habitats obtenue par la méthode HABISTAT.

- Landes psammophiles sèches
- Landes sèches
- Dunes intérieures avec pelouses ouvertes
- Landes humides atlantiques septentrionales
- Landes sèches européennes
- Eaux et milieux aquatiques
- Forêts
- Habitat non N2000
- Landes à molinie

Cet article se base sur les projets de recherche

HABISTAT
RE-LEARN
ESSENSE
HEATHRECOVER
VEGEMIX
REMEDY



NATURA 2000, UN PROJET DE GRANDE AMPLEUR

Le réseau européen Natura 2000 a pour objectif d'identifier, de surveiller et de protéger les sites naturels et semi-naturels qui présentent un intérêt régional ou communautaire, en raison du caractère exceptionnel de la faune et/ou de la flore qu'ils abritent. Ces sites, qu'ils soient sur terre, sur les côtes ou en pleine mer, nécessitent une protection accrue et une gestion toute particulière. Les acteurs du réseau sont aussi nombreux que variés : chercheurs, administrations, agriculteurs, citoyens, etc. Le réseau Natura 2000 est l'expression même de la volonté d'adopter une approche plus globale pour la préservation de la biodiversité. Les populations animales et végétales ne connaissent en effet pas de frontières. Une connaissance élargie de leurs besoins est plus que jamais nécessaire pour accélérer les efforts de conservation et de restauration.



LES HABITATS CARTOGRAPHIÉS

Le projet s'est concentré sur trois sites du réseau Natura 2000 qui abritent un écosystème de landes : Kalmthoutse Heide au nord d'Anvers, Ginkelse et Eder Heide aux Pays-Bas. Le premier défi des chercheurs était de classer finement les habitats présents dans cet écosystème. Ils sont en effet très diversifiés mais leur structure n'est déterminée que par un nombre limité d'espèces végétales abondantes. Hormis quelques exceptions, il n'existe pas de relation univoque entre une espèce et un type d'habitat, ce qui empêche toute classification directe.

L'innovation fut donc de cartographier d'abord les espèces dominantes à un niveau de détail très élevé, puis de les réarranger en habitats, en tenant compte de leur répartition spatiale. Les chercheurs ont ainsi pu passer de 6 larges classes d'habitats (lande, surface herbeuse, dune, etc.) à 27 sous-classes beaucoup plus spécifiques et donc plus utiles pour la gestion des lieux.



La méthode a été testée avec succès sur les trois sites étudiés. Pour Kalmthoutse Heide, les responsables de la réserve naturelle ont pu disposer de cartes d'une précision inégalée. La résolution des cartes atteint en effet 2,5 m (1 pixel sur la carte correspond à un carré de 2,5 m de côté sur le terrain), soit bien mieux que ce qui est obtenu par les méthodes traditionnelles. Grâce à cela, ils ont pu évaluer visuellement les effets de mesures telles que le fauchage, le pâturage ou la tonte sur la conservation de l'écosystème. Ils ont également pu délimiter les zones où il était nécessaire d'intervenir pour éviter une dégradation du site. Suivi de nombreuses publications et de deux workshops internationaux, le projet a suscité un grand intérêt. La méthodologie peut donc être mise à l'épreuve et appliquée à plusieurs autres sites européens.

UNE ALTERNATIVE À LA COLLECTE DE TERRAIN

Dans la continuité du projet **HABISTAT**, en gardant en perspective le reporting obligatoire de Natura 2000, le projet **RE-LEARN** a cherché comment réduire au strict minimum le recours au travail de terrain. Une des solutions proposées est de réutiliser des données de référence existantes. Les chercheurs travaillent donc au développement d'un outil qui ne nécessite pas d'apport de nouvelles données de référence pour cartographier la végétation. Deux types de données existantes peuvent être exploitées : soit des données collectées par le passé sur le site-même, soit des données collectées sur un site différent, mais présentant une végétation similaire. La technique a par exemple permis d'effectuer une classification d'une image hyperspectrale normalement inutilisable car largement recouverte par l'ombre d'un nuage.

L'un des avantages majeurs de cette approche est la possibilité de cartographier des régions difficiles d'accès, en combinant des images satellitaires et des données de référence récoltées dans des sites abritant des écosystèmes similaires. Le précieux outil devrait s'avérer très utile aux organisations en charge de la surveillance du réseau Natura 2000, mais également à toute la communauté scientifique utilisant la télédétection.

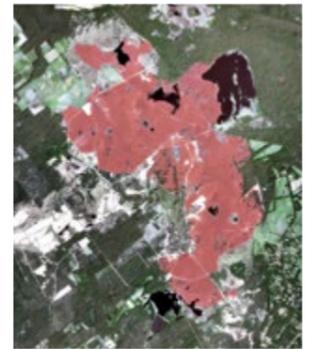


Photo aérienne et carte des zones brûlées de la réserve du Kalmthoutse Heide, après l'incendie ravageur du mois de mai 2011.

LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES SOUS SURVEILLANCE

Depuis son apparition dans les années 1970, le concept de service écosystémique s'est imposé dans l'arène scientifique et politique. Il est en parfaite adéquation avec l'orientation holistique (ou globaliste) adoptée dans le domaine de la protection de la biodiversité. Pour préserver au mieux les innombrables services rendus à l'homme par les écosystèmes, l'idéal serait de pouvoir les cartographier. En partenariat, les chercheurs belges et basques du projet **ESSENSE** ont développé une approche innovante qui permet de préciser la localisation, l'étendue et la structure des services écosystémiques, à l'aide de données hyperspectrales.

Jusqu'à présent, la cartographie de ces services était dérivée de l'occupation des sols et l'accent était principalement mis sur les services de production, comme par exemple la production de bois ou le rendement agricole. Les chercheurs s'intéressent ici aux services de régulation comme la dénitrification, le cycle du phosphore ou le stockage du carbone. Leur étude s'est concentrée sur deux réserves naturelles en Campine : De Vennen dans le bassin de la Grote Nete et De Liereman aux abords de Turnhout.

Pour établir un lien entre l'image hyperspectrale et le service rendu par l'écosystème, les chercheurs font deux postulats. Le premier est que le bon fonctionnement d'un écosystème dépend directement du nombre d'espèces qu'il abrite ; le service rendu est donc plus élevé si la biodiversité est importante. Le deuxième postulat établit un lien entre la biodiversité et le signal spectral visible sur les images ; plus la biodiversité est riche et plus le signal spectral est hétérogène. Les chercheurs ont donc corrélé le service écosystémique et le signal spectral, par l'intermé-

diaire de la biodiversité. Le projet belgo-basque devrait fournir de nouvelles pistes aux efforts de conservation.

APRÈS L'INCENDIE

En avril 2011, un incendie de grande ampleur a dévasté les Hautes Fagnes. Les flammes ont ravagé plus de 1 300 hectares de végétation, soit près d'un tiers de la superficie classée en réserve

UN SERVICE ÉCOSYSTÉMIQUE, C'EST QUOI ?

Un service écosystémique ou service écologique est un service que nous rend un écosystème. Lorsqu'un écosystème présente un bon état écologique et qu'il fonctionne à plein régime, il rend des services à nos sociétés humaines : maintenir la qualité de l'air, purifier l'eau (par dénitrification, capture d'azote ou de phosphore), emprisonner le carbone, par exemple. L'écosystème possède de ce fait une valeur économique car sa disparition entraînerait des coûts. Une valeur difficile à quantifier mais qui fait l'objet de nombreuses recherches.

En 2005, la parution du *Millennium Ecosystem Assessment* a permis au concept de sortir des laboratoires et de s'imposer sur la scène politique. Le texte a réveillé l'intérêt mondial pour cette notion, en illustrant l'importance vitale de ces services sur le bien-être humain. Les services écosystémiques, bien souvent liés à une biodiversité importante, sont menacés par nos activités. L'objectif général est de mieux les préserver, ce qui passe par l'identification de zones-clés, les hotspots, qui fournissent une prestation de service élevée.

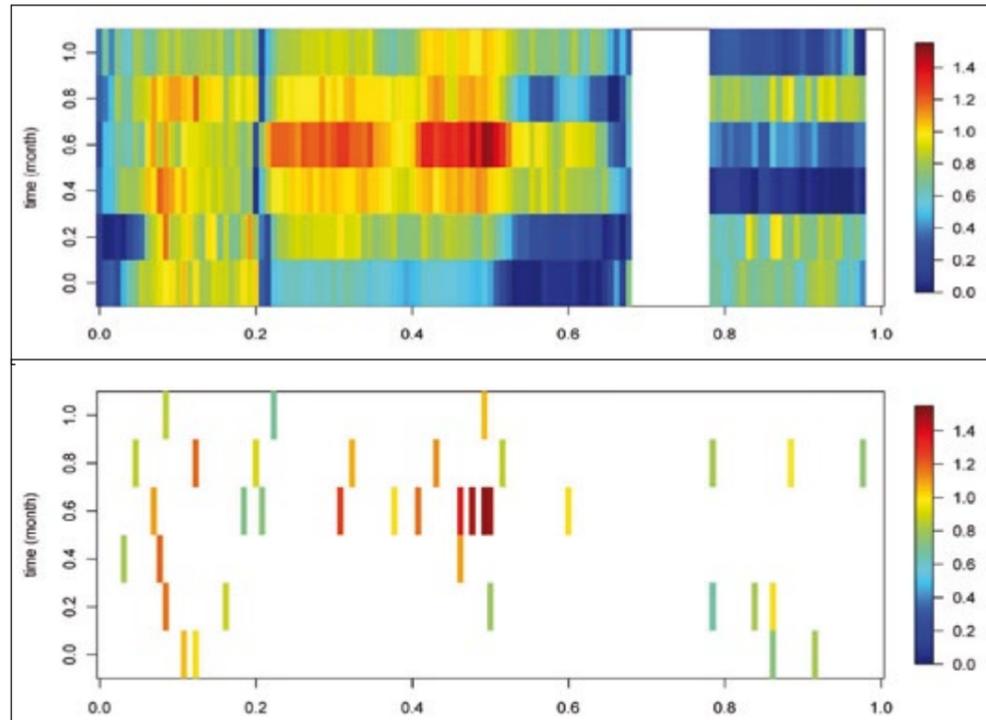


naturelle. Un mois plus tard, c'est la réserve belgo-néerlandaise du Kalmthoutse Heide qui a été touchée, 600 hectares étant partis en fumée. Ces catastrophes ont révélé le manque d'informations existantes sur les écosystèmes de landes (sèches ou humides) et de tourbières.

Dans le cadre du projet **HEATHRECOVER**, des chercheurs belges, néerlandais et de l'agence américaine (NASA) ont travaillé à combler cette lacune, pour venir en aide aux gestionnaires des sites dans leurs tâches de restauration écologique des zones endommagées. Une aide essentielle, d'autant que ces écosystèmes vulnérables font l'objet d'importants efforts de conservation.

L'imagerie hyperspectrale a permis de mieux comprendre les interactions complexes qui existent entre ces écosystèmes et les incendies. L'équipe est arrivée à une première conclusion intéressante : pour évaluer avec précision la sévérité d'un incendie dans l'écosystème de landes, la prise en compte de la végétation pré-feu est nécessaire. L'estimation de l'ampleur des dégâts s'avère donc plus complexe que pour une forêt "classique", où un simple indice suffit en général. Les cartes très détaillées obtenues par les chercheurs ont permis aux personnes en charge de la restauration de disposer d'une appréciation plus précise des zones touchées et des pertes écologiques juste après l'incendie.

Pour distinguer les espèces invasives des espèces natives, le projet **VEGEMIX** a mis au point une stratégie de "démixage" du signal global et multitemporel. La meilleure période et les meilleures caractéristiques spectrales sont déterminées pour optimiser la séparabilité entre les espèces.



L'IMAGERIE HYPERSPECTRALE, UNE ENVOLÉE TECHNIQUE

Une plante donnée a un profil spectral unique. Sa couleur, sa structure, son exposition déterminent la manière dont elle réfléchit les différentes parties du rayonnement solaire. Plus l'information spectrale obtenue pour un objet donné est détaillée, plus aisée sera son identification. Les capteurs hyperspectraux, portés par des avions ou des satellites, enregistrent le rayonnement réfléchi par les objets dans des centaines de bandes spectrales étroites et contiguës qui couvrent une très large fenêtre allant du visible à l'infrarouge thermique. Par rapport aux données multispectrales, enregistrées dans seulement 3 à 10 bandes, le saut quantitatif et qualitatif est considérable quant à l'information spectrale obtenue sur les surfaces observées. Les chercheurs peuvent déterminer avec une précision sans précédent toute une série de variables bio-géophysiques et biochimiques.

La technologie se révèle donc précieuse pour une large palette d'applications confrontées à la variété et à la complexité des milieux étudiés. Dans le domaine du suivi de la biodiversité, l'imagerie hyperspectrale s'impose donc tout naturellement ; couverture végétale, état sanitaire de la végétation, composition du sol, taux d'humidité, eutrophisation des eaux de surface, concentrations en sédiments... sont en effet autant d'exemples de paramètres qui peuvent être étudiés avec précision grâce à cette méthode. La combinaison de ces paramètres permet aux chercheurs d'obtenir une vision plus complète des processus biologiques, physiques et chimiques qui interagissent et qui déterminent l'état d'un site à un moment donné.

L'Institut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) devrait continuer cette recherche à moyen et long termes. En combinant les cartes obtenues avec les cartes de végétation pré et post-feu, les responsables pourront déterminer quels types de gestion se sont avérés les plus efficaces pour restaurer l'écosystème.

TOUJOURS PLUS HAUT... DE L'AVION AU SATELLITE

Après la révolution de l'hyperspectral, certains scientifiques s'engagent dans une nouvelle voie et passent des imageurs hyperspectraux aéroportés aux satellitaires. Comparés aux imageurs aéroportés, les capteurs satellitaires permettent, d'une part, de couvrir des zones plus étendues et d'autre part de fournir des données avec une plus grande fréquence et ce, à moindre coût. Dans ce cadre, des études ont mis en évidence les avantages du capteur Hyperion, embarqué à bord du satellite de la NASA EO-1.

Le projet **VEGEMIX** a exploré l'apport des données Hyperion pour cartographier les espèces d'arbres invasives dans la forêt tropicale d'Hawaï afin de pouvoir estimer leur évolution et leur impact sur l'écosystème tropical. La variation saisonnière étant un paramètre important pour l'identification de ces espèces invasives, l'option

satellitaire montre tout son intérêt, puisque le satellite repasse plusieurs fois au-dessus du même site pendant la période de croissance, lorsque la canopée des arbres évolue rapidement.

Le projet a pu démontrer que les espèces natives possèdent des propriétés spectrales uniques, différentes de celles des espèces invasives. La distinction entre les espèces natives et invasives s'est également révélée plus facile en été qu'en hiver. L'explication, simple, proviendrait du fait que les espèces invasives, opportunistes, tirent parti de la saison chaude pour étendre largement leur canopée. En regroupant les données spectrales obtenues à différents moments de l'été, lorsque les espèces invasives se déploient, la différence entre espèces se manifeste plus clairement, ce qui améliore la précision des classifications.

Les résultats obtenus ont été approfondis et corroborés par le projet spin-off **REMEDY**. Les arguments apportés par ces études en faveur du satellite laissent présager de son utilisation future pour la surveillance de la flore. Après le bouleversement provoqué par l'imagerie hyperspectrale aéroportée, de nouveaux horizons s'ouvrent donc aux chercheurs.

La forêt tropicale humide sur les flancs du Kilauea, au sein du Parc national des volcans à Hawaï. À gauche, les espèces natives, *Metrosideros polymorpha* (arbuste endémique de l'archipel) et *Acacia koa*. À droite, les espèces invasives, *Psidium cattleianum* et *Morella faya*.



LES MERS ET LITTORAUX, AU CENTRE DE TOUTES LES ATTENTIONS

Notre planète est couverte à plus de 70 % d'eau. Les zones côtières qui bordent les mers et eaux intérieures hébergent des écosystèmes particulièrement riches mais qui sont soumis à une pression anthropique extrême. Pour mieux appréhender et sauvegarder les précieuses ressources aquatiques et littorales, la télédétection est devenue incontournable.

Les régions côtières sont composées d'une mosaïque d'écosystèmes terrestres et aquatiques qui possèdent très souvent, par leur nature même de zones de transition, une valeur écologique essentielle. Elles recèlent une biodiversité nettement plus importante que l'arrière-pays et offrent une exceptionnelle variété d'habitats

tels que les récifs coralliens, les mangroves, les marais, les estuaires... Or ces régions sont également très convoitées par le secteur résidentiel et constituent souvent des pôles économiques majeurs, au centre des activités du transport, de la pêche, du tourisme et de l'énergie.



QUELQUES CHIFFRES

Selon l'Atlas des Océans des Nations Unies, 44 % de la population mondiale vit à moins de 150 kilomètres de la mer.

Plus de 90 % du transport mondial de marchandises emprunte les voies maritimes.

Les déchets domestiques flottants sont composés à 80 % de plastiques.

D'après la FAO, les activités de pêche et d'aquaculture assurent les moyens de subsistance de 12 % de la population mondiale.

D'après le dernier rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) :

- l'augmentation moyenne de la température des océans est de 0,1°C par décennie pour les 75 premiers mètres de profondeur ;
- l'élévation du niveau des mers est estimée à 3,2 millimètres par an en moyenne ;
- les océans ont absorbé 30 % des émissions anthropiques de CO₂.

Cette image de la Terre vue de nuit donne un aperçu de la répartition de la population globale.



Cet article se base sur les projets de recherche

BELCOLOUR-2
GEOCOLOUR
JELLYFOR
BEL-GOYA
MICAS
SEASWIR
RE-COLOUR
BESST
HISEA
INSHORE
ALGASED
RESORT



Cette image aérienne couvre un couloir de 6 km de long situé à l'est d'Ostende. Tant pour les eaux côtières que pour les eaux intérieures, les zones où l'effet de contiguïté est important sont représentées en rouge.

La pression anthropique sur les zones littorales ne cesse d'augmenter. Le trafic maritime intense entraîne une pollution des océans et des côtes, notamment par les hydrocarbures (rejets accidentels mais surtout opérationnels). Ceux-ci s'additionnent aux effluents urbains, rejets industriels, résidus de l'agriculture et déchets domestiques qui constituent les principales sources de polluants. Les conséquences sont doubles : d'une part, des substances toxiques s'accumulent dans la chaîne alimentaire et d'autre part, l'augmentation de nutriments (comme l'azote ou le phosphore) altère la qualité de l'eau, multipliant la production d'algues qui épuisent l'oxygène dissous dans l'eau.

La pêche est un autre secteur primordial. Les produits de la mer constituent en effet une part importante de l'alimentation de 3 milliards de personnes. Depuis plusieurs décennies, le volume total des prises de poissons augmente de manière continue. Le taux d'exploitation étant plus rapide que le taux de reproduction, on assiste au niveau mondial à une régression alarmante des réserves halieutiques (poissons, mollusques, crustacés). De plus, la surpêche et ses techniques destructrices dévastent les fonds marins et affectent des écosystèmes vitaux tant pour la productivité primaire des océans que pour d'autres espèces marines, comme les dauphins, les tortues ou les oiseaux de mer.

Cette baisse de productivité est encore aggravée par les effets des changements climatiques. L'augmentation des températures et l'acidification des océans ont en effet elles aussi une incidence majeure sur les milieux marins et les zones côtières. Outre l'effet sur les réserves halieutiques, les conséquences attendues sont une aggravation de l'impact de certains ouragans et cyclones ainsi qu'une dilatation des eaux qui, liée à la fonte des glaces, entraîne une élévation du niveau des mers. Par ailleurs, les eaux de surface ont également une capacité importante d'absorption du CO₂, avec pour conséquence une acidification des eaux néfaste au développement du plancton et à la calcification (coquilles, squelettes, coraux...), ce qui bouleverse l'équilibre de la chaîne alimentaire et les écosystèmes.

L'artificialisation des sols, la pollution et la surexploitation, couplées aux conséquences du réchauffement climatique entraînent donc une dégradation inquiétante des habitats marins et côtiers et un épuisement rapide des ressources. Afin de combattre de façon concertée ces effets directs et indirects, il faut pouvoir compter, à tous les niveaux, sur des données scientifiques plus solides et plus complètes. Ainsi, les chercheurs en observation de la Terre s'appliquent non seulement à tirer avantage de l'ensemble des capteurs existants, mais aussi à formater les instruments du futur pour une surveillance améliorée de ces environnements marins et aquatiques si particuliers.

