

SCIENCE

50

mars - avril 2016

connection

LA RECHERCHE CLIMATIQUE EN BELGIQUE

www.scienceconnection.be
paraît cinq fois l'an
bureau de dépôt: Bruxelles X
/ P409661
ISSN 1780-8456



recherche



espace



nature



art



documentation

Politique scientifique fédérale



belspo .be

Le magazine de la POLITIQUE SCIENTIFIQUE FÉDÉRALE

Editorial

ACCORD SUR LE CLIMAT

Un accord sur le climat a été signé le samedi 12 décembre 2015 à Paris. Il est difficile d'évaluer précisément l'intérêt de cet accord. Il permettra de réduire les émissions de CO₂, et d'assurer un air plus pur et une eau plus propre, une augmentation moins rapide du niveau de la mer, une amélioration de la santé publique au niveau mondial, une croissance économique durable et, à terme, une certaine stabilité, ainsi qu'une sécurité accrue.

Les négociations qui ont abouti à cet accord ont été longues et ne se sont pas déroulées sans mal. Il est aujourd'hui question de les concrétiser dès que possible, avant que nous ne nous laissions submerger, au sens propre du terme. Plus tôt l'accord sera exécuté avec succès, plus fort sera l'impact et plus grands en seront les avantages.

Durabilité et crédibilité sont essentielles pour faire de 'Paris' un succès effectif. Pour garantir cette crédibilité, les mécanismes de monitoring qui figurent dans l'accord de Paris sont également appliqués de manière effective. C'est le seul moyen pour que l'accord réponde effectivement à l'impact exponentiel des changements climatiques sur la vie sur terre. Dans ce cadre, j'aimerais souligner le rôle précurseur que la Politique scientifique fédérale, avec l'aide considérable des autorités flamande et wallonne, a joué dans l'élaboration d' *ICOS-ERIC*¹, une nouvelle infrastructure de recherche pan-européenne qui fournit des mesures de gaz à effet de serre à long terme. Le réseau de recherche se porte garant de la fourniture continue de séries de données standardisées sur une période de vingt ans. La surveillance à long terme des gaz à effet de serre est absolument indispensable pour la compréhension du cycle du carbone et la prévision du climat futur.

L'opinion publique doit garder à l'esprit que le réchauffement du climat c'est plus qu'une vague de chaleur occasionnelle en été ou des hivers doux. C'est un phénomène qui influence considérablement le monde et ses habitants. Le phénomène est en partie causé par des actes humains. Seuls des actes humains peuvent y remédier. Les scientifiques et les politiciens doivent donner le signal qu'un changement *durable* de l'économie globale pauvre en CO₂ est indispensable, nécessaire, mais également efficace.

L'Accord de Paris n'est pas un point final. Ce n'est pas l'apogée de nos ambitions en matière de basses émissions, mais le fondement. Tous les peuples du monde et les générations futures comptent sur notre vision et notre courage.



Elke Sleurs
Secrétaire d'État à la Politique scientifique

¹ Integrated Carbon Observation System – European Research Infrastructure Consortium.

NOTRE CLIMAT CHANGE : LA RECHERCHE DANS CE DOMAINE EST INDISPENSABLE !

Comme vous pourrez vous en apercevoir en parcourant le présent numéro du *Science Connection*, le fil conducteur qui a été retenu est celui du changement climatique. Nous voulions mettre sous la lumière des projecteurs les nombreux domaines de recherche et projets actuellement en cours dans cette matière ô combien importante pour l'avenir de notre planète terre. Cette problématique climatique fait l'objet d'analyses et de recherches non seulement financées dans les Établissements scientifiques fédéraux mais aussi dans nos excellentes universités belges au travers de ressources fédérales.

Il est vrai que l'attention des médias internationaux et l'intérêt public suscités lors de la COP 21 ont souligné la pertinence sociale de cette menace, laquelle apparaît de plus en plus comme l'un des plus grands défis à venir pour l'humanité. Alors que l'attention se focalisait principalement sur l'accord obtenu lors de cette conférence sur le climat à Paris, en présence des chefs de gouvernement, nous ne pouvons que saluer avec enthousiasme le contenu de cet accord et nous devons tous veiller à sa bonne exécution.

Mais nous ne devons en aucun cas oublier que la recherche menée en Belgique dans les universités et les ESF, dont l'expertise et les résultats ont été reconnus sur le plan international, a contribué de manière significative et peut-être moins visible, certes, aux progrès engendrés dans cette problématique.

Dans le même temps, force est de constater que bon nombre de compétences et de champs de recherche sont encore très épars dans notre pays. Une meilleure multi- et pluridisciplinarité intersectorielle serait de nature à donner aux décideurs politiques, ainsi qu'aux acteurs privés et publics, des tableaux de bord climatiques de tout premier ordre qui leur permettront non seulement de comprendre la vulnérabilité de notre société eu égard au changement climatique mais aussi de traduire les découvertes de la recherche en actions concrètes «orientées résultats».