LES COULEURS DE L'EAU

L'eau de mer peut prendre diverses nuances de bleu, de vert ou de brun, selon les types et les concentrations de particules en suspension et de matières organiques qui y sont dissoutes. Si elle contient peu de particules, elle sera claire et bleue ; si elle est chargée de phytoplancton (vivant ou en décomposition) et/ou de matière minérale, elle apparaîtra plutôt verte et trouble. Ces gammes de couleurs sont perceptibles par des capteurs optiques comme nos yeux... ou les capteurs embarqués sur des satellites. L'objectif de la télédétection est d'extraire, à partir des données de réflectance enregistrées par ces capteurs, de l'information quantitative sur les eaux observées, comme par exemple la concentration en chlorophylle.

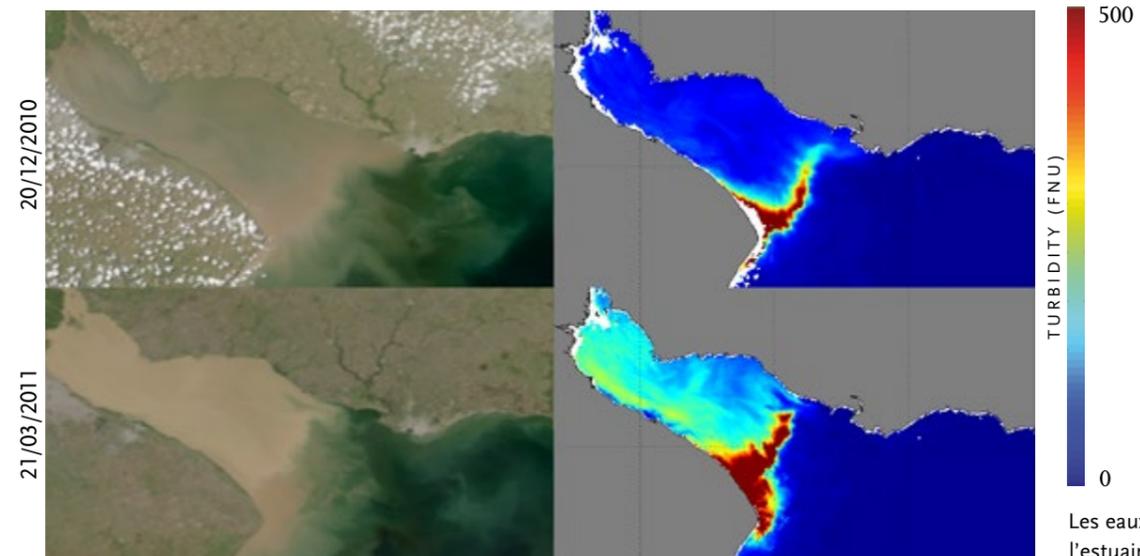
Une telle information, couplée à des prélèvements in situ et/ou intégrée dans des modèles peut être utilisée pour de nombreuses applications environnementales et scientifiques : surveillance de la qualité de l'eau, modélisation des écosystèmes, dynamique des efflorescences algales, suivi de l'eutrophisation, suivi des transports de sédiments...

Le projet **BELCOLOUR-2** a ainsi cherché :

- à améliorer la qualité de certains produits existants développés grâce à la télédétection optique pour étudier les eaux côtières et intérieures ;
- à développer de nouveaux produits pour des applications importantes comme l'estimation de la production primaire marine et du flux de CO₂ entre l'atmosphère et la mer.

Quasi True-color image

Turbidity map



Les chercheurs ont étudié plusieurs phénomènes optiques, depuis l'absorption et la dispersion de la lumière par le phytoplancton et les particules minérales à l'échelle submicrométrique (moins de 0,001 millimètre), jusqu'à leur impact sur la couleur de l'océan vue par un satellite situé à plusieurs centaines de kilomètres.

Les résultats engrangés par ce projet d'envergure mené durant cinq ans sont nombreux et vont de la base théorique, en passant par le traitement d'image, jusqu'au développement de produits finis directement utiles à de nombreux utilisateurs :

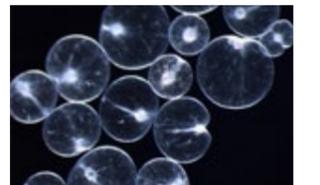
- amélioration de la recherche en optique atmosphérique pour s'assurer que les effets de l'atmosphère ne contaminent pas les paramètres marins ;
- développement d'une méthode permettant d'éviter l'effet de contiguïté (le "rayonnement environnant") qui crée un certain flou en cas d'observations à proximité de la terre ;

- mise au point de nouvelles méthodes de détection de deux espèces importantes de plancton présentes en mer du Nord, *Phaeocystis globosa* et *Noctiluca scintillans* ;
- progrès notables dans l'estimation des particules en suspension, de la turbidité, de la transparence de l'eau, de la production primaire et du CO₂ dissous dans l'eau de mer ;
- avancées dans une recherche sur l'évolution de poissons prédateurs qui chassent à vue et dont la vision s'adapte génétiquement en fonction de la lumière sous-marine disponible ;
- production de cartes et d'images en temps quasi-réel des températures de surface de la mer (SST pour Sea Surface Temperature), des concentrations en chlorophylle-a et de la matière totale en suspension (TSM pour Total Suspended Matter) ;
- développement d'un logiciel qui adapte les données du capteur SeaWiFS pour les eaux turbides.

Les eaux très turbides de l'estuaire du Rio de la Plata entre l'Argentine et l'Uruguay sont visibles sur les images MODIS du satellite AQUA (à gauche). Un traitement par la méthode BELCOLOUR-2 fournit des cartes de la turbidité (à droite), exprimée en unités étalon FNU. À 500 FNU, la visibilité sous l'eau est réduite à moins de 1 cm, situation idéale pour les larves de poisson invisibles pour leurs prédateurs.



Durant les beaux jours du mois de juin, des taches de couleur brun-rouge sont parfois visibles en mer du Nord. Les chercheurs du projet BELCOLOUR-2 ont démontré que ce phénomène est dû à la prolifération d'algues microscopiques, *Noctiluca scintillans*. Une méthode de détection basée sur l'imagerie satellitaire a également été développée.

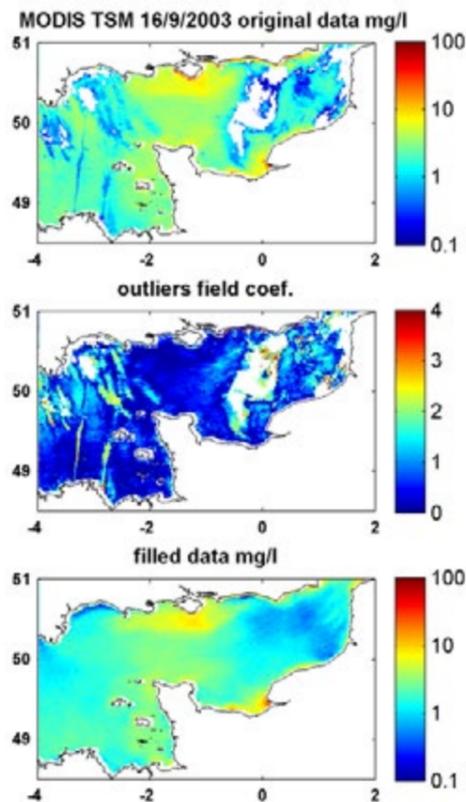


Le navire de recherches océanographiques Belgica.



Pour atteindre ces objectifs, **BELCOLOUR-2** a mis en place une collaboration multidisciplinaire de haut niveau, groupant des équipes belges, françaises et australiennes qui possèdent une expertise non seulement en optique aquatique et en traitement d'image, mais aussi en océanographie physique et chimique, en écophysiologie du phytoplancton et en écologie marine. Les résultats du projet ont été valorisés dans une trentaine de publications et un module de formation universitaire. Ils ouvrent encore de nombreux défis pour toute une génération de chercheurs. En effet, sur le terrain, les utilisations

Carte des concentrations en matières en suspension des eaux de la Manche, dérivées des données MODIS du satellite polaire Aqua. En haut: données originales avec les nuages représentés en blanc. Au centre: identification automatique des données suspectes. En bas: données recomposées, avec les nuages remplacés par les meilleures estimations DINEOF. Cette technique est appliquée par le projet GEOCOLOUR aux données SEVIRI des satellites géostationnaires METEOSAT. RE-COLOUR l'a également utilisée avec succès pour la reconstruction de cartes de concentration en chlorophylle-a et de SST.



teurs finaux sont toujours en attente d'informations encore plus complètes: données plus fréquentes, résolutions spatiales plus fines, paramètres plus détaillés (par exemple, les types et tailles des particules, en plus de leur concentration)... et moins de nuages!

LES SATELLITES GÉOSTATIONNAIRES POUR ÉVITER LES NUAGES

La plupart des avancées de **BELCOLOUR-2** sur les propriétés spectrales des eaux océaniques sont basées sur des données provenant de capteurs tels que MERIS, MODIS ou SeaWiFS qui se trouvent en orbite polaire à environ 750 kilomètres de la Terre. Si leur résolution spatiale et spectrale est adaptée à l'observation des mers et des côtes, ils ne fournissent en revanche qu'une seule image par jour du site étudié, qui est bien sûr inutilisable s'il fait nuageux.

C'est pourquoi l'attention des chercheurs se porte sur les satellites géostationnaires qui sont en orbite équatoriale et tournent à la même vitesse que la Terre. En restant "fixés" au-dessus d'un même point sur Terre, ceux-ci permettent l'observation continue de la mer du Nord pendant toute la durée du jour, générant quotidiennement des dizaines d'images lorsque le ciel est dégagé. Une manne de données donc! Mais encore faut-il en extraire une information utile à l'étude des couleurs de l'océan.

Historiquement dédiés aux télécommunications et à la météorologie, les satellites géostationnaires orbitent en effet à 36 000 kilomètres de la Terre. Fournir des données suffisamment précises d'une telle distance est un véritable défi technologique qui a jusqu'ici empêché les chercheurs en océanographie d'envisager les satellites géostationnaires comme sources d'informations.

L'équipe du MUMM (Management Unit of the North Sea Mathematical Models) est la première à avoir démontré l'utilité des plates-formes géostationnaires et des capteurs météorologiques existants pour la cartographie des matières en suspension dans les eaux côtières très turbides. Sous son égide, le projet **GEOCOLOUR** vise donc à améliorer la qualité et la quantité des produits d'observation marine en exploitant les données du capteur SEVIRI embarqué sur les satellites Meteosat. Ce capteur, conçu pour détecter les nuages, fournit des observations toutes les 15 minutes. Cette recherche constitue aussi une étude de faisabilité pour le développement de futurs capteurs géostationnaires spécifiquement dédiés aux couleurs de l'océan.

Les chercheurs ont développé des techniques de traitement des images SEVIRI pour estimer la turbidité de l'eau et la quantité de lumière sous-marine disponible pour le phytoplancton en mer du Nord. Les données acquises pendant une période de deux ans ont ainsi été traitées, comparées aux mesures relevées par des bouées en mer et combinées d'une part avec des données Aqua-MODIS, et d'autre part avec la méthode

statistique DINEOF qui comble de façon intelligente les "trous" des nuages avec les estimations les plus probables. Les données du capteur GOCI, le premier instrument géostationnaire consacré aux couleurs de l'océan (avec une résolution spatiale de 500 mètres) ont également été utilisées. GOCI a été lancé en 2010 par l'Agence spatiale sud-coréenne pour surveiller les zones côtières du Pacifique occidental.

Le projet **GEOCOLOUR** a prouvé tout l'intérêt d'utiliser des capteurs géostationnaires pour observer les couleurs de l'océan. La grande fréquence d'acquisition des images autorise notamment la détection de variations liées aux marées, par exemple les transports de sédiments (ce qui est impossible avec une image par jour) et permet de fournir des données complémentaires les jours de nuages épars. Les résultats obtenus s'intègrent d'ores et déjà dans la conception d'une nouvelle génération de capteurs géostationnaires survolant l'Europe et dédiés aux couleurs de l'océan, un programme prévu par l'Agence spatiale européenne à l'horizon 2020.

ALERTE AUX MÉDUSES!

Le terme "méduse" recouvre de nombreuses espèces de zooplancton gélatineux. La plupart d'entre elles sont inoffensives mais certaines sont nocives pour les poissons et/ou les humains en raison de leur piqûre toxique. C'est le cas de *Pelagia noctiluca*, une espèce que l'on ne retrouve heureusement pas dans la partie belge de la mer du Nord, mais qui chaque été est responsable de nombreuses piqûres en Méditerranée et dont une invasion massive a complètement détruit un élevage de saumons en Irlande du Nord en 2007. L'impact économique de ces méduses sur les secteurs de l'aquaculture et du tourisme a poussé les chercheurs à mieux comprendre leur cycle de vie afin de tenter d'anticiper leur apparition le long des côtes. Dans ce cadre, le projet **JELLYFOR** a cherché à développer un service de prévision des arrivées de méduses toxiques en utilisant les données satellitaires comme une des sources du modèle. Les régions d'étude choisies sont l'Irlande du Nord et la Catalogne (Espagne).



Des méthodes de traitement des données satellitaires déjà mises au point sur la mer du Nord ont été étendues et ont permis le traitement automatique et en temps quasi-réel (dans les 12 heures) de données Envisat-MERIS et Aqua-MODIS sur les deux zones d'étude. Des séries temporelles complètes sur 10 ans et portant sur 3 paramètres (SST, concentration en chlorophylle-a, turbidité) ont été traitées et analysées. L'idée est de mettre en parallèle les occurrences de méduses et les valeurs des paramètres océanographiques pour différentes périodes, de manière à déduire les conditions favorables ou défavorables au développement de méduses. L'archive de 10 ans a donc aussi été intégrée dans un modèle de prévision des méduses.

Si les étapes du projet liées au traitement des données de télédétection ont été développées avec succès, le modèle, lui, n'est pas encore capable de produire des prévisions fiables. Des mesures in situ (sur les plages et en mer) et une meilleure validation du modèle sont nécessaires et actuellement à l'étude pour certaines espèces en Belgique.

Intégré dans un projet de l'Union européenne et de l'Agence spatiale européenne, **JELLYFOR** a amélioré le logiciel qui traite rapidement les archives volumineuses de données satellitaires (par exemple, 10 ans de données quotidiennes). Il a été fortement automatisé et peut maintenant être configuré pour n'importe quel point du globe, livrant ses conclusions en quelques heures seulement et quasiment sans intervention humaine. Le logiciel développé par le projet pourrait donc être utile pour de nombreuses autres applications et régions.



L'estuaire de la Gironde, vu par Landsat 8.

Un autre projet, **BEL-GOYA**, approfondit ces questions en évaluant spécifiquement les performances de capteurs polaires et géostationnaires pour la cartographie des TSM dans les panaches fluviaux et les estuaires très turbides. Les résultats obtenus sont mis en parallèle avec les caractéristiques de chaque capteur : fréquence d'acquisition, type de bandes spectrales, etc. **BEL-GOYA** s'inscrit dans un projet de l'Agence spatiale française (CNES) qui étudie la dynamique des particules en suspension dans les grands estuaires où se produisent les échanges biogéochimiques entre le continent et l'océan. Les régions-test du projet sont les estuaires de la Gironde (France), du Rio de la Plata (Argentine, Uruguay) et du Yangtze (Chine). Le projet **BEL-GOYA** s'est concentré sur ce dernier site, dont les eaux extrêmement turbides peuvent être observées par le capteur sud-coréen GOCI.

Le projet a permis de développer et de valider des algorithmes de correction atmosphérique et d'extraction des TSM plus performants pour ces zones extrêmement turbides et ce, en utilisant les bandes du proche infrarouge (NIR) des capteurs dédiés à la couleur des océans. Ces nouveaux algorithmes autorisent aussi une meilleure détection des nuages au-dessus des eaux très turbides et une classification plus aisée des pixels quelle que soit la quantité de TSM dans l'eau. Grâce aux résultats obtenus, les chercheurs ont pu formuler de précieuses recommandations relatives à la conception des futurs capteurs dédiés à la couleur des océans.

EXPLORER DE NOUVELLES BANDES SPECTRALES

Si la meilleure résolution temporelle des satellites géostationnaires offre des avantages pour l'observation des milieux marins, une résolution spectrale et spatiale très fine en offre d'autres pour mieux caractériser l'eau et ses composants. Le projet **MICAS** a ainsi exploité les données du capteur hyperspectral aéroporté APEX pour cartographier la qualité des eaux côtières et intérieures. À partir de trois régions d'étude (le lac de Constance en Suisse, l'Escaut en Belgique et la mer des Wadden aux Pays-Bas) et en partenariat avec l'Université de Zurich, les chercheurs ont développé un algorithme spécifique qui s'intègre dans une chaîne de traitement automatique des images APEX.

Conçu pour cartographier les concentrations de chlorophylle, de matière organique dissoute colorée (CDOM : Colored dissolved organic matter) et de matière en suspension, il "corrige" certaines erreurs qui se produisaient couramment avec les méthodes antérieures (notamment des erreurs liées aux effets atmosphériques). Appliqué aux images APEX de la mer des Wadden, l'algorithme a permis de générer en un laps de temps très court une cartographie complète des concentrations recherchées. Les observations aéroportées et les cartes dérivées sont de plus parfaitement corrélées avec les mesures de terrain. Mais, alors que ces dernières ne sont que ponctuelles, les images APEX fournissent une information spatiale continue de la qualité de l'eau à un moment précis.

Le projet **MICAS** a également révélé les potentialités des bandes spectrales situées dans l'infrarouge de courte longueur d'onde (SWIR) pour caractériser les eaux turbides des estuaires et des eaux intérieures. Un autre projet, **SEASWIR**, s'est donc concentré sur ce canal, jusqu'à présent très peu utilisé dans l'observation des eaux de surface (excepté pour les corrections atmosphériques). En effet, les eaux claires absorbent largement cette portion du spectre. La réponse spectrale des composants de l'eau dans ces longueurs d'onde est tellement faible en comparaison avec les réponses dans le visible et le proche infrarouge qu'elle a jusqu'à présent été considérée comme nulle, même pour les eaux très turbides. Or, lors du projet **MICAS**, des mesures positives de réflectance dans le SWIR ont été établies pour l'Escaut et reliées aux concentrations de matières en suspension.

Les chercheurs de **SEASWIR** ont donc posé l'hypothèse d'une réponse spectrale des eaux dans le SWIR et collecté des données de terrain pour déterminer la variabilité de cette réflectance. Les instruments de mesure spécifiques pour les eaux n'existant pas encore, ils ont utilisé un instrument conçu pour les terres, et ce en trois régions : l'Escaut près d'Anvers, la Gironde et le Rio de La Plata. Un signal clair a pu être

enregistré dans les trois cas, et tant pour l'Escaut que pour la Gironde, un lien a pu être mis en évidence entre le signal et la concentration de sédiments en suspension. Le SWIR pourrait donc se montrer très utile pour mesurer la qualité des eaux très turbides, où les concentrations des sédiments et des algues sont telles que le signal perçu dans des longueurs d'onde plus courtes arrive souvent à saturation. L'Agence spatiale européenne a d'ailleurs intégré un canal SWIR dans le nouvel instrument dédié à la couleur des océans embarqué à bord du futur satellite Sentinel-3.

DES CARTES À TROUS

L'environnement marin est extrêmement dynamique. Pour de nombreuses études, il est primordial de disposer de séries temporelles complètes d'images couvrant la totalité de la zone observée. Or, ces séries présentent souvent des lacunes dues à la présence de nuages, de données de mauvaise qualité ou encore à l'absence d'acquisition au moment voulu. Le projet **RE-COLOUR** a cherché à exploiter l'algorithme DINEOF (voir plus haut) pour reconstruire l'information spatio-temporelle complète sur une période de 4 ans, portant sur trois paramètres (chlorophylle-a, TSM, SST) dans la partie méridionale de la mer du Nord.

La technique a été appliquée avec succès et, pour les 3 paramètres, des séries complètes de données ont été produites, ainsi que les erreurs qui y sont associées. Les valeurs moyennes hebdomadaires et mensuelles ont pu être dérivées des reconstructions quotidiennes régulières. La technique permet également de détecter les pixels qui sont "suspects" par rapport à la dynamique globale (pixels provenant généralement de la détection imparfaite des nuages).

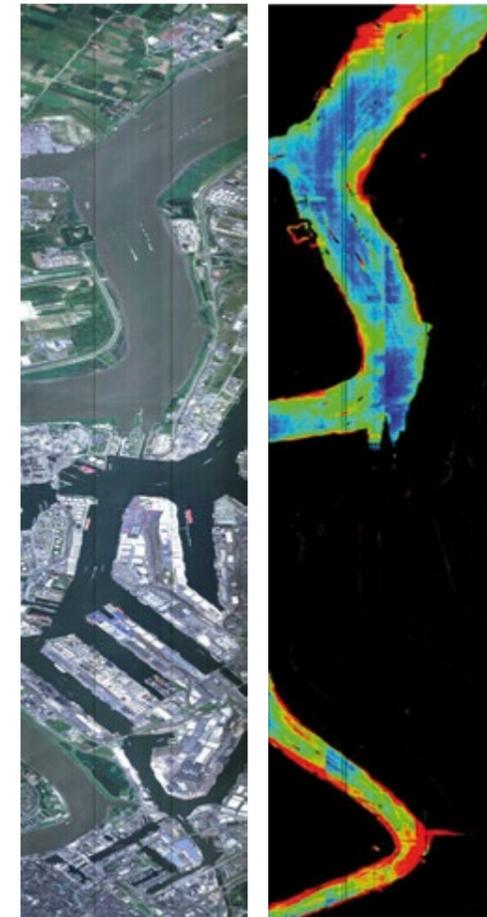
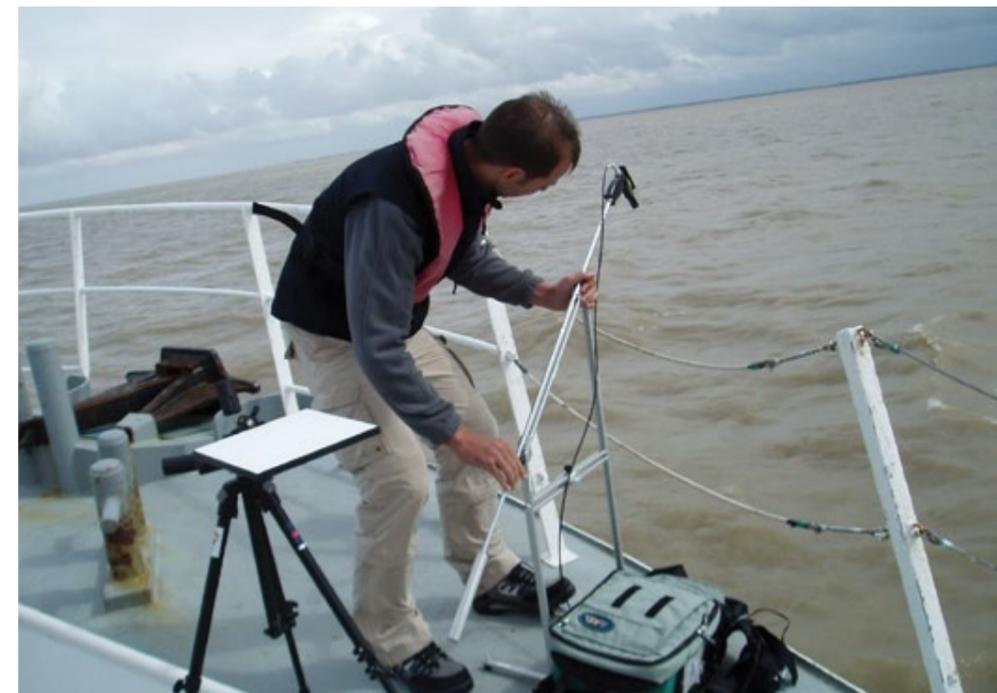


Image hyperspectrale de l'Escaut acquise par le capteur APEX et carte de concentration en sédiments.



L'algorithme DINEOF amélioré ainsi que les champs reconstruits de TSM et de chlorophylle-a ont prouvé leur utilité pour diverses recherches environnementales. Les résultats ouvrent la voie à d'autres applications dans le traitement et le contrôle de qualité des données optiques de télédétection.

LA TEMPÉRATURE DE L'EAU, PAS UNIQUEMENT POUR LA BAIGNADE

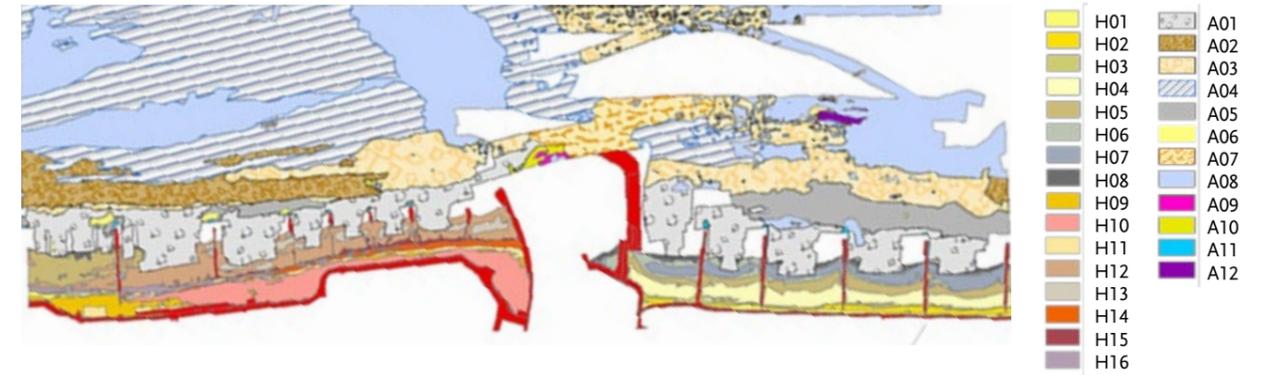
La température de surface des mers (SST) est un paramètre fondamental en océanographie mais aussi en météorologie et en climatologie. Elle définit les échanges de chaleur et d'humidité entre la surface des océans et l'atmosphère.

Historiquement, dès la fin du XIX^e siècle, la température de surface a été relevée à partir des navires, ensuite par les bouées en mer, mais depuis 30 ans, elle est également mesurée par les capteurs satellitaires capables de détecter les rayonnements infrarouge (IR) et micro-ondes émis par la surface de l'eau. Ces mesures satellitaires offrent une haute résolution spatiale (de l'ordre du kilomètre) et temporelle (de l'ordre de quelques heures), mais des difficultés subsistent : d'une part, le rayonnement IR émis par la surface des mers est atténué par les composants de l'atmosphère, principalement la vapeur d'eau ; d'autre part, les données utiles proviennent de capteurs aux caractéristiques dif-

férentes et il est parfois difficile de les combiner. Le capteur AATSR, qui était embarqué à bord du satellite Envisat (mis hors service en 2012) enregistrerait le rayonnement à la fois au nadir (verticalement) et vers l'avant, ce qui permettait de déterminer plus précisément les corrections atmosphériques et donc les SST. En contrepartie, son champ de vision étant relativement étroit, la période nécessaire pour couvrir toute la Terre était de 2 à 3 jours.

D'autres capteurs IR (comme AVHRR sur le satellite MetOp-A et SEVIRI sur Meteosat) ne possèdent pas cette vision duale mais leur fauchée nettement plus large permet de couvrir la Terre avec une fréquence bien plus élevée (deux fois par jour pour MetOp, tous les quarts d'heure pour SEVIRI).

Les chercheurs du projet **BESST** se sont dès lors attelés à homogénéiser les données provenant de ces diverses sources. En partenariat avec le Centre de Météorologie Spatiale de Météo-France, l'équipe a tenté de combiner les avantages des différents types de capteurs, en améliorant la précision des mesures de SST tout en gardant une large couverture. La technique de reconstruction DINEOF a été adaptée pour produire des versions corrigées des cartes de SST des mers européennes. DINEOF comble les données manquantes et les zones de différence



entre les jeux de données en trouvant les connexions spatio-temporelles qui les lient.

La méthode, développée de manière innovante, a permis de réduire les écarts entre les données des différents capteurs aussi bien au niveau spatial que temporel. Il est dès lors prévu de l'implémenter dans les processus de Météo-France, un fournisseur majeur de cartes de SST en Europe et dans le monde. Ces mesures de SST améliorées permettront d'affiner tant les prévisions météorologiques que les études climatologiques.

Dans le projet **HISEA**, la même équipe a cherché à produire des données de SST qui combinent les avantages des satellites polaires (haute résolution spatiale) et des satellites géostationnaires (haute résolution temporelle). Une version avancée de DINEOF a été développée et a permis de fusionner des données issues d'une part du capteur AVHRR en orbite polaire (2 kilomètres de résolution spatiale, 2 images par jour) et d'autre part du capteur SEVIRI en orbite géostationnaire (6 kilomètres de résolution spatiale, 1 toutes les 15 minutes). Testée sur la Méditerranée, la méthode a généré des estimations de températures de surface ayant une meilleure résolution tant spatiale que temporelle. Ces résultats permettent d'appréhender l'évolution journalière des SST, qui sont très influencées par les conditions météorologiques (pluie, nuages, soleil et vent), et de mieux déterminer leur variabilité dans l'espace.

La méthode a été transposée avec succès à une autre variable, à savoir la matière en suspension en mer du Nord, démontrant son potentiel pour d'autres régions et pour de nouveaux paramètres, par exemple la salinité de surface. Un code général du nouvel algorithme DINEOF-OI, applicable à n'importe quel paramètre et à n'importe quelle zone d'étude, a d'ailleurs été mis librement à la disposition de la communauté scientifique afin de généraliser son utilisation.

CARTOGRAPHIER LA CÔTE D'UN SEUL TENANT

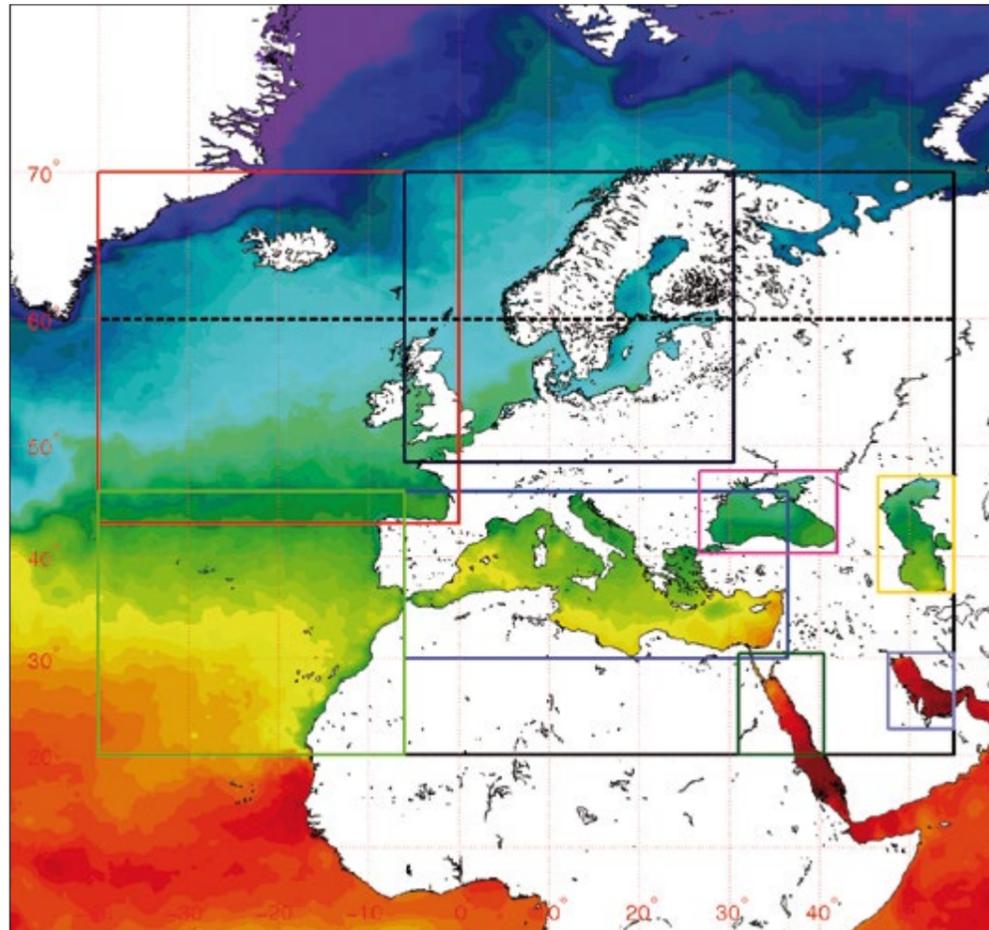
Il est aujourd'hui courant de recourir à l'imagerie satellitaire pour l'étude de la dynamique des littoraux. Or, l'étude de l'estran, partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées, requiert des techniques différentes des autres parties du littoral. Le projet **INSHORE** a donc exploré la possibilité de cartographier le cordon littoral d'un seul tenant, pour pouvoir étudier la morphologie du littoral et la dynamique des sédiments. Une campagne de terrain a été organisée sur 4 kilomètres de côte à Ostende. Pour protéger la ville, la plage d'Ostende a en effet reçu d'importants rechargements de sable entre 2004 et 2008 ; une carte globale permettrait le suivi de la mobilisation du sable par les vagues, les marées et les tempêtes.

L'approche innovante du projet consiste à combiner des données provenant de capteurs aéroportés (hyperspectraux, LiDAR) et sous-marins (sondeur acoustique, sonar latéral). L'information détaillée fournie par les données hyperspectrales a permis de déterminer 16 classes de sable sur la plage (différenciées par la taille des grains, leur teneur en eau et en fer et leur composition minéralogique). En répétant les campagnes de mesures, des déplacements de sable ont pu être détectés. Pour les interpréter correctement, il faut toutefois les confronter aux variations topographiques de la plage. Celles-ci ont été dérivées des données LiDAR régulièrement fournies par les autorités de surveillance côtière.

Sous l'eau, un sondeur acoustique a été utilisé pour déterminer des changements morphologiques (degré de compaction, rugosité...) alors qu'un sonar latéral a permis d'identifier 12 classes de sable. L'étude a privilégié les zones où les données acoustiques sous-marines et optiques aéroportées concordent. Les cartes produites sont d'un niveau de détail sans précédent. Elles s'ajustent parfaitement aux données provenant d'études officielles du suivi biologique ou de l'avancée des travaux d'accès dans le chenal du port. La méthode développée par le projet est donc recommandée pour la cartographie de zones côtières à forte dynamique et pour l'étude de la sédimentation là où un haut niveau de précision est requis.

Classification finale de la zone d'étude du projet INSHORE, intégrant les classes de sédiments infra-littoraux dérivées des données sonar et les classes de sable de la plage dérivées des données aéroportées.

Carte de température de surface de la mer et délimitation des différents sites d'étude du projet BESST.



MILIEUX AQUATIQUES
 BELCOLOUR-2
 GEOCOLOUR
 JELLYFOR
 BEL-GOYA
 MICAS
 SEASWIR
 RE-COLOUR
 BESST
 HISEA
 INSHORE
 ALGASED
 RESORT



L'équipe ALGASED sur le terrain.

À droite : image hyperspectrale du site De IJzermunding étudié par ce projet.

LES VASIÈRES DE LA MER DU NORD, UN MILIEU UNIQUE

Autour de la mer du Nord, les zones côtières et les estuaires sont d'une importance primordiale. Non seulement ils constituent une barrière contre les flots et un espace de développement économique, mais les étendues intertidales jouent également un rôle capital dans le fonctionnement des écosystèmes. Des processus biologiques, physiques et chimiques déterminants ont en effet lieu dans les vasières, ces berges de fleuve qui sont découvertes à marée basse. L'érosion de ces étendues peut d'une part entraîner une perte de productivité de ce milieu très riche et d'autre part, entraver la navigation en accumulant les sédiments dans les chenaux. Or, la stabilité des vasières est affectée par des facteurs externes comme les vagues et les courants, mais aussi par les propriétés biophysiques des sédiments eux-mêmes.

Le projet **ALGASED** étudie comment mieux cerner la variabilité de ces propriétés biophysiques à différentes échelles spatiales et temporelles, à l'aide de données multispectrales et hyperspectrales issues de plates-formes satellitaires ou aéroportées. En collaboration avec des partenaires néerlandais et britanniques, les chercheurs se sont concentrés sur deux axes : la caractérisation et la classification des sédiments, et la quantification du microphytobenthos (MPB), l'algue unicellulaire qui forme un biofilm de quelques millimètres à la surface des sédiments intertidaux. Deux sites de vasières intertidales, De IJzermunding en Belgique et De Molenplaat aux Pays-Bas, ont été étudiés à l'aide de données hyperspectrales, multispectrales et in situ.

Le projet a produit plusieurs avancées :

- l'amélioration des techniques de classification (non supervisées et supervisées) ;
- la caractérisation des sédiments grâce à l'imagerie multispectrale ;
- la quantification de la biomasse du MPB et la modélisation de la production primaire grâce à deux indices (NDVI et Red Edge) qui se sont révélés performants, robustes et applicables aussi bien à l'imagerie aéroportée que satellitaire ;
- enfin, l'intégration de tous les types de données (de terrain, aéroportées, satellitaires) grâce à une approche multi-échelle, afin de produire des cartes complètes des propriétés biophysiques des sédiments.



Le projet a livré aux utilisateurs finaux des classifications d'images pour toutes les données hyperspectrales, des cartes de propriétés des sédiments et des cartes d'occurrence de propriétés biophysiques. Les méthodes développées ouvrent la voie à des études complémentaires, portant notamment sur l'extrapolation à de nouvelles données des zones étudiées ou d'autres sites, de façon à valider leur applicabilité générale pour les services écosystémiques des estuaires.

DES MILLIONS DE M³ DE SÉDIMENTS À DRAGUER

Chaque année, les entreprises de dragage enlèvent plus de 2 millions de m³ de sédiments de l'estuaire de l'Escaut, un travail indispensable pour que les porte-conteneurs toujours plus imposants puissent accéder au port d'Anvers. L'une des missions de la société IMDC (International Marine and Dredging Consultants), basée à Anvers, est le conseil aux entreprises de dragage. Elle a donc besoin d'informations précises et à jour sur les variations spatiales de la turbidité afin de calibrer et de valider les modèles de transport des sédiments et dès lors, d'optimiser les opérations de dragage et l'implantation des structures portuaires.

Dans ce cadre, la télédétection constitue une source de données précieuse pour compléter les sondages traditionnels extrêmement laborieux. La société dispose déjà d'un logiciel permettant de cartographier les sédiments en suspension dans l'Escaut, mis au point sur base d'images acquises lors d'une unique campagne de vol réalisée au printemps. Le projet **RESORT** poursuit la recherche en évaluant dans quelle mesure ce logiciel peut être transposé à toutes les saisons et à d'autres régions.

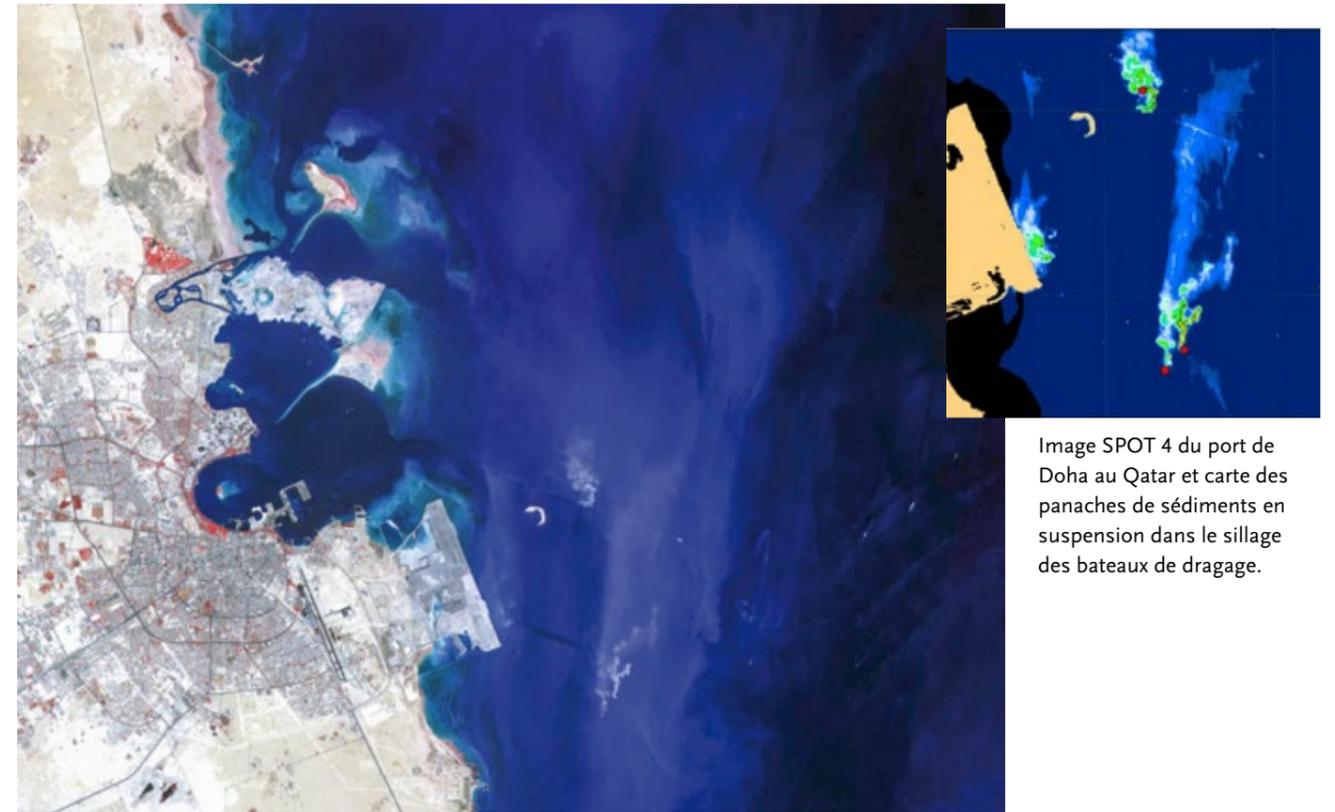


Image SPOT 4 du port de Doha au Qatar et carte des panaches de sédiments en suspension dans le sillage des bateaux de dragage.

À partir de données hyperspectrales, d'échantillons d'eau et de mesures optiques relevés pour l'Escaut, les chercheurs ont pu développer un algorithme pour la cartographie des sédiments qui s'est révélé robuste tout au long de l'année.

La reproductibilité de la méthode a été testée sur le port de Doha (Qatar) dans le Golfe Persique et dans le canal de Panama, en utilisant des images satellitaires. Les données multispectrales

à haute résolution SPOT ont permis d'identifier les bateaux de dragage, de suivre les panaches de sédiments en suspension dans leur sillage et d'en déterminer la taille et la direction. Les avancées du projet ont convaincu les utilisateurs (IMDC, entreprises de dragage, mais aussi les laboratoires de recherche) de la valeur ajoutée de la télédétection pour la calibration/validation des modèles de transport de sédiments et le suivi des opérations de dragage.

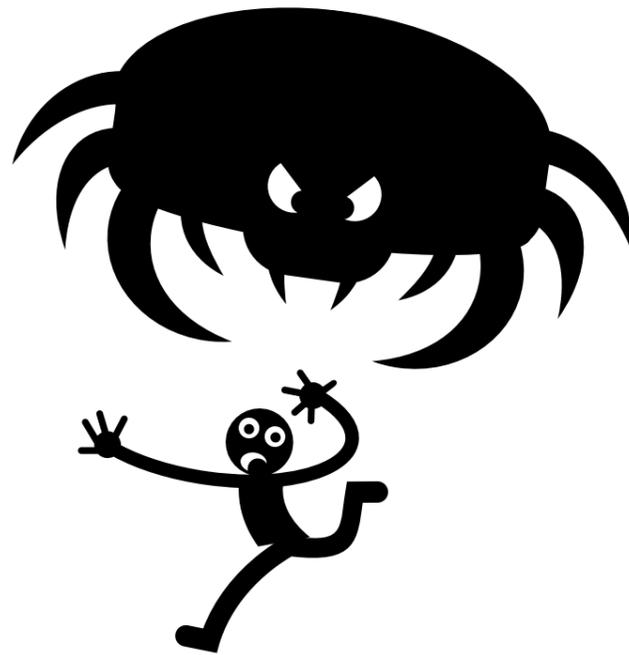


SENTINEL-3: DES APPLICATIONS MULTIPLES

Dans le cadre du programme Copernicus, le programme de surveillance de la Terre pour l'environnement et la sécurité de l'Union européenne, les missions Sentinel de l'Agence spatiale européenne comportent un volet de surveillance marine chargé de fournir des données fiables, fréquentes et avec une couverture géographique étendue, sur l'état et l'évolution des océans et des zones côtières. La mission Sentinel-3 visera à mettre en place une capacité d'observation multi-instruments afin de générer de façon précise des paramètres marins importants tels que la couleur de l'océan, la température de surface et la hauteur de surface. En phase avec la politique d'accès libre pour les données Sentinel, ces données seront mises gratuitement à la disposition de tous les utilisateurs, pour répondre aux besoins des diverses applications spécifiques au milieu marin :

- la **sécurité marine** (circulation des navires, zones de piraterie, pollutions aux hydrocarbures...);
- les **ressources marines** (ressources halieutiques, énergies fossiles, minéraux, énergies éolienne, marémotrice, houlomotrice, thermique...);
- l'**environnement marin et côtier** (affecté par les processus naturels, les interventions de l'homme et les changements climatiques);
- les **prévisions saisonnières et climatiques** (fluctuations du climat, conditions saisonnières, impact sur des phénomènes comme El Niño, alertes météorologiques en cas d'épisodes extrêmes...);
- la **glace marine** (banquise saisonnière ou pérenne, îlots dérivants).

L'ESPACE AU SERVICE DE LA LUTTE CONTRE LES MALADIES



Cet article se base sur
les projets de recherche

MULTITICK
BUSHTICK
TICKRISK
EPISTIS
EPIDEMOIST
DYNMAP
SATHALI

Face à la menace d'expansion
de maladies infectieuses,
l'épidémiologie prend de la
hauteur. La télé-épidémiologie
assemble des données collectées
sur le terrain et des données
satellitaires pour traquer
et prévenir les infections.

Malaria, maladie de Lyme, grande douve du foie, maladie de la langue bleue... chaque année ces maladies gagnent du terrain et les risques d'épidémies augmentent. Leur point commun ? Elles sont toutes transmises par des petits organismes, souvent des arthropodes (moustiques, mouches, tiques, poux ou puces), que l'on appelle vecteurs car ils transportent l'agent infectieux d'un hôte à un autre. Or, les aires de distribution de ces vecteurs s'élargissent progressivement, les modifications climatiques leur ouvrant des altitudes et latitudes jusque-là préservées. De nouvelles régions, parfois très vulnérables, sont ainsi gravement touchées. Face au fléau, les recherches s'intensifient pour décrypter la dynamique spatio-temporelle des maladies et obtenir des cartes de prévision des zones à risque afin d'anticiper et d'endiguer plus efficacement les épidémies.

L'ÉPIDÉMIOLOGIE DEVIENT SPATIALE

La télé-épidémiologie conjugue des jeux de données de terrain multidisciplinaires (facteurs physiques comme la température ou l'humidité, relevés biologiques, données sanitaires, socio-économiques...) à des données d'observation par satellite (climatologiques, environnementales, occupation du sol...). Elle permet d'analyser les mécanismes d'émergence, de propagation et de transmission des maladies infectieuses, premièrement en passant au crible les relations "climat-environnement-santé" et deuxièmement, en mettant au jour les liens qui existent entre les maladies infectieuses et le milieu dans lequel elles se développent, le tout à l'aide de la technologie spatiale. L'objectif final est de fournir aux acteurs de la santé publique des outils, par exemple des cartes de risque, leur permettant de surveiller et prévoir les épidémies.

Un grand nombre de produits statistiques et non-statistiques sont développés pour faciliter le travail des épidémiologistes : quantification des cas de maladie, identification des facteurs caractéristiques des zones touchées, détermination des zones à risque, modèles de prévision, programmes de prévention... La télédétection intervient désormais à chaque étape de cette recherche.

TIQUES SOUS INFLUENCE

La tique voyage. Elle se déplace facilement d'un continent à l'autre sur le dos de son hôte. Très sensible aux changements climatiques comme aux modifications locales de température, d'exposition, d'humidité..., son aire de distribution évolue et s'élargit. En Europe, parmi les maladies à vecteurs, celles transmises par les tiques sont les plus importantes. Chaque année, plusieurs milliers de personnes sont touchées par la maladie de Lyme et ce nombre ne fait qu'augmenter.

Une étude, **MULTITICK**, s'est penchée sur les facteurs environnementaux qui influencent la distribution des maladies à tiques en Europe. Les chercheurs ont choisi de se concentrer sur la maladie de Lyme en Belgique et dans les pays baltes. Les tiques et leurs animaux-hôtes ont un habitat spécifique, qui dépend de leurs besoins et qui est lié à des caractéristiques environnementales particulières. La tique peut donc être rigoureusement associée à certains facteurs environnementaux (végétation, température...). Nombre de ces facteurs spécifiques peuvent être dérivés des données de télédétection et ensuite introduits dans des modèles permettant d'identifier quels sont les environnements les plus favorables à l'apparition de la maladie.

L'originalité de l'étude a été d'étudier plusieurs types de facteurs (environnementaux, humains...) observables à plusieurs échelles. La plupart des études réalisées jusqu'alors se concentraient sur un type de facteur et une échelle spécifiques (données d'occupation du sol déduites d'images à haute résolution ou données climatiques déduites d'images à basse résolution, par exemple). L'équipe de recherche a donc combiné les échelles en utilisant des images de basse et de haute résolution et plusieurs techniques statistiques pour assembler les données obtenues. Les résultats confirment que la distribution spatiale des maladies à tiques est déterminée par un ensemble de facteurs qui opèrent à différentes échelles. Le projet a également montré que les facteurs environnementaux n'expliquent pas tout ; la manière dont l'homme aménage et gère son territoire doit par exemple également être prise en compte. La recherche menée a donc apporté une vision intégrée assez innovante dans les domaines de l'environnement et de l'écologie des maladies.



Rhipicephalus microplus, une tique tropicale arrivée récemment en Afrique de l'Ouest menace l'élevage et la production de lait.

À l'entrée des forêts lettones, les promeneurs sont avertis du risque lié à l'abondance de tiques.

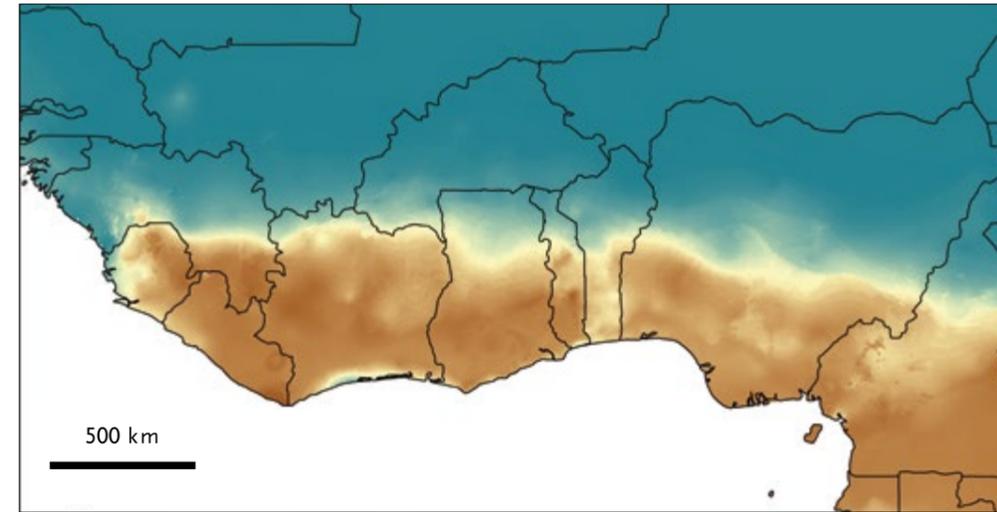


Récolte de tiques dans une prairie abandonnée au sud de la Norvège pour le projet BUSHTICK.

Sur la même lancée, l'équipe s'est attelée au projet **BUSHTICK**. Celui-ci étudie la dynamique des zones agricoles abandonnées afin de mieux comprendre l'impact des changements d'aménagement et de gestion du territoire sur le risque de présence de tiques et d'occurrence de maladies. Dans le sud de la Norvège, zone d'étude du projet, on observe une augmentation de l'aire de distribution des tiques qui va de pair avec un accroissement des maladies à tiques dans les populations humaine et animale. Les chercheurs se penchent plus précisément sur les "zones broussailleuses", c'est-à-dire des zones cultivées ou des pâtures qui ont été abandonnées et où la nature reprend ses droits. En effet, si les forêts sont bien connues pour être un habitat propice aux tiques, on dispose aujourd'hui de peu d'information sur ces terres qui retournent à l'état sauvage. Or, ces zones non entretenues sont moins exposées aux vents et au passage et sont donc plus susceptibles d'héberger des tiques qu'une pâture ou un champ.

L'objectif du projet est de produire une carte de l'évolution de la végétation dans la région durant les trois dernières décennies pour mieux comprendre les processus d'abandon des prairies et de leur retour à l'état sauvage. Pour pouvoir détecter des changements graduels de la densité de végétation, les chercheurs ont dû tester plusieurs méthodes de classification d'occupation du sol. Pour chacune des méthodes utilisées, ils ont sélectionné les composantes les plus efficaces : certaines permettent en effet d'analyser la structure du paysage grâce à la détermination de

classes d'occupation du sol à un moment donné, alors que d'autres déduisent de séries temporelles des informations continues, plus intéressantes pour observer des processus graduels. En combinant les avantages des différentes méthodes, l'équipe espère pouvoir dresser des cartes d'embroussaillage et définir l'impact des changements d'occupation du sol et de gestion du territoire sur les risques de présence des tiques et l'apparition des maladies qui leur sont liées. L'objectif à terme est de pouvoir démêler le réseau complexe d'interactions qui existent entre variables environnementales, aménagement du territoire et maladies à tiques.



Une carte de risque de présence de *R. microplus* en Afrique de l'Ouest est produite par détermination des zones climatiques favorables au vecteur.

SAUT DE TIQUE

Rhipicephalus microplus, une tique tropicale, est apparue au Bénin en 2006. Elle serait vraisemblablement arrivée sur le continent africain en passant clandestin sur le dos de vaches brésiliennes. Aucune trace d'elle en Afrique de l'Ouest avant 2007. Dangereuse, la tique provoque des anémies et des infections de la peau et des pis. Elle est également vectrice de plusieurs maladies du bétail particulièrement graves, telles que la babésiose et l'anaplasmose qui causent de fortes fièvres, des pertes de poids, une diminution de la production laitière et entraînent parfois la mort de l'animal. Le coût de ces maladies est considérable pour les fermiers. Résistante aux acaricides, la tique est très difficile à éradiquer une fois qu'elle est installée. Le risque d'expansion de l'aire occupée par la tique est grand et favorisé par le système d'élevage pratiqué en Afrique de l'Ouest. En effet, le bétail n'est pas gardé dans des prairies clôturées mais doit voyager pour trouver de l'eau et de la

nourriture. Il peut donc transporter les tiques sur plus d'une centaine de kilomètres.

Fruit d'une collaboration entre l'Université catholique de Louvain (UCL), l'Institut de Médecine tropicale d'Anvers et l'Université espagnole de Zaragoza, le projet **TICKRISK** s'est attaché à produire une carte des habitats potentiels de la tique en Afrique de l'Ouest pour aider les autorités à mettre en place une surveillance ciblée. Ils ont développé l'utilisation des smartphones par les acteurs de terrain pour faciliter la collecte et la centralisation des données, via l'application **VECMAP**. Grâce aux résultats de leurs collectes de tiques au Bénin, les chercheurs ont pu établir quelles étaient les conditions environnementales favorables à celles-ci. Sur base de ces informations et de données satellitaires, ils ont pu dresser une carte détaillée du risque d'invasion en Afrique de l'Ouest. Cette carte a permis de révéler que de très larges zones du territoire étudié sont en réalité des zones à risque.

VECMAP, UNE APPLICATION SMARTPHONE

Développée par la société AVIA-GIS avec la collaboration des équipes scientifiques des projets **EPIDEMOIST** et **TICKRISK** entre autres, **VECMAP** est un service de soutien à la gestion des maladies transmises par des vecteurs comme les moustiques ou les tiques (malaria, chikungunya...).

De l'échantillonnage à la modélisation spatiale, l'application mobile procède à toutes les étapes menant à l'obtention d'une cartographie des zones à risque. Elle simplifie et améliore le travail de terrain et de laboratoire ainsi que la modélisation de la distribution grâce aux données satellites. Elle facilite le travail de collecte de données sur le terrain grâce aux smartphones et procède ensuite à la modélisation statistique de la distribution de la maladie en combinant ces données à celles obtenues par les satellites. Le terrain permet de déterminer la distribution du vecteur de la maladie alors que les données de télédétection fournissent des indicateurs tels que la saisonnalité climatique ou l'index de végétation. Les données de la collecte peuvent à tout moment être transférées vers une base de données centralisée pour y être stockées. Le travail de terrain, coûteux et laborieux, est facilité et optimisé.





UNE MODÉLISATION À LA CARTE

Pour affirmer le savoir-faire belge, l'étude **EPISTIS**, démarrée en 2006, s'est poursuivie pendant plus de quatre ans. L'objectif du projet est de créer un réseau d'expertise dans le domaine de la technologie spatiale appliquée à l'épidémiologie. Les équipes ont développé plusieurs outils utilisant la télédétection afin d'obtenir une meilleure analyse de la dynamique spatio-temporelle de la transmission des maladies. Des résultats qui peuvent aider les gestionnaires locaux et les vétérinaires à prendre des décisions cruciales. L'épidémiologie spatiale nécessite une approche multidisciplinaire. Le projet **EPISTIS**, de grande ampleur, a rassemblé sept partenaires, spécialisés dans des disciplines complémentaires : les techniques et les approches des spécialistes

de la télédétection rencontrent celles des spécialistes en épidémiologie. Une richesse qui a amené les équipes des universités et des PME à réfléchir de manière innovante.

Deux cas d'étude ont été choisis. Ils sont fort différents mais complémentaires de par leurs caractéristiques épidémiologiques et les stratégies de contrôle spécifiques leur étant associées. Le premier traite de la présence et de la propagation de la langue bleue, une maladie à vecteurs présente en Belgique, en Italie et dans le bassin méditerranéen. Le second porte sur la dynamique et la transmission d'une maladie très contagieuse, la fièvre aphteuse, dans le Parc national Kruger en Afrique du Sud. Pour une maladie à vecteurs, les facteurs importants sont ceux qui influencent la dynamique et l'installation des vecteurs infectés. Dans le cas d'une maladie contagieuse, l'attention est portée sur la probabilité de contact entre animaux infectés et non infectés ; il faut prendre en compte l'efficacité des barrières érigées pour prévenir ces contacts ainsi que les facteurs affectant la dynamique des animaux infectés.

Si les sujets sont spécifiques, les approches novatrices développées sont, elles, applicables à d'autres maladies (même humaines) aux caractéristiques similaires. L'étude commence par une analyse épidémiologique qui compile les informations sur l'occurrence de la maladie, les vecteurs, les hôtes potentiels, la faune sauvage, le bétail et la population humaine. Des données supplémentaires, comme des cartes de sol ou des indicateurs topographiques, viennent



Carte de risques de contacts entre les buffles sauvages de la réserve animale du Parc Kruger et le bétail situé en dehors.

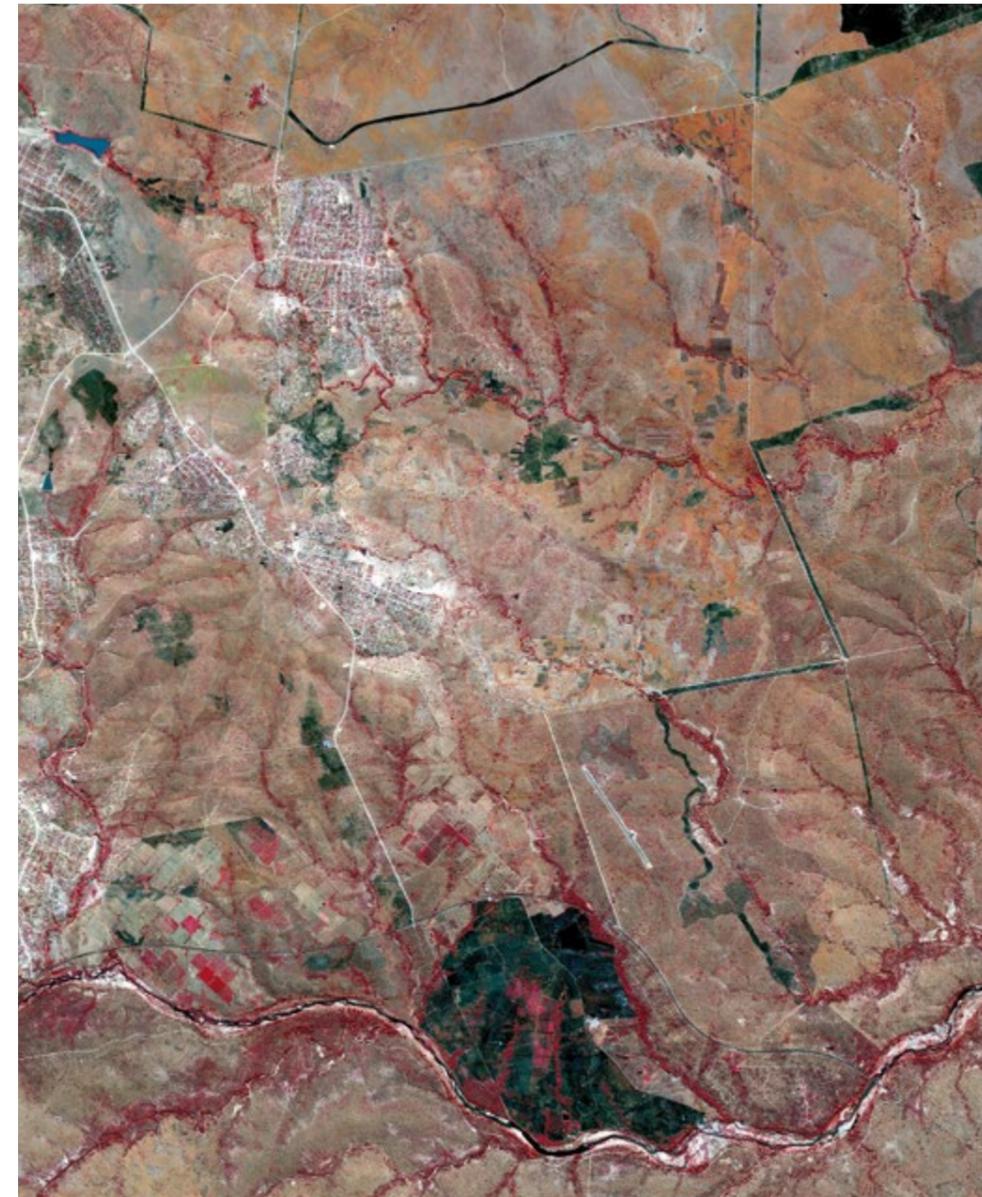
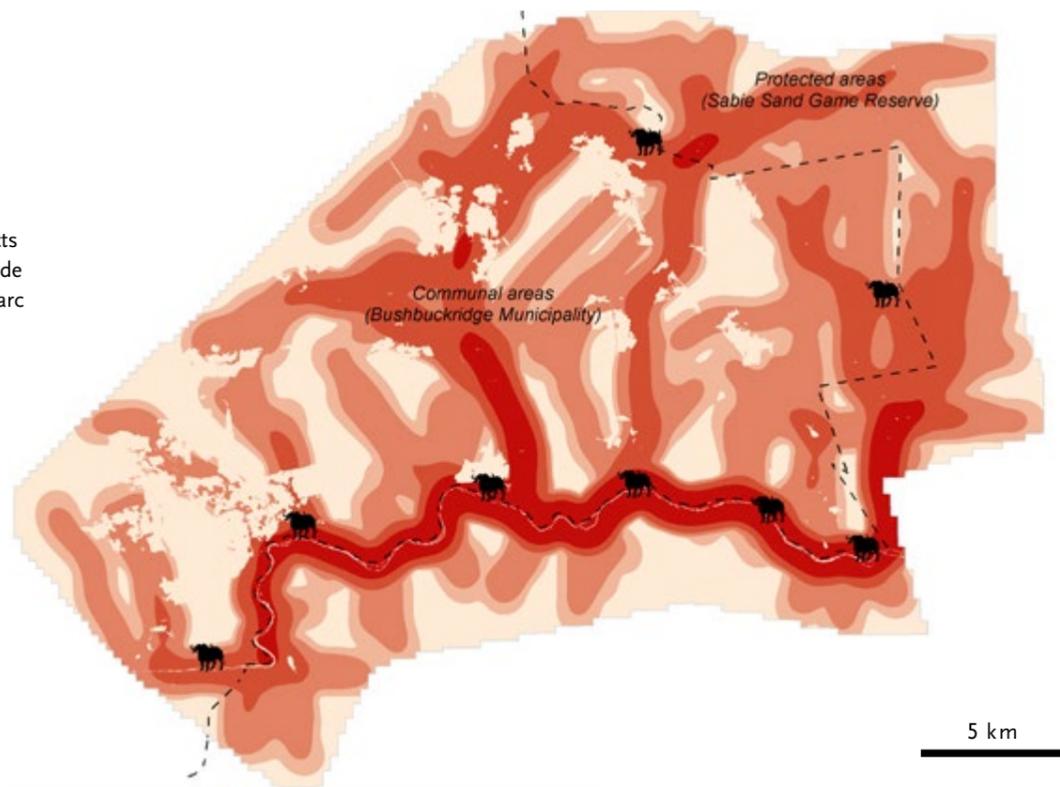


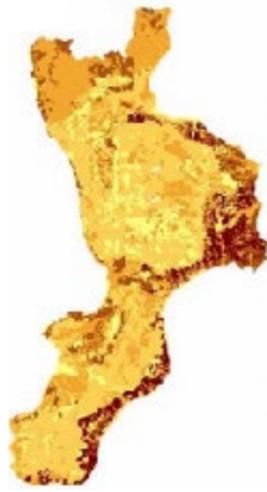
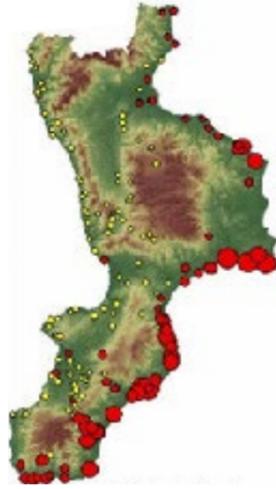
Image WorldView-2 fausses couleurs (proche infra-rouge, rouge, vert) du site d'étude du projet EPISTIS en Afrique du Sud acquise durant la saison sèche (juillet 2012). Plusieurs zones brûlées sont clairement visibles.

s'y greffer. Des données satellitaires de basse, moyenne, haute et très haute résolution sont intégrées et utilisées pour différents types de modélisations, à différentes échelles. Il est ainsi possible de créer un modèle de distribution à l'échelle nationale ou régionale, un modèle de propagation locale, ou un modèle basé sur la très haute résolution pour un résultat détaillé ciblé sur une zone précise. Tous les modèles sont ensuite intégrés dans un Système d'Information Spatio-Temporel (STIS) utilisé comme outil de soutien à la prise de décision.

Les objectifs finaux sont de pouvoir estimer les risques de propagation future, de déterminer le degré d'efficacité des barrières et d'améliorer la gestion et le contrôle de la maladie. **EPISTIS** a créé un véritable réseau d'expertise belge de télé-épidémiologie et a mis en place un grand nombre d'outils innovants : le système d'information STIS, plusieurs nouveaux modèles de distribution et de propagation ainsi que des approches complémentaires de modélisation

du territoire qui s'appuient sur les données de capteurs à haute et très haute résolution. Les applications opérationnelles des résultats du projet vont bien au-delà des activités des laboratoires impliqués dans cette recherche et peuvent être utiles à tout chercheur en télé-épidémiologie.

Sur la même lancée, le projet **EPIDEMOIST** a approfondi l'étude de la maladie de la langue bleue en Italie. L'équipe s'est attaquée à une question particulière : pourquoi la densité de moucheron (vecteurs de la maladie) est-elle différente entre le nord et le sud de la Calabre alors que les conditions climatiques semblent similaires ? Le projet, initié par la PME AVIA-GIS, en collaboration avec l'Université de Gand, a pour objectif d'améliorer l'application VECMAP, et d'affiner les modèles de distribution du moucheron en y intégrant le type de sol et son degré d'humidité. En effet, le cycle de vie des vecteurs possède bien souvent un stade de développement dans le sol qui explique l'impact décisif de ce facteur sur leur distribution spatiale.



En haut : carte de probabilité de présence (rouge)/absence (jaune) du moucheron *C. imicola*, vecteur de la maladie de la langue bleue en Calabre.
En bas : carte de distribution des sols sableux (clair) et argileux (foncé), plus humides.



Pour proposer une alternative aux mesures de terrain fastidieuses et coûteuses, le projet cherche à extraire des indicateurs de l'humidité du sol à partir d'images satellitaires optiques et radar. En effet si les images optiques présentent l'avantage d'être faciles à traiter, elles s'avèrent inutilisables en présence de nuages. Dans ce cas, il faut faire appel aux images radar, mais celles-ci doivent subir plus de traitements avant d'être exploitables. Les deux types d'images ont permis d'extraire trois variables intéressantes : l'inertie thermique apparente, l'index de sécheresse du sol et l'index d'humidité du sol. Ces variables peuvent être intégrées dans les modèles spatiaux d'autres maladies vectorielles.

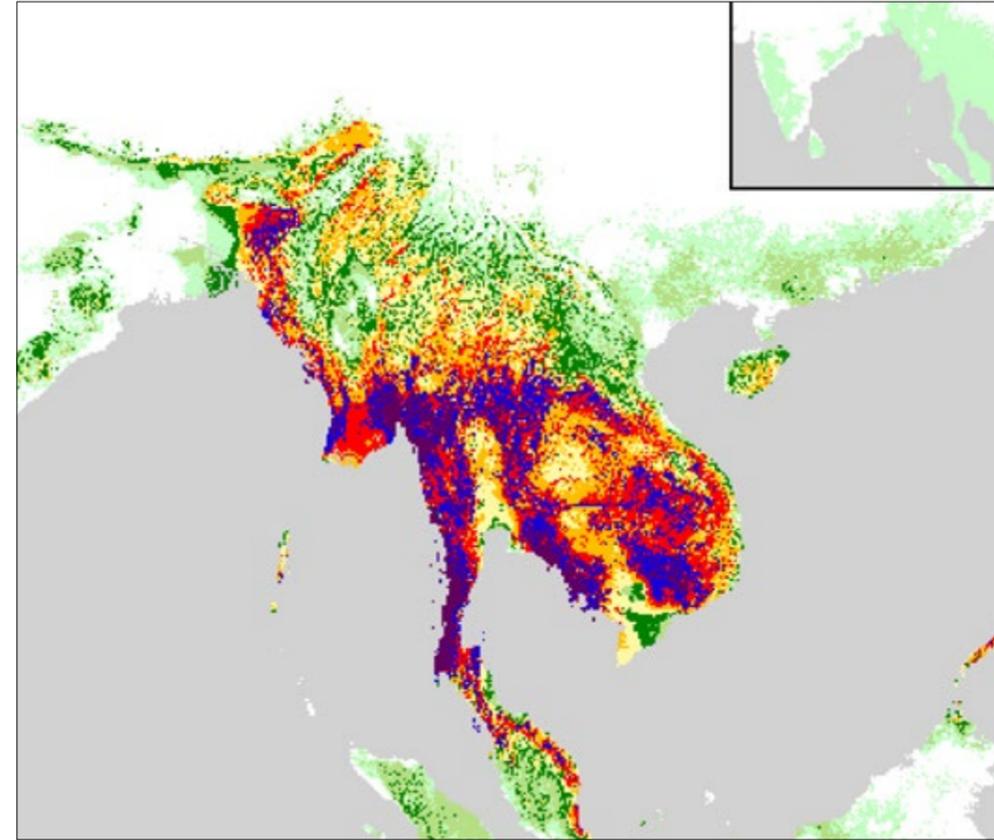
Les résultats obtenus sont très prometteurs mais les méthodes doivent encore être affinées avant d'être opérationnelles. Elles sont notamment peu adaptées en cas de végétation abondante. Néanmoins les avancées du projet permettent de mieux comprendre dès à présent l'impact

de facteurs comme l'humidité du sol ou les barrières de végétation sur la propagation d'une maladie vectorielle, ce qui autorise la mise en place de mesures de contrôle plus efficaces et ciblées.

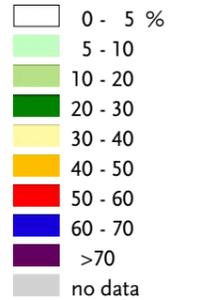
MISE À JOUR AUTOMATIQUE

Et si les cartes de prédiction devenaient dynamiques ? Si une mise à jour facile était envisageable ? C'est le défi que se sont lancé les chercheurs du projet **DYNMAP**. L'idée est la fusion de données provenant de différentes sources et de différentes résolutions spatiales pour obtenir une cartographie prédictive dynamique. La recherche a tenté de développer un tel outil pour l'habitat du moustique vecteur de la malaria en Asie. La méthode obtenue permet de combiner des données de différentes résolutions, mais aussi de mettre à jour de manière quasi automatique les images à haute résolution à l'aide de séries temporelles d'images à basse ou moyenne résolution.

La mondialisation des échanges et l'augmentation du trafic aérien de passagers, illustrée par cette carte du réseau aérien mondial en 2009, sont des facteurs importants de risque de propagation des maladies infectieuses.



Carte de probabilité de présence du moustique *Anopheles dirus sensu lato*, l'une des espèces vecteurs de la malaria en Asie du Sud-est.



Cette application fournit des informations plus détaillées sur l'occupation du sol, comme par exemple l'emplacement des rizières, ce qui autorise les chercheurs à approfondir leurs connaissances sur la relation entre le vecteur de la malaria et les indicateurs environnementaux. Le projet confirme en outre l'hypothèse d'un habitat en récession pour *Anopheles dirus sensu lato* lors de la saison sèche, ainsi que l'influence de paramètres comme l'occupation du sol et l'humidité relative sur la présence du moustique. Le projet a également validé la quantité d'eau contenue dans une feuille comme indicateur valable pour l'approximation de cette humidité relative.

Les résultats de la recherche sont donc multiples et les applications nombreuses. **DYNMAP** a ouvert la voie au développement de nouveaux produits basés sur l'utilisation de données de télédétection et utilisables en épidémiologie. Multidisciplinaire, le projet s'intègre parfaitement dans la philosophie du programme STEREO II. Il est le fruit d'une collaboration étroite entre deux expertises complémentaires : la connaissance pratique du terrain et des maladies de l'Institut de Médecine tropicale et l'expérience théorique du traitement des données et de la classification de l'UCL.

SATHELI, UN ESCARGOT À LA LOUPE

8,2 millions € par an, c'est l'impact économique de la grande douve du foie rien que sur le secteur laitier en Flandre. L'hôte intermédiaire de la grande douve du foie est un escargot, la limnée tronquée (*Galba truncatula*) qui vit dans les mares et flaques d'eau (*Small Water Bodies-SWB*). L'étude SATHELI a débuté en février 2012. La technique "sur mesure" mise au point par les chercheurs pour détecter les zones à risque (les petits points d'eau) allie des données satellitaires WorldView-2 (jusqu'à 50 cm de résolution) à des données encore plus précises récoltées par un drone. À terme, les modèles de prévision de risques d'infection développés permettront aux agriculteurs de mieux choisir les zones et les moments pour faire paître le bétail, de manière à éviter au maximum les infections.



DES PRODUITS ET SERVICES POUR LE CONTINENT AFRICAIN



Cet article se base sur
les projets de recherche

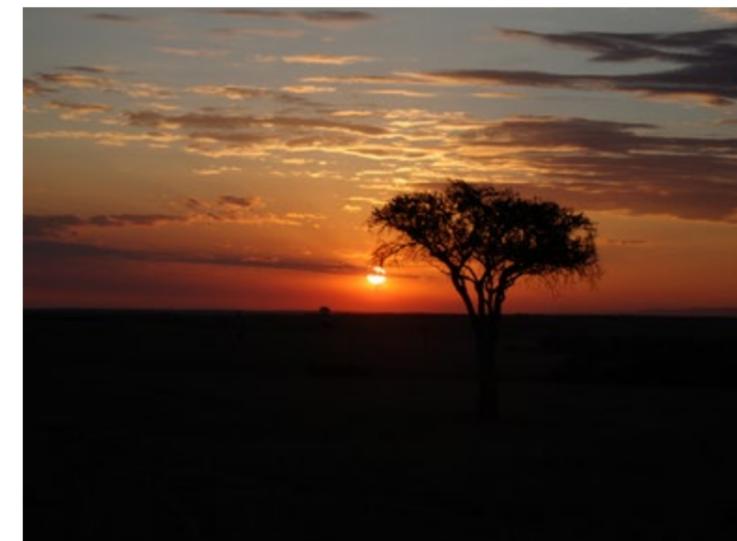
ENDELEO
ENDELEO-OPS
MORECA
WWW
WWW2
POPSATER

Préserver les écosystèmes fragiles, lutter contre la déforestation, prévenir les invasions de criquets, doter la sécurité alimentaire de systèmes d'alerte ou encore recenser les populations...

L'imagerie satellitaire permet aux chercheurs de développer des applications opérationnelles qui répondent aux priorités exprimées par leurs partenaires africains.



À l'entrée du 3^e millénaire, les dirigeants des États de la planète ont approuvé un plan d'action global pour tenter d'éradiquer la pauvreté dans le monde: les Objectifs du Millénaire pour le Développement. Ils se sont engagés à mobiliser leurs efforts pour améliorer les conditions de vie des populations les plus vulnérables et répondre à leurs besoins en termes de sécurité alimentaire, de santé, d'éducation et de préservation de l'environnement. Les grandes institutions des Nations Unies et les organisations non gouvernementales ont quant à elles pour rôle de relayer les demandes locales de soutien et de dynamiser la coopération internationale dans des domaines spécifiques, comme l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'environnement (UNEP) ou la conservation de la nature (WWF).



En soutien à ce projet ambitieux, les informations détaillées, régulières et quasi instantanées fournies par les satellites d'observation de la Terre constituent des outils incontournables. Il est donc crucial de mettre les techniques et les données de télédétection à la portée de tous, de façon à perfectionner les systèmes de gestion et de surveillance de la planète, et ce à tous les niveaux, du plus local au global. De nombreux pays d'Afrique, par exemple, souhaitent, pour répondre à des besoins précis sur le terrain, un accès facilité aux données satellitaires et la création d'un réseau d'échanges avec des pays plus avancés en techniques spatiales.

L'un des volets du programme Stereo II rencontre ce souhait. Plus applicatif, il se consacre en effet au transfert de connaissances et de technologies dans le but de développer des produits et services pré-opérationnels. En interaction continue avec les partenaires africains et les organisations internationales, plusieurs projets s'attellent ainsi à mettre au point des outils de cartographie, d'analyse ou d'évaluation directement utilisables sur le terrain.

UNE GESTION SAINNE DES ÉCOSYSTÈMES AU KENYA

Les écosystèmes naturels en Afrique de l'Est ont subi des modifications considérables ces dernières décennies. Une forte croissance démographique, les changements climatiques ou encore la pression économique sont parmi les principaux facteurs responsables de la surexploitation des ressources naturelles. La dégradation qui en résulte fragilise les écosystèmes et les rend de



plus en plus vulnérables aux catastrophes naturelles telles que les sécheresses récurrentes qui caractérisent le climat de cette région. Il est donc primordial de mettre en œuvre des mesures permettant d'enrayer la dégradation des terres et des ressources.

Au Kenya notamment, les écosystèmes naturels constituent une source de revenus capitale pour les secteurs les plus prospères du pays tels que le tourisme, l'agriculture et la production d'énergie. Les autorités publiques sont bien conscientes qu'une gestion optimale est essentielle pour pouvoir continuer à bénéficier à l'avenir de toutes ces richesses. Comme les organisations environnementales et les gestionnaires locaux, elles sont en demande d'informations actualisées sur l'état et l'évolution des ressources naturelles.

L'imagerie satellitaire est à même de fournir une telle vision synoptique de l'état de la végétation et des changements dans la couverture des sols au fil du temps.

Les projets **ENDELEO** et **ENDELEO-OPS** se sont attelés à fournir des outils simples permettant d'améliorer le suivi de la dynamique et donc la gestion des écosystèmes fragiles en Afrique de l'Est, et en particulier au Kenya. L'objectif est de mettre à la disposition des utilisateurs finaux, et ce de la manière la plus accessible possible, l'information dérivée des images satellitaires sur l'état de la végétation.

Dans une première étape, l'équipe a tenté d'évaluer l'efficacité des mesures de conservation sur les zones sèches vulnérables, à l'aide de séries temporelles d'images. Un outil opérationnel a ensuite été développé pour aider les gestionnaires locaux (d'écosystèmes de prairies principalement mais aussi de forêts) à suivre activement l'impact de leurs interventions.

RENDEZ-VOUS À NAIROBI

Associés aux équipes scientifiques de l'Université de Gand et du VITO, deux partenaires du projet sont basés à Nairobi: le bureau régional pour l'Afrique du Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP) et le Department of Resource Surveys and Remote Sensing qui dépend du Ministère kenyan de l'environnement. Au début du projet, un workshop a réuni des représentants de plusieurs ONG, instituts de recherche et organismes gouvernementaux afin de concilier les besoins en information des différents secteurs avec les moyens offerts par la télédétection. Atteindre cet objectif s'est avéré un challenge en soi, les utilisateurs n'ayant au départ aucune connaissance des possibilités offertes par l'imagerie satellitaire.

Cette consultation a permis de définir les indicateurs quantitatifs à fournir aux utilisateurs finaux à intervalles réguliers: un indice de densité et de vigueur de la végétation (le NDVI, Normalized Difference Vegetation Index, entre autres intéressant pour l'identification d'épisodes de sécheresse) et un indice permettant l'estimation de la production de biomasse

sèche (DMP, Dry matter productivity), utile pour évaluer la productivité des prairies. Ces deux indices sont dérivés de données à basse et moyenne résolution issues de capteurs tels que SPOT VEGETATION et MODIS. Leurs valeurs, actualisées automatiquement tous les dix jours, sont archivées depuis 1999. Ces séries temporelles sont essentielles pour le suivi de la dynamique de la végétation. Elles permettent de mettre en évidence les tendances à long terme mais aussi de révéler des changements saisonniers, en comparant les situations à une période donnée de l'année pour plusieurs années consécutives.

Par ailleurs, pour avoir une vision plus concrète des modifications subies par les écosystèmes, des images Landsat, ASTER et SPOT HRVIR, de plus haute résolution, ont été utilisées pour cartographier les changements d'occupation du sol et certains types de dégradation.

PAR ET POUR LE KENYA

Mené durant près de quatre ans, le projet a impliqué les utilisateurs kenyans à toutes ses étapes. Les outils internet, déjà conçus au départ pour répondre à leurs besoins, ont été améliorés en suivant leurs recommandations, afin d'aboutir à un service sur mesure qui corresponde au mieux à leurs attentes. Le projet a ainsi fait naître des interactions durables entre les utilisateurs et l'équipe **ENDELEO**. Les organisations locales, qui jusque-là n'avaient jamais ou pratiquement jamais utilisé de données satellitaires, sont aujourd'hui sensibilisées aux possibilités offertes par la télédétection et dotées d'un outil précieux en matière de surveillance environnementale et de support à la décision. Ces produits ont démontré leur utilité au quotidien dans la mise en œuvre et l'évaluation des processus de préservation. L'UNEP souhaite dès lors exporter le concept vers d'autres pays d'Afrique de l'Est comme l'Ouganda, l'Éthiopie ou la Tanzanie.

SUIVRE LA VÉGÉTATION EN QUELQUES CLICS

Grâce au projet **ENDELEO**, des outils internet qui permettent, en seulement quelques clics, de visualiser et d'analyser l'information utile ont été développés. Dans un souci de simplicité, les termes techniques ont été évités autant que possible. Une documentation générale étoffée et un manuel d'utilisation détaillé sont cependant disponibles pour ceux qui le désirent. **ENDELEO** s'adresse ainsi à son public-cible, à savoir des organisations actives dans la protection de l'environnement dont les représentants n'ont aucun bagage en matière de télédétection et ne disposent ni de logiciels spécialisés ni de capacités importantes de téléchargement.

L'outil "Image viewer" permet de cartographier précisément l'état de la végétation et d'étudier son évolution en le comparant par exemple avec la moyenne sur dix ans, la dernière année ou les dix derniers jours. L'outil "Graphs" affiche les variations de l'état de la végétation au cours d'une saison de croissance par région et par type de couverture végétale, par rapport à une année moyenne. L'outil "Tables" calcule le pourcentage de diminution ou d'augmentation de l'indice de végétation de l'année en cours par rapport à une année de référence au choix. Enfin, "Focus Area" permet de visualiser les résultats obtenus pour certains cas spécifiques (déforestation, feux...) à l'aide d'images satellitaires plus détaillées.

Le site est également enrichi de plusieurs études de cas qui démontrent concrètement l'utilité des indices de végétation pour la gestion des ressources naturelles. Ces indices ont notamment servi à étudier l'influence de l'état de la végétation sur la migration d'animaux sauvages. Une étude s'est ainsi penchée sur le comportement du zèbre de Grévy, une espèce en voie de disparition, une autre sur celui des éléphants. Ces derniers peuvent en effet occasionner des dégâts importants tant à la végétation naturelle qu'aux cultures lorsque leur territoire est trop réduit.

Les incendies dans l'est du grand complexe forestier de Mau en 2009 et les sécheresses extrêmes qui ont ravagé le Kenya en 2005 et 2009 ont également fait l'objet d'études détaillées. Celles-ci ont permis de démontrer l'utilité des indices de végétation pour évaluer l'impact des catastrophes naturelles, localiser les zones les plus durement touchées et déterminer l'effet de mesures de protection de l'environnement, comme l'interdiction de pâturage dans certaines zones de la forêt de Mau. Par ailleurs, grâce à des séries d'images à haute résolution disponibles depuis 1986, les chercheurs ont pu cartographier les zones déboisées pour plusieurs réserves naturelles sélectionnées par les utilisateurs.



REBOISER LA RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO

Le Parc national des Virunga s'étend sur 790 000 hectares à l'est de la République démocratique du Congo, à la frontière avec le Rwanda et l'Ouganda. Il comprend une chaîne de volcans dont deux sont en activité, et une étonnante variété d'habitats (plaines de lave, savanes, steppes, forêts tropicales naturelles, lacs, marécages...) qui abritent une biodiversité exceptionnelle, représentée par l'emblématique gorille des montagnes. Malgré son inscription au Patrimoine mondial de l'Unesco, le Parc subit une déforestation alarmante, due à l'extension des terres agricoles et des pâturages, mais aussi à une intense exploitation illégale du bois (coupes massives de bois de chauffe et fabrication de charbon de bois).

La province du Nord-Kivu est déstabilisée par des guerres et des combats depuis plus de vingt ans. Sa capitale, Goma, a vu arriver d'innombrables familles rurales fuyant les menaces et actuellement, sa population atteint plus d'un million d'habitants. Le bois et le charbon de bois (appelé makala) sont les seules sources d'énergie aisément accessibles pour cette population. 80 % de ces ressources sont quotidiennement extraites du Parc national voisin. En 2007, le WWF, avec l'aide de l'Union européenne, a initié le programme EcoMakala. Il s'agit de fournir aux familles de Goma un charbon de bois produit à partir de plantations d'arbres à crois-

sance rapide, une activité génératrice de revenus menée par des petits paysans sur des terres situées en périphérie du Parc des Virunga. Cette filière alternative de production d'un makala légal et durable offre le double avantage d'améliorer les conditions de vie des paysans planteurs et de préserver les ressources forestières du Parc. Au total, plus de 5 000 hectares d'arbres ont déjà été replantés dans l'ensemble de ces exploitations de taille réduite (moins de 5 hectares).

COMMENT BÉNÉFICIER DES FINANCEMENTS CARBONE ?

Les plantations EcoMakala, bien que très petites, stockent du carbone et ont pour effet une diminution de la déforestation du Parc national. Elles sont dès lors parfaitement éligibles aux financements carbone. Encore faut-il apporter la preuve que les parcelles répondent aux critères requis. Les images satellitaires peuvent-elles être utilisées à cette fin ?

Pour les reboisements en RDC, la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCCC) a défini comme forêt "éligible" une parcelle d'au moins 0,5 hectare, recouverte de minimum 30 % d'arbres, avec une hauteur potentielle de 3 mètres à maturité, cette parcelle n'ayant pas été couverte de forêt depuis 1990. Bien que la télédétection soit suggérée dans les accords de Kyoto et utilisable pour le suivi de grandes parcelles, aucune étude ne s'était jusqu'alors penchée sur la faisabilité

DES INCITANTS FINANCIERS POUR RÉDUIRE LES ÉMISSIONS DE CARBONE

Afin de lutter contre le réchauffement de la planète, des accords internationaux ont vu le jour. Au cœur de ces accords, le Protocole de Kyoto vise à réduire les émissions des gaz à effet de serre, notamment en luttant contre la déforestation responsable de 20 % de ces émissions au niveau global.

Pour préserver et renforcer les stocks de carbone forestiers, il faut encourager la gestion durable des forêts et le reboisement de parcelles. Deux types de mécanismes de financement carbone ont ainsi été mis en place : le système Boisement/Reboisement du "Mécanisme de Développement Propre", qui valorise l'augmentation de la superficie des forêts, et les certifications REDD+ (Réduction des émissions issues de la déforestation et de la dégradation des forêts) qui visent la diminution de la déforestation. Leur principe est simple : les pays industrialisés soutiennent des projets favorisant la réduction des émissions de carbone dans les pays en développement et en contrepartie, ils bénéficient de crédits qui peuvent être comptabilisés dans leur propre bilan d'émissions.



© K. Holt / WWF-UK

de détecter 30 % de couverture arborée sur une surface de seulement 0,5 hectare. Pour explorer cette question et soutenir ainsi le programme EcoMakala, le WWF a initié le projet MORECA, en collaboration avec l'Université catholique de Louvain et l'Université libre de Bruxelles.

UNE CARTE D'ÉLIGIBILITÉ TRÈS UTILE

Pour établir la carte d'éligibilité des parcelles, différentes méthodes de classification appliquées aux images SPOT à haute résolution (20 mètres) ont été comparées. L'étude a démontré que, dans une situation de paysages montagneux, fragmentés, comme c'est le cas dans l'est de la RDC, une méthode traditionnelle de classification par pixels (et non par objets) donne des résultats très satisfaisants. Elle présente en outre l'avantage d'être compatible avec le logiciel déjà utilisé à l'antenne locale du WWF à Goma ainsi qu'au siège central de la région.

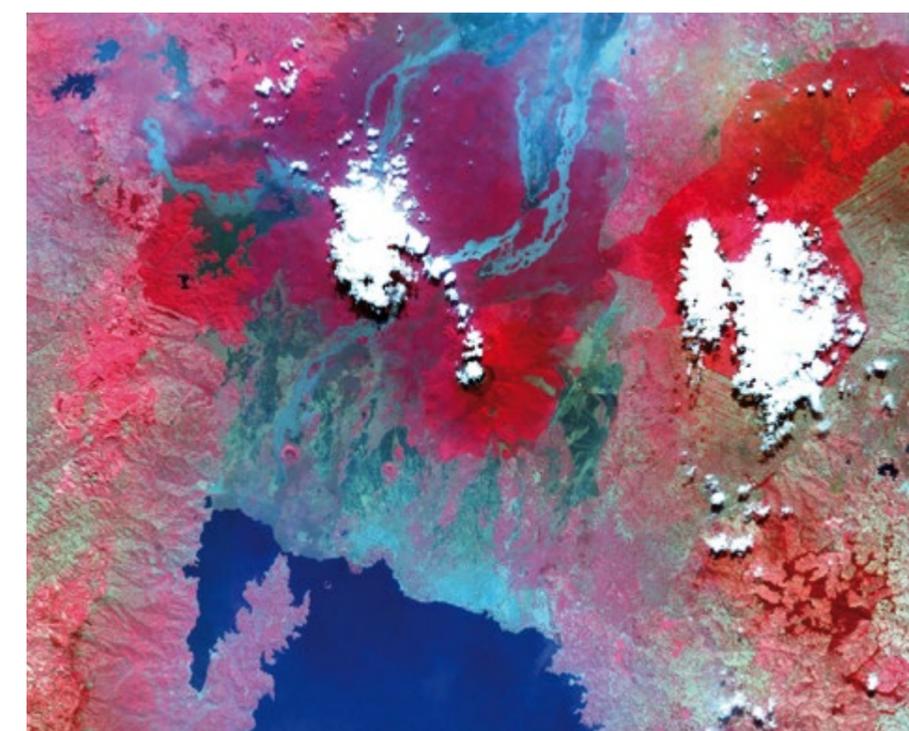
Les cartes produites permettent de calculer les surfaces occupées par le couvert forestier pour chaque parcelle, tout en tenant compte des erreurs de classification et de positionnement. La carte d'éligibilité ainsi obtenue a permis à l'antenne WWF de Goma de fournir les preuves nécessaires à l'octroi des financements pour les plantations EcoMakala. La méthode développée ayant prouvé son utilité, elle pourra être reproduite pour étayer des demandes de fonds pour d'autres régions avec des critères d'éligibilité différents.

Un second volet du projet MORECA a étudié comment suivre l'évolution des parcelles reboisées dans un contexte géographique et social difficile. Les parcelles sont en effet de taille réduite et d'accès malaisé, en raison d'un réseau routier peu développé et de l'insécurité récurrente. Pour élaborer cet outil de suivi, des images satellitaires à très haute résolution et des images radar ont été utilisées. Les images

GeoEye à 60 centimètres de résolution permettent de cartographier le couvert forestier de façon détaillée. Elles sont cependant très coûteuses et leur acquisition en zone tropicale est souvent rendue hasardeuse par l'importance de la couverture nuageuse. Les images radar peuvent quant à elles être obtenues par tous les temps mais leur résolution spatiale est plus faible. Le développement technologique et les tarifs compétitifs pourraient à l'avenir faciliter le développement de tels outils. Les nouvelles perspectives offertes par des satellites comme Pléiades sont à cet égard très intéressantes.

Femme sur le marché de makala, Saké, RDC.

Image SPOT HRV fausses couleurs acquise en août 1996 de la frontière entre la RD du Congo et le Rwanda au nord du lac Kivu. En rouge, la végétation dense délimite les contours du Parc national des Virunga (à gauche, avec les fumées émises par le Nyriragongo) et du Parc national des volcans (à droite).



© JABRUSON



LA BELGIQUE PRODUIT DES SERVICES D'ALERTE

Le programme d'observation de la Terre Copernicus (anciennement GMES) a été initié conjointement par l'Agence spatiale européenne et l'Union européenne afin de doter l'Europe d'une capacité de surveillance indépendante et opérationnelle en matière d'environnement et de sécurité civile, aussi bien à l'échelle locale que globale. La Belgique, activement impliquée dans le programme, met à profit ses pôles d'expertises en télédétection pour développer de nouveaux outils performants. Ceux-ci sont destinés à fournir de l'information fiable, actualisée et de haute qualité qui s'ajuste précisément aux attentes exprimées par les utilisateurs finaux. Dans ce cadre, l'objectif général des projets **WWW** et **WWW2** est de proposer des services opérationnels globaux à certaines communautés spécifiques d'utilisateurs, et ce en tant que contribution belge à l'un des six domaines d'application définis par le programme Copernicus, à savoir la surveillance des territoires et des sols. Les phases de conception et de production de ces nouveaux services sont complètement liées,

l'Unité de Géomatique de l'Université catholique de Louvain prenant en charge le développement scientifique tandis que le VITO implémente les processus dans des chaînes de traitement opérationnelles. Trois services globaux de surveillance continue, en temps quasi-réel et à l'échelle continentale ont ainsi été proposés: "Criquet pèlerin", "Phénologie des cultures" et "Surveillance des forêts tropicales mondiales". Ils sont développés en interaction étroite avec leurs utilisateurs futurs et privilégient une approche multi-capteurs, de façon à générer des applications qui puissent bénéficier de la source d'information disponible la plus adaptée.

LE CRIQUET PÈLERIN, UN FLÉAU MILLÉNAIRE

Le service "Criquet pèlerin" répond à une demande du Centre d'Intervention Antiacridien d'Urgence (ECLO) mis en place par la FAO, l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, afin de lutter contre le fléau que représentent les invasions de cet insecte ravageur. Inoffensif en mode solitaire, le criquet pèlerin, sous l'influence d'un accroissement de la population d'insectes, passe en effet à une forme grégaire qui constitue une menace extrêmement grave pour l'agriculture. Le criquet pèlerin devient alors redoutable, à cause de sa voracité, de la mobilité de ses essaims qui peuvent parcourir jusqu'à 200 kilomètres par jour et de l'immensité des zones concernées. Celles-ci s'étendent sur 29 millions de km², englobant le sud de l'Europe, la totalité de l'Afrique au nord de l'équateur ainsi que les péninsules arabique et indo-pakistanaise.

Lors des invasions, un criquet adulte peut en un jour consommer l'équivalent en matière fraîche de son propre poids, soit environ 2 grammes. Une tonne de criquets, c'est-à-dire une petite partie seulement d'un essaim de taille moyenne, peut ainsi dévorer quotidiennement la même quantité de nourriture que 2500 personnes. Polyphage, le criquet pèlerin grégaire s'attaque tant à la végétation naturelle, privant le bétail de son alimentation, qu'à aux cultures vivrières et aux plantations. Des pertes de récoltes considérables sont donc souvent à déplorer. Si la situation s'installe, la famine menace et c'est la survie de populations entières qui est en jeu. La grande invasion de 2004-2005 en Afrique de l'Ouest reste encore dans les mémoires, avec un bilan éloquent: 26 pays affectés, 6,5 millions d'hectares dévastés, 13 millions d'hectares traités avec des pesticides et des pertes de récoltes estimées à quelque 2,5 milliards de dollars...

DES CARTES DYNAMIQUES DE L'HABITAT DU CRIQUET PÈLERIN

Le projet **WWW** a produit des outils permettant d'améliorer la surveillance de la végétation et des conditions d'humidité dans les zones arides et semi-arides qui constituent l'habitat naturel

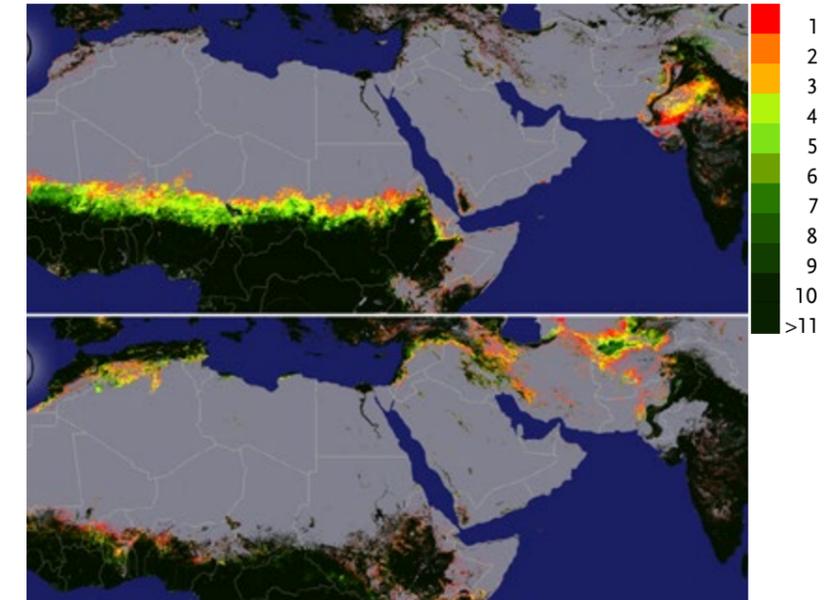
du criquet pèlerin lors de ses périodes calmes de rémission. Il s'agit de renforcer l'action des équipes locales de contrôle pour empêcher la résurgence des criquets et la formation de grands essaims. En effet, lorsque les précipitations augmentent et que la végétation croît, les criquets pèlerins peuvent se multiplier très rapidement et leur densité peut atteindre des seuils menaçants.

Pour optimiser les systèmes d'alerte précoce, l'équipe du projet a développé une nouvelle méthode d'analyse d'images multispectrales et multitemporelles pour la détection automatique et presque en temps réel de la végétation dans les zones arides et semi-arides. Les images utilisées sont des séries temporelles SPOT VEGETATION et Aqua/Terra MODIS. L'originalité de la méthode consiste à combiner les analyses multispectrales et colorimétriques du signal spectral. Elle se base sur une technique novatrice de prétraitement des images, sur l'utilisation simultanée des 3 canaux Rouge, Infrarouge et Moyen Infrarouge, et sur la transformation du système colorimétrique commun RGB (Red-Green-Blue) en un autre système mieux adapté HSV (Hue-Saturation-Value).

Une chaîne de traitement automatique complète a été développée et génère, sur base des observations quotidiennes des capteurs MODIS et VEGETATION, une carte dynamique de la végétation de l'ensemble de l'aire de rémission du criquet pèlerin. Délivrée de manière opérationnelle tous les 10 jours par le VITO, cette carte à 250 mètres de résolution résume en un seul fichier image la distribution spatiale et temporelle de la végétation. Elle permet d'identifier plus précisément les zones potentielles de reproduction du criquet et donc de mieux orienter les contrôles de terrain. Pour les équipes en charge des alertes acridiennes à la FAO actives dans le projet, cet outil est une aide précieuse pour la prédiction des calendriers et des zones de reproduction et de migration du criquet pèlerin. La communauté internationale dispose ainsi d'un système d'alerte plus performant et plus rapide qui fonctionne en continu, en temps quasi-réel et à l'échelle continentale.

DEUXIÈME PHASE, SURVEILLER LES FORÊTS ET LES CULTURES

Dans la deuxième phase du projet, **WWW2**, le service "Surveillance des forêts tropicales mondiales" a été initié en réponse à une demande du Centre de surveillance de la conservation de la nature, mis en place par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP-WCMC). Pour améliorer les systèmes d'alerte, le service consiste à détecter de façon automatique et à l'échelle de la planète les changements au sein des forêts tropicales, notamment les zones déboisées, les feux, les variations de niveau des étendues d'eau (débordements et assèchements),

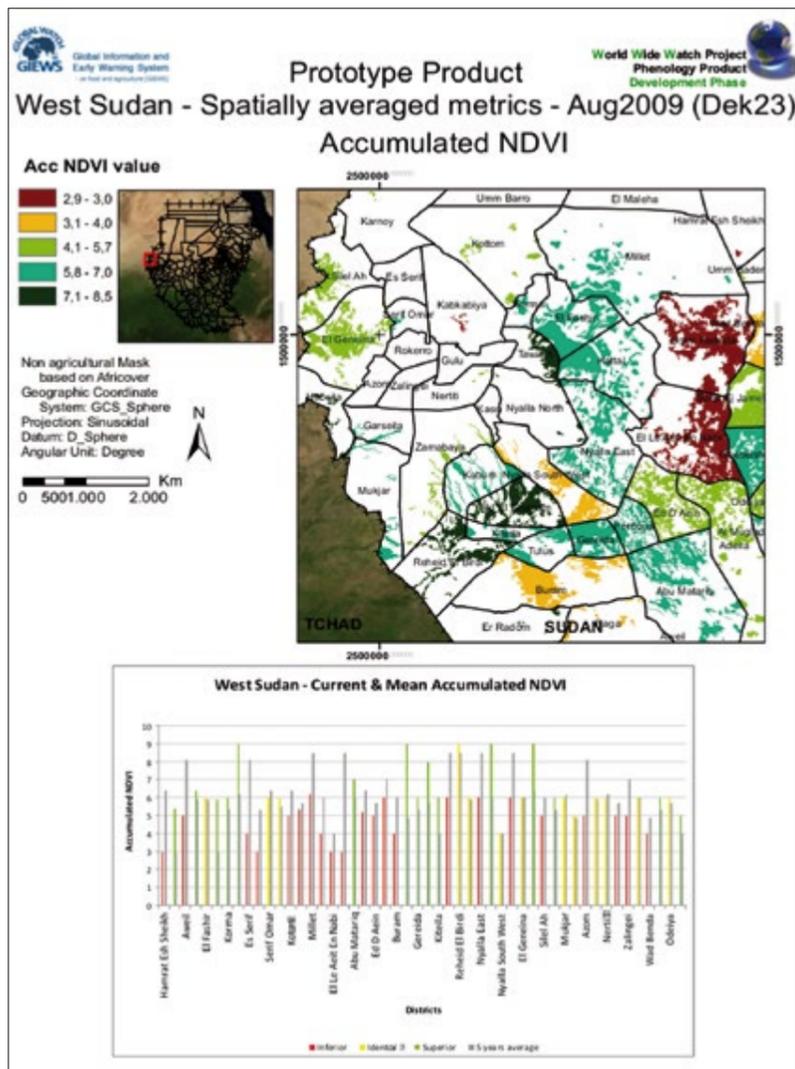


ou encore la régénération de la végétation. Le produit est basé sur des séries d'images saisonnières de basse et moyenne résolution provenant de plusieurs capteurs. La performance d'un tel service dépend en effet de la fréquence d'acquisition d'images de qualité et sans nuages. En zone tropicale, la couverture nuageuse est bien entendu un frein à l'obtention de séries utilisables. En contrepartie, la forêt tropicale étant un environnement présentant un faible niveau de saisonnalité, les acquisitions peuvent être plus espacées.

Le service "Phénologie des cultures" a également été développé en partenariat étroit avec une instance de la FAO, le "Système mondial d'Information et d'Alerte rapide sur l'Alimentation et l'Agriculture" (SMIAR). Dédié à la sécurité alimentaire, le SMIAR a pour mission de surveiller en continu l'offre et la demande mondiales de produits agricoles, et d'assurer l'alerte précoce des crises alimentaires susceptibles d'affecter certains pays. Ce service permet de surveiller la variabilité interannuelle des cultures agricoles, à l'échelle régionale ou nationale. Leurs paramètres phénologiques, c'est-à-dire l'observation de leurs phases saisonnières de développement, sont de première importance pour caractériser les zones agro-écologiques. Ce type d'information est essentiel pour connaître la situation présente et les perspectives de récoltes mais aussi pour étudier à plus long terme les fluctuations dues au changement climatique.

Traditionnellement, les données phénologiques sont extraites d'un indice de végétation tel que le NDVI, avec une fréquence de 10 jours, et indépendamment du type de couverture de sol et du contexte agro-écologique. À partir de séries temporelles d'images multispectrales SPOT VEGETATION et MODIS, les équipes de **WWW2** se sont attachées à caractériser plus

Carte dynamique de la végétation le 1/09/2008 (en haut) et le 21/03/2009 (en bas). Les couleurs représentent le nombre de périodes de 10 jours durant lesquelles la zone a été recouverte de végétation.



Produit phénologique prototype illustrant les valeurs de NDVI accumulées pour une période donnée dans une région de l'ouest du Soudan. Ces données cartographiques sont complétées par des statistiques comparatives sous forme de graphe.

spécifiquement la phénologie de la végétation agricole et à mettre au point une méthode qui tienne compte des types de couverts. L'algorithme proposé peut en effet être réglé en fonction du type de couverture de sol et donc fournir aux utilisateurs finaux des données plus pertinentes. Il est composé d'une série de 10 indicateurs phénologiques importants, parmi lesquels les dates de début et de fin de la période végétative, la date de développement maximal, le taux de croissance et de sénescence, la durée de croissance, etc. Le service "Phénologie des cultures" est en phase de prototype pré-opérationnel et sera à terme intégré dans une version optimisée de la station de travail du SMIAR, la plate-forme web qui gère et distribue les informations mondiales relatives à la sécurité alimentaire.

ESTIMER LES POPULATIONS GRÂCE AUX IMAGES SATELLITES

Pour mener à bien le développement social et économique d'un pays ou d'une région, il est indispensable de connaître avec précision l'état et la dynamique de sa population. Cette information est aussi cruciale pour gérer, en période de crise, les déplacements de civils entraînés par les guerres ou les catastrophes. Malheureusement, de nombreux pays, particulièrement en Afrique, ne disposent que de données partielles et approximatives sur leur nombre réel d'habitants, et ces données sont d'autant moins précises que la population croît rapidement.

Depuis leur émergence à la fin des années 1990, les images satellitaires à très haute résolution offrent des opportunités inédites pour observer les zones habitées de manière détaillée. Si tout ne peut pas être vu à partir de l'espace (par exemple, le nombre de personnes vivant dans une maison), ces images

permettent néanmoins de mesurer d'autres paramètres importants comme le nombre d'habitations ou la typologie des quartiers, qui peuvent être directement liés au nombre d'habitants.

Le projet **POPSATER** a tenté de développer une nouvelle méthode d'estimation démographique, tant en zone urbaine qu'en zone rurale, basée sur l'utilisation combinée d'images à haute et très haute résolution complétées d'enquêtes de terrain. Il a été initié par un partenariat entre trois entités belges regroupant leurs expertises complémentaires : une société privée spécialisée en produits d'information géographique, une unité de recherche de l'Université libre de Bruxelles et un bureau d'étude axé sur la collecte de terrain et l'analyse de données socio-démographiques.

La très haute résolution des images QuickBird (60 centimètres) permet de distinguer les habitations et donc de les compter manuellement ou de manière automatique si le contraste est élevé. Pour estimer la population, une approche directe peut donc être appliquée, en multipliant le nombre d'habitations par le nombre moyen d'occupants, cette dernière information étant extraite d'une série d'enquêtes de terrain. Lubumbashi, en République démocratique du Congo, a été sélectionnée comme zone test de milieu urbain car un recensement y était disponible. L'approche directe a mis en évidence des résultats différents entre le centre-ville et la périphérie, où les chiffres de population obtenus étaient nettement plus proches de la réalité.

Deux facteurs expliquent cette disparité : d'une part, la petite taille et la densité des habitations du centre-ville ne permettent pas d'y détecter automatiquement les habitations individuelles ; d'autre part, la confusion entre les toits des habitations (tôles ondulées) et les routes goudronnées perturbe la bonne extraction du bâti. Afin de résoudre ce problème, d'autres méthodes ont été testées, notamment à partir de l'estimation de la surface habitée : on ne cherche alors plus à comptabiliser les maisons mais bien la surface habitée c'est-à-dire la surface que représentent tous les toits des habitations. Dans ce cas, l'estimation de population repose sur une approche zonale : la surface de la zone bâtie est mesurée et multipliée par la densité d'habitants échantillonnée dans quelques blocs de maisons. À Lubumbashi, il a toutefois été difficile de trouver une unité spatiale où la densité d'occupants était constante. La ville présente en effet une grande diversité au sein d'un même îlot, avec des habitations plus bourgeoises qui côtoient des habitations de bidonville.

En milieu rural, les méthodes ont été testées sur un territoire situé au nord du Bénin. Les résultats obtenus à partir d'images à très haute réso-

lution se sont révélés fiables, mais compte tenu du coût élevé de ces images, la technique n'est pas idéale pour couvrir de grandes étendues. Des tests ont donc été réalisés à l'aide d'images SPOT 5 à haute résolution (5 mètres), moins chères. Ces dernières ne permettent pas d'identifier chaque habitation mais bien d'estimer la surface bâtie. Si les hameaux les plus petits ne sont pas toujours détectés, pour les villages de taille moyenne, la méthode zonale s'est avérée efficace car la densité d'occupants par habitation y est relativement stable.

À la suite de **POPSATER**, de nouvelles collaborations entre l'équipe de démographes et la société de télédétection ont vu le jour et ont permis de remporter plusieurs appels d'offre concernant des estimations de population.

Extraction automatique du bâti sur une image satellitaire à très haute résolution (QuickBird).

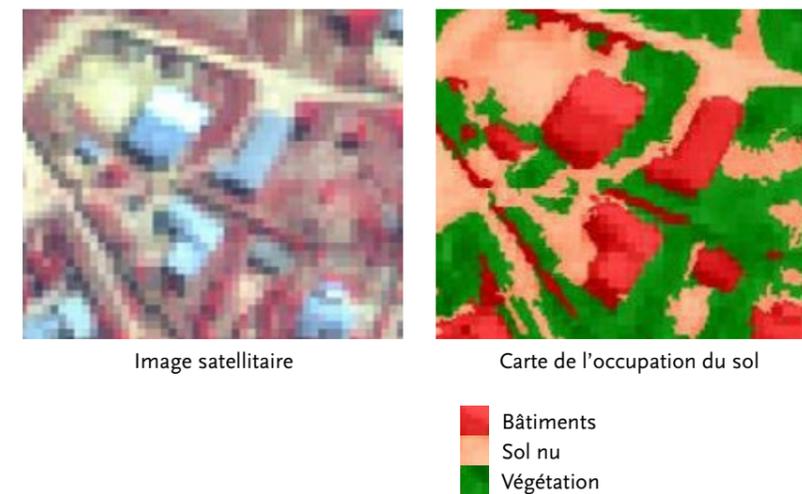


Image QuickBird (60 cm de résolution) d'un quartier de Lubumbashi.

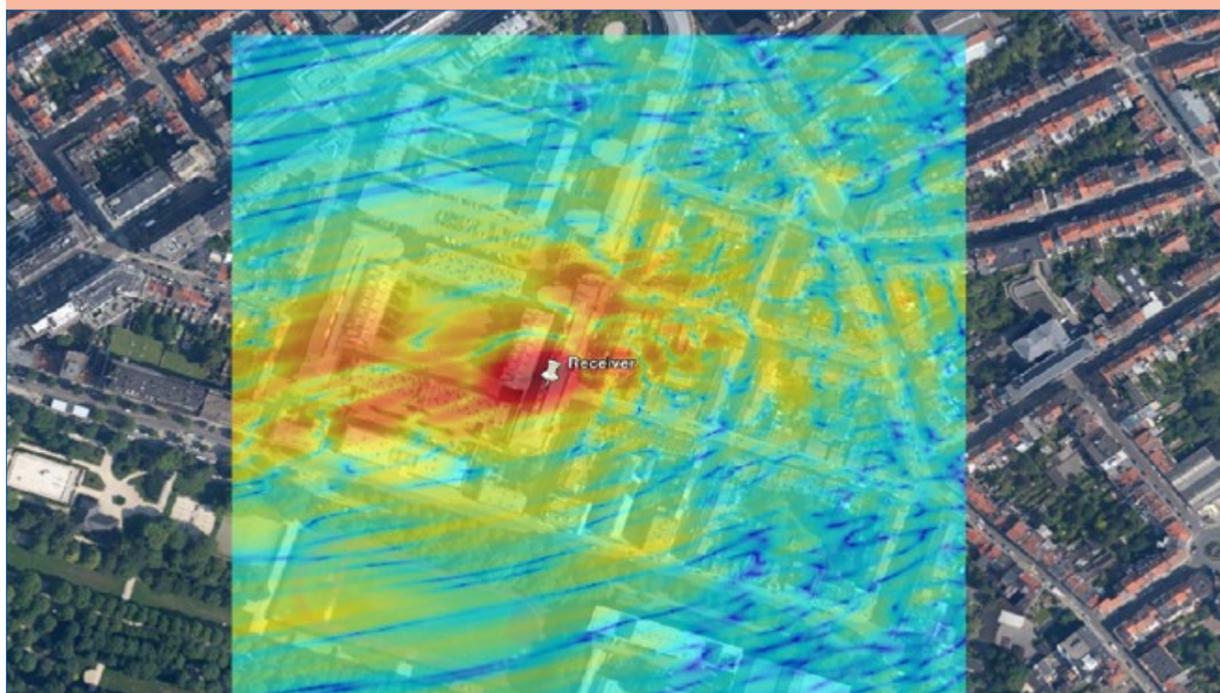


APPROCHES NOVATRICES ET FACETTES INEXPLORÉES

MUSAR UN RÉCEPTEUR RADAR SANS ÉMETTEUR ?

Contrairement aux capteurs passifs qui enregistrent une partie du rayonnement solaire réfléchi ou réémis par la surface de la Terre, le capteur radar est actif: il envoie lui-même un signal électromagnétique qui "illumine" le terrain et mesure ensuite l'écho rétrodiffusé par la cible dans sa direction. N'étant pas dépendant de la luminosité, il présente l'avantage non négligeable d'être opérationnel de jour comme de nuit. Les ondes qu'il émet ayant la capacité de traverser les nuages, la qualité de ses observations est de plus assurée par tous les temps. Le radar, en particulier le SAR (Synthetic Aperture Radar), est un outil de choix pour des applications comme l'estimation de l'humidité du sol et le contrôle des infrastructures (bâtiments, routes...). La rétrodiffusion de l'onde radar est en effet tributaire de l'humidité de surface; par ailleurs, la technique d'interférométrie permet de détecter depuis l'espace des mouvements très ténus, le déplacement des ponts et des barrages par exemple.

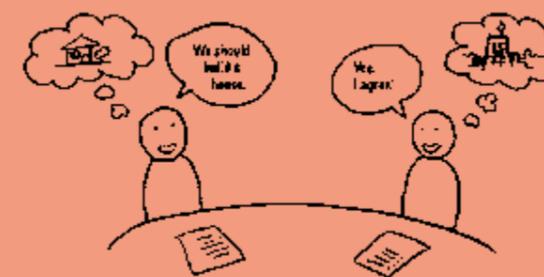
Intensité des signaux (directs et indirects) captés par un récepteur opportuniste, drapée sur une image aérienne de Bruxelles.



La plupart des instruments SAR comportent à la fois l'émetteur et le récepteur. Par une nouvelle approche, le projet **MUSAR** a mis à l'étude une configuration "bistatique" c'est-à-dire où l'émetteur et le récepteur sont disjointes. Dans une telle configuration, l'émetteur peut se trouver à bord d'un satellite, tandis que le récepteur est installé sur le toit d'un bâtiment. Celui-ci peut ainsi capter les signaux retour de tout émetteur survolant sa zone. Les avantages du système sont la multiplication des informations utilisables, la diminution du temps de revisite d'un même site et l'économie du coût de l'émetteur.

Les recherches ont porté sur le problème de synchronisation entre les deux entités, et sur le développement d'un nouvel algorithme de reconstruction des images qui diffère des méthodes classiques.

WAVARS UNE POINTE DE PSYCHOLOGIE EN TÉLÉDÉTECTION



Dans l'analyse des images satellitaires, la perception et l'interprétation d'un opérateur humain jouent souvent un rôle important et ce, même quand le traitement de l'image est largement informatisé. Or les données manquent pour évaluer la performance des opérateurs. Le projet **WAVARS** s'est intéressé à ce volet de la télé-détection, à l'aide d'outils de psychologie cognitive. Plus de 300 participants, experts ou novices, ont ainsi été conviés à réaliser une série de tâches d'interprétation d'images numériques en un certain laps de temps. L'idée est d'évaluer dans quelle mesure les résultats obtenus sont sujets à l'erreur, et aussi de mettre en lumière les critères qui permettent d'expliquer les différences de performance d'une personne à l'autre (âge, sexe, niveau d'éducation, personnalité) et d'un test à l'autre (conditions de l'expérience, temps imparti, etc.).

L'étude a montré qu'il existait une grande variabilité dans l'efficacité des opérateurs, que l'on peut imputer pour près de 30 % à des facteurs humains ou externes, ce qui est notable. Un autre résultat incontestable est la diminution progressive de la performance après un certain temps de travail, indiquant l'importance de faire des pauses lorsqu'on effectue de longues sessions d'interprétation. L'approche du projet peut servir à mettre au point des instruments d'évaluation du processus d'analyse d'images, et s'intégrer à des méthodes de formation ou de sélection professionnelles.

Des opérateurs concentrés sur le questionnaire WAVARS.



PROCESS UNE SEULE CHAÎNE DE TRAITEMENT POUR DE NOMBREUX CAPTEURS

Les produits de télé-détection à haute résolution sont appréciés et demandés par un cercle toujours plus large d'utilisateurs, depuis la communauté scientifique jusqu'au grand public. Parmi les systèmes d'observation, les capteurs aéroportés de dernière génération (comme APEX, AVIRIS ou HyMAP) rencontrent ainsi un intérêt croissant. Pour fournir des produits et services de qualité adaptés aux besoins des utilisateurs, il est crucial de pouvoir traiter les données de manière fiable et efficace. Le VITO a déjà développé une chaîne de traitement performante et applicable à divers capteurs d'images fixes ou de vidéos, multispectrales ou hyperspectrales. Cette chaîne de traitement est implémentée au sein du CDCP (Central Data Processing Centre).

Le projet **PROCESS** a étudié comment étendre la chaîne de traitement existante à deux nouveaux capteurs: d'une part, un capteur thermique exploité par le Centre de recherche public Gabriel Lippmann (Luxembourg) et d'autre part, le capteur hyperspectral HYPLANT du Centre de recherche de Jülich (Allemagne), dédié à l'observation de la fluorescence émise par la végétation sous la lumière du soleil. L'approche générale du projet est ainsi d'optimiser la flexibilité des algorithmes mis en œuvre dans la chaîne existante, pour pouvoir traiter génériquement et de façon dynamique les données issues du plus grand nombre possible de capteurs aéroportés.



INDEX & SOMMAIRE

- 1 Coordinateur(s)
- 2 Promoteur(s)

DES RISQUES CALCULÉS 10

FLOODMOIST

Cartographie des inondations et estimation de l'humidité du sol pour une meilleure gestion de l'eau

- 1 Niko Verhoest
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 • Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• University of Bristol (Grande-Bretagne)

GORISK

Utilisation conjointe des techniques terrestres et satellitaires comme outil d'évaluation du risque volcanique et de l'impact sur la santé dans la région de Goma (Nord Kivu, République démocratique du Congo)

- 1 Anne-Catherine Van Overbeke
Musée royal de l'Afrique centrale / Département des Sciences de la Terre
- 2 • Musée national d'Histoire naturelle du Luxembourg (Luxembourg)
• Université du Luxembourg (Luxembourg)
• Università degli Studi di Napoli Federico II (Italie)
• United Nations Office for Project Services (République démocratique du Congo)
• Observatoire volcanique de Goma (République démocratique du Congo)
• Université libre de Bruxelles / Cemubac

HYDRASENS

Intégration de la télédétection par radar et des modélisations hydrologiques et hydrauliques pour la gestion des eaux de surface

- 1 Niko Verhoest
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 • Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• Université Gent / Vakgroep Wiskundige modellering, Statistiek en Bio-informatica
• Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement

RIMS

Systèmes fiables de gestion d'images en appui aux services urbains et de gestion des catastrophes

- 1 Sidharta Gautama
Université Gent / Vakgroep Telecommunicatie en Informatieverwerking
- 2 • VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Incubator Geoinformation (IncGeo)

SPRINT

Techniques spatiales d'interférométrie radar pour le déminage et la remise à disposition des terres

- 1 Alain Muls
École Royale Militaire / Département Communication, Information, Systems and Sensors

Vi-X

Exploitation de la constellation satellite TanDEM-X pour l'étude et la surveillance de l'activité volcanotectonique dans le bassin du lac Kivu

- 1 François Kervyn
Musée royal de l'Afrique centrale / Département des Sciences de la Terre
- 2 • Musée national d'Histoire naturelle du Luxembourg (Luxembourg)
• Centre Spatial de Liège (CSL-ULg)

SÉCURITÉ ALIMENTAIRE 20

ADASCIS

Les techniques d'observation de la Terre comme support aux systèmes d'évaluation des dégâts dans le cadre des assurances récoltes

- 1 Emile Goffin
Service public fédéral Économie, PME, Classes moyennes et Énergie
- 2 • Université de Liège / Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Centre wallon de Recherches agronomiques / Biométrie, Gestion des données et Agro-météorologie

EVA-3M

Evapotranspiration : synergie entre MSG et satellites de résolution moyenne pour un suivi à haute résolution

- 1 Françoise Meulenberghs et Nicolas Ghilain
Institut royal météorologique / Modélisations hydro-météorologiques

GLOBAM

Systèmes de suivi global de la production agricole grâce à l'intégration de l'observation de la Terre et de techniques de modélisation

- 1 Pierre Defourny
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 • Université de Liège / Département des Sciences et Gestion de l'Environnement
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Université Wageningen (Pays-Bas)
• Institut royal météorologique / Modélisations hydro-météorologiques
• European Commission / Joint Research Centre



HYPERMIX

Fusion de données hyperspectrales et hyperspatiales et techniques d'unmixing pour obtenir à la fois une bonne résolution spatiale et spectrale

- 1 Stephanie Delalieux et Birgen Haest
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Université Antwerpen / Visielab

MOCA

Suivi du carbone organique des sols agricoles par télédétection hyperspectrale

- 1 Bas Van Wesemael
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître
- 2 • Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• Université de Liège / Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

SENSOR

Amélioration des produits de télédétection de l'humidité du sol par l'utilisation de radar à pénétration de sol (GPR)

- 1 Sébastien Lambot
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 École Royale Militaire / Département Communication, Information, Systems and Sensors

SOC-3D

Suivi en trois dimensions du carbone organique du sol en utilisant des techniques de réflectance dans le VNIR

- 1 Bas Van Wesemael
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître
- 2 • Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• University of Tel Aviv (Israël)

DES VILLES ET DES HOMMES 30

ASIMUD

Analyse d'incertitude et assimilation de données de télédétection pour la modélisation de la dynamique urbaine

- 1 Guy Engelen et Hans van der Kwast
VITO / Intégrale milieustudies
- 2 • Vrije Universiteit Brussel / Vakgroep Geografie
• Université Utrecht (Pays-Bas)

BIOHYPE

Biosurveillance de la qualité de l'habitat urbain à l'aide d'observations hyperspectrales aéroportées

- 1 Roeland Samson
Université Antwerpen / Département Bio-ingenieurswetenschappen
- 2 • Universitat de València (Espagne)
• Université Hasselt / Onderzoeksgroep Moleculaire en Fysische Plantenfysiologie

MAMUD

Mesure et modélisation de la dynamique urbaine : impact sur la qualité de vie et l'hydrologie

- 1 Frank Canters
Vrije Universiteit Brussel / Vakgroep Geografie
- 2 • European Commission / Joint Research Centre
• Université Gent / Vakgroep Geografie
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Université de Liège / Unité de Géomatique
• Vrije Universiteit Brussel / Vakgroep Hydrologie en Waterbouwkunde

VALI-URB

Étalement urbain et corridors écologiques : consolidation de méthodes d'analyses d'images à très haute résolution spatiale

- 1 Éléonore Wolff
Université libre de Bruxelles / Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
- 2 • Université de Rennes (France)
• Université de Strasbourg (France)

ECOSEG

Développement d'un algorithme de segmentation spatio-temporelle pour le suivi des conditions forestières à l'aide de séries temporelles d'images satellitaires

- 1 Pol Coppin
Katholieke Universiteit Leuven / Afdeling M3-BIORES
- 2 Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (Australie)

FOMO

Analyse de la transition forestière et de ses impacts sur les écosystèmes dans des régions de montagne à l'aide de la télédétection (Équateur - Bhoutan - Carpates)

- 1 Eric Lambin
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître
- 2 Katholieke Universiteit Leuven / Departement Aard- en Omgevingswetenschappen
• Humboldt-Universität zu Berlin (Allemagne)

GRAZEO

Amélioration de la modélisation du risque de contact buffles-bétail à l'aide d'indicateurs d'aptitude au pâturage

- 1 Eléonore Wolff
Université libre de Bruxelles / Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
- 2 Council for Scientific and Industrial Research (Afrique du Sud)

HYPERFOREST

Techniques avancées de télédétection aéroportée LiDAR et hyperspectrale pour la gestion forestière

- 1 Pol Coppin
Katholieke Universiteit Leuven / Afdeling M3-BIORES
• Pieter Kempeneers
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Universiteit Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
• Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• Universität Zürich (Suisse)
• Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO)

UNESCO-WATCH

Méthode opérationnelle de suivi par télédétection des sites naturels du Patrimoine mondial de l'UNESCO en forêts tropicales

- 1 Mario Hernandez
United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)
- 2 Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement

VEGECLIM

Intégration de séries décennales SPOT-VEGETATION et d'un modèle de la surface terrestre pour prédire la dynamique du carbone terrestre sous l'effet du changement climatique

- 1 Pierre Defourny et Emmanuel Hanert
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (France)
• Universiteit Gent / Vakgroep Toegepaste Ecologie & Milieubiologie

L'ARCHÉOLOGIE AUTREMENT

48

ANAGHLIA

Analyse et validation-terrain de données hyperspectrales et LiDAR en archéologie

- 1 Gert Verstraeten
Katholieke Universiteit Leuven / Departement Aard- en Omgevingswetenschappen
• Ils Reusen
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Johannes Gutenberg - Universität Mainz (Allemagne)
• Groninger Instituut voor Archeologie (Pays-Bas)
• Hungarian National Museum - National Heritage Protection Centre (Hongrie)

APLADYN

Dynamique des paysages anthropiques et naturels dans les grands systèmes fluviaux

- 1 Gert Verstraeten
Katholieke Universiteit Leuven / Departement Aard- en Omgevingswetenschappen
- 2 Katholieke Universiteit Leuven / Faculteit Letteren
• Universiteit Gent / Vakgroep Geografie
• Technische Universiteit Delft (Pays-Bas)

BIODIVERSITÉ MENACÉE

52

ESSENSE

La télédétection pour la cartographie des services écosystémiques de régulation

- 1 Birgen Haest
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Universiteit Antwerpen / Departement Biologie
• Basque Centre for Climate Change (Espagne)

HABISTAT

Cartographier et surveiller les habitats protégés des landes de manière détaillée et efficace à l'aide de la télédétection

- 1 Birgen Haest
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Vrije Universiteit Brussel / Vakgroep Geografie
• Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO)
• Universiteit Wageningen (Pays-Bas)
• Universiteit Antwerpen / Visielab

HEATHRECOVER

La télédétection en aide à la restauration écologique des landes affectées par des incendies

- 1 Birgen Haest
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (Pays-Bas)
• Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO)
• NASA / Jet Propulsion Laboratory (États-Unis)
• Agentschap voor Natuur en Bos (ANB)

RE-LEARN

Réutilisation de données de terrain dans l'espace et le temps pour la cartographie de la végétation: le potentiel des techniques semi-supervisées et "d'active learning"

- 1 Paul Scheunders
Université Antwerpen / Visielab
- 2 VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Universitat de València (Espagne)

REMEDY

Télé-surveillance de la dynamique des écosystèmes tropicaux

- 1 Ben Somers
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen

VEGEMIX

Détection d'espèces d'arbres invasives dans la forêt tropicale d'Hawaï à l'aide de données satellitaires hyperspectrales multi-temporelles

- 1 Els Knaeps et Ben Somers
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Katholieke Universiteit Leuven / Departement Aard- en Omgevingswetenschappen
• Carnegie Institution of Science (États-Unis)

MILIEUX AQUATIQUES

58

ALGASED

La télédétection pour la caractérisation des sédiments intertidaux et des algues microphytobentiques

- 1 Jaak Monbaliu
Katholieke Universiteit Leuven / Departement Burgerlijke Bouwkunde
- 2 Nederlands Instituut voor Ecologie (Pays-Bas)
• Universiteit Gent / Onderzoeksgroep Mariene Biologie
• Centre for Environment, Fisheries & Aquaculture Science (Grande-Bretagne)

BELCOLOUR-2

Télédétection optique des eaux marines et intérieures

- 1 Kevin Ruddick
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord
- 2 Australian Commonwealth Scientific and Research Organization (Australie)
• Université libre de Bruxelles / Laboratoire d'Écologie des Systèmes Aquatiques
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Université de Liège / Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
• Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (France)

BEL-GOYA

Dynamique des panaches estuariens à partir de données optiques MERIS, MODIS et GOCI

- 1 Kevin Ruddick
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord

BESST

Estimation des biais inter-capteurs dans les mesures de températures de surface de la mer

- 1 Aida Alvera-Azcárate
Université de Liège / Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
- 2 Météo France (France)

GEOCOLOUR

Préparation à la télédétection géostationnaire des couleurs de l'océan

- 1 Kevin Ruddick
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord
- 2 Université de Liège / Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
• Mississippi State University (États-Unis)

HISEA

Génération de champs de température de surface de la mer à très haute résolution

- 1 Jean-Marie Beckers et Aida Alvera-Azcárate
Université de Liège / Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie

INSHORE

Intégration de données de télédétection optique et acoustique portant sur le continuum plage/avant-plage: étude de cas à Ostende

- 1 Els Knaeps
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Universiteit Gent / Renard Centrum voor Mariene Geologie

JELLYFOR

Prévision des arrivées de méduses sur base d'observations satellitaires

- 1 Kevin Ruddick
Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord

MICAS

Surveillance des eaux intérieures et littorales avec l'instrument APEX

- 1 Koen Meuleman
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 Universität Zürich (Suisse)

RE-COLOUR

Reconstruction de scènes couleurs

- 1 Jean-Marie Beckers
Université de Liège / Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie
- 2 Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord

RESORT

La télédétection pour le suivi des TSM (Total Suspended Matter) en toutes saisons et toutes régions

- 1 Koen Trouw
International Marine and Dredging Consultants
- 2 • VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• VITO / Integrale milieustudies

SEASWIR

Télédétection des eaux troubles dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR: 1-3µm)

- 1 Els Knaeps
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 • Institut royal des Sciences naturelles de Belgique / Unité de Gestion du Modèle Mathématique de la mer du Nord
• Laboratoire d'Océanographie de Villefranche (France)
• Instituto de Astronomía y Física del Espacio (Argentine)

TÉLÉ-ÉPIDÉMIOLOGIE

70

BUSHTICK

Changements des pratiques agricoles, embroussaillage et risques de maladies à tiques dans le sud de la Norvège

- 1 Sophie Vanwambeke et Patrick Meyfroidt
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître

DYNMAP

Cartographie prédictive dynamique par fusion de données multi-capteurs : démonstration pour l'habitat des vecteurs de la malaria

- 1 Pierre Defourny
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 Institut de Médecine Tropicale Prince Léopold / Département des Sciences biomédicales

EPIDEMOIST

Amélioration de modèles épidémiologiques à l'aide de proxies pour l'humidité du sol issus de la télédétection

- 1 Els Ducheyne
Agriculture and Veterinary Information and Analysis (AVIA-GIS)
- 2 • Universiteit Gent / Vakgroep Wiskundige modellering, Statistiek en Bio-informatica
• Universiteit Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
• Universiteit Gent / Vakgroep Telecommunicatie en informatieverwerking

EPISTIS

Outils de télédétection pour l'étude de l'épidémiologie et de la dynamique espace/temps des maladies

- 1 Eléonore Wolff
Université libre de Bruxelles / Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
- 2 • Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître
• University of Pretoria (Afrique du Sud)
• Université libre de Bruxelles / Lutte biologique et Écologie spatiale
• Institut de Médecine Tropicale Prince Léopold / Département des Sciences biomédicales
• Agriculture and Veterinary Information and Analysis (AVIA-GIS)
• Istituto Zooprofilattico Sperimentale dell'Abruzzo e del Molise 'G. Caporale' (Italie)

MULTITICK

Étude multi-échelles et multi-instruments des facteurs environnementaux de la distribution des maladies à tiques

- 1 Sophie Vanwambeke
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître

SATHELI

Synergie entre imagerie satellitaire à très haute résolution et imagerie micro-hélicoptère pour la caractérisation spatio-temporelle de la dynamique des petites surfaces d'eau

- 1 Frieke Van Coillie
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 • Agriculture and Veterinary Information and Analysis (AVIA-GIS)
• Universiteit Gent / Vakgroep Virologie, Parasitologie en Immunologie

TICKRISK

Évaluation de l'adéquation écologique pour la diffusion de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* en Afrique de l'Ouest

- 1 Sophie Vanwambeke
Université catholique de Louvain / Centre de recherche sur la Terre et le Climat G. Lemaître
- 2 • Institut de Médecine Tropicale Prince Léopold / Département des Sciences biomédicales
• Universidad de Zaragoza (Espagne)

DES OUTILS POUR L'AFRIQUE

78

ENDELEO

Développement d'un outil basé sur la télédétection pour évaluer l'impact de la sécheresse et des mesures de protection sur les écosystèmes d'Afrique de l'Est

- 1 Rob De Wulf
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 • United Nations Environment Programme (UNEP)
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen

ENDELEO-OPS

Support aux services basés au Kenya d'évaluation de l'impact de la sécheresse et des mesures de protection sur les écosystèmes d'Afrique de l'Est

- 1 Rob De Wulf
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 • United Nations Environment Programme (UNEP)
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Ministry of Environment and Mineral Resources / Department of Resource Surveys and Remote Sensing (Kenya)

MORECA

Suivi de vastes projets de reboisement de petites exploitations en appui aux mécanismes de financement "carbone"

- 1 Mone Van Geit
WWF
- 2 • Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
• Université libre de Bruxelles / Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire

POPSATER

Estimation de population par télédétection

- 1 Herbert Hansen
KeyObs
- 2 • Université libre de Bruxelles / Institut de Gestion de l'Environnement et d'Aménagement du Territoire
• ADRASS asbl

WWW

World Wide Watch - Surveillance globale et opérationnelle de l'habitat du criquet pèlerin pour la FAO/ECLC à l'aide de services issus de l'observation de la Terre

- 1 Pierre Defourny
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 • VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
• Food and Agriculture Organization (FAO)
• United Nations Environment Programme (UNEP)
• European Commission / Joint Research Centre

WWW2

World Wide Watch - Surveillance globale à l'aide de services fournis par l'observation de la Terre – Suivi de l'agriculture pour la FAO/GIEWS

- 1 Pierre Defourny
Université catholique de Louvain / Sciences de l'environnement
- 2 • European Commission / Joint Research Centre
• Food and Agriculture Organization (FAO)
• United Nations Environment Programme (UNEP)
• VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen

PROJETS NOVATEURS

88

MUSAR

Etude de l'imagerie multistatique SAR opportuniste

- 1 Marc Acheroy
École Royale Militaire / Département Communication, Information, Systems and Sensors
- 2 Centre Spatial de Liège (CSL-ULg)

PROCESS

Chaînes de traitement pour capteurs thermique et de fluorescence

- 1 Els Knaeps
VITO / Teledetectie en aardobservatieprocessen
- 2 • Centre de Recherche public Gabriel Lippmann / Département Environnement et Agrobiotechnologies (Luxembourg)
• Forschungszentrum Jülich GmbH (Allemagne)

WAVARS

Système d'évaluation en ligne de la variabilité des performances entre opérateurs dans l'interprétation des images de télédétection

- 1 Frieke Van Coillie
Université Gent / Vakgroep Bos- en Waterbeheer
- 2 Université Gent / Vakgroep Personeelsbeleid, Arbeids- en Organisationspsychologie

L'ÉQUIPE STEREO



Gestion du programme

Jean-Christophe Schyns
schy@belspo.be
Joost Vandenabeele
vdab@belspo.be

Earth Observation Helpdesk
(EO Desk)

Pieter Rottiers
ropi@belspo.be
Martine Stélandre
stel@belspo.be

Support de gestion

Chantal Oudaert
ouda@belspo.be

Plus d'info : eo.belspo.be

Éditeur reponsable: René Delcourt
Avenue Louise 231, 1050 Bruxelles.

Coordination: Martine Stélandre, Politique scientifique fédérale.
stel@belspo.be - eo.belspo.be

Chantal Debauche et Pauline de Wurstemberger, Millefeuilles, Martine Stélandre, Politique scientifique fédérale, sur base de textes fournis par les équipes scientifiques citées dans cette publication.

Traduction: Dice.
www.dice.be

Corrections et support: Pieter Rottiers, Jean-Christophe Schyns et Joost Vandenabeele,
Politique scientifique fédérale.

Conception graphique: Millefeuilles.

Impression: FedoPress.
Imprimé avec des encres végétales sur un papier respectueux de l'environnement.

Tous les chapitres thématiques sont disponibles en format PDF sur eoedu.belspo.be/stereo.

Photo de couverture : Mississippi river acquired by the OLI instrument on NASA's Landsat 8 satellite in February 2014. ©NASA Earth Observatory image by Michael Taylor and Adam Voiland, using Landsat data from the U.S. Geological Survey.

False-colour image of Brussels acquired by the Spot-5 satellite on 28 September 2011.
© Airbus Defence and Space.

© Politique scientifique fédérale 2015
Reproduction autorisée moyennant citation de la source.

Numéro de dépôt légal: D/2015/1191/02