Les fidèles lecteurs du *Science Connection* pourront constater sans hésitation que la Politique scientifique fédérale (BELSPO), consciente de la problématique, a soutenu très tôt et encouragé sans réserves la recherche climatique. Pour ce faire, elle a favorisé des coopérations et la création de réseaux et a toujours continué à placer à l'ordre du jour scientifique belge les études sur le changement climatique. Dans ce contexte, j'aimerais à nouveau féliciter les chercheurs, les équipes de recherche et les experts des universités et des ESF pour les résultats de recherche qu'ils ont obtenus, les données acquises et leur expertise bâtie en matière de changement climatique et de recherche y associée.

Compte tenu de l'importance que revêt cette matière, nous ne pouvons que formuler avec insistance le vœu que les coopérations - surtout celles générées entre acteurs scientifiques - puissent se développer à l'avenir de manière encore plus performante et coordonnée. Ceci nous permettrait d'apporter non seulement notre modeste pierre à l'objectif poursuivi dans le prolongement de l'accord intervenu lors de la COP 21 mais aussi de circonscrire les scénarios dramatiques du changement climatique en posant les jalons d'une véritable politique climatique belge.



René Delcourt

Président a.i. du Comité de direction de la Politique scientifique fédérale



Une expertise belge mobilisée pour relever le défi climatique

Les enjeux climatiques sont tels qu'ils nécessitent une mobilisation toujours croissante de la communauté scientifique internationale, appelée à agir de manière coordonnée sur les différents fronts de la recherche, à savoir :

- mieux comprendre l'évolution du climat;
- analyser et prédire les conséquences des dérèglements climatiques;
- proposer des mesures pour limiter le réchauffement et s'y adapter.

Des programmes de recherche nationaux consacrés à l'étude des changements climatiques et leurs conséquences
BELSPO soutient divers outils et développe des schémas de financement en vue de positionner les scientifiques belges à l'avant-garde des recherches liées au climat. Les exemples repris dans les pages suivantes reflètent la contribution des

scientifiques belges à l'effort de recherche européen et international et illustrent l'extrême variété des expertises nécessaires pour appréhender cette problématique.

Depuis 1988, BELSPO développe et met en œuvre des programmes pluriannuels de recherche en réseaux sur les changements climatiques. Les recherches couvrent un large champ de thématiques, des plus fondamentales au plus appliquées et s'intéressent à de multiples échelles temporelles et à différentes zones climatiques dont l'Antarctique, région particulièrement sensible aux perturbations du climat. Grâce à une approche interdisciplinaire inhérente à ces programmes, les connaissances acquises sont aujourd'hui en mesure d'alimenter le nouveau concept de 'services climatiques' et, plus généralement, s'inscrivent en support aux politiques de développement durable.

Dans le domaine spatial, BELSPO est en charge de la contribution belge à l'ESA et permet l'implication d'acteurs belges dans de nombreux projets et actions relatifs au changement global, notamment au sein du programme CCI (Climate Change Initiative).

Dès 1985, BELSPO a mis en place un programme belge de recherche en observation de la Terre, aujourd'hui appelé STEREO, dont l'un des objets est l'étude des interactions entre modifications de la couverture du sol et changements climatiques. Les satellites sont en effet les instruments par excellence de suivi global des interactions entre les océans, les continents et l'atmosphère. Au sein des autres théma-

Science Connection Édition spéciale La recherche climatique en Belgique

Introduction	2
1. Système et évolutions climatiques	4
1.1. Surveillance à long terme	4
1.2. Dynamique du système climat	8
1.3. Projections climatiques	18
2. Impacts climatiques et vulnérabilités	20
3. Adaptation aux changements climatiques et mesures d'atténuation	27

tiques, de nombreux projets s'intéressent aux impacts des changements climatiques dans des domaines variés: sécurité alimentaire, milieux marins, gestion des risques, problèmes sanitaires, biodiversité, patrimoine culturel ...

Une recherche climatique nationale inscrite dans les stratégies européenne et internationale

BELSPO et les Etablissements scientifiques fédéraux (ESF) participent à Copernicus, un programme de l'Union européenne qui a pour but de doter l'Europe de services opérationnels d'accès aux informations environnementales.

Ils participent également à des initiatives européennes de programmation conjointe tels que le JPI (Joint Programming Initiatives) Climate dont le Secrétariat est hébergé à BELSPO et qui rassemble 16 pays pour coordonner leurs recherches sur le climat. 40 agences de financement et organes d'exécution de la recherche (l'IRM et BELSPO pour la Belgique) mobiliseront conjointement avec la Commission européenne un budget de l'ordre de 72 millions d'euros pour le développement de services climatiques.

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) : entre science et décision

BELSPO est le point focal national du GIEC. Avec l'assistance de l'équipe du Prof. van Ypersele (UCL), la Belgique a, depuis plus de 15 ans, activement contribué aux travaux du GIEC, organe créé pour fournir aux décideurs les informations les plus récentes et objectives possibles, tant scientifiques que technico et socio-économiques, nécessaires au développement de stratégies de lutte contre le changement climatique. A la 21e Conférence des Parties (COP21) de Paris fin 2015, c'est sur base du dernier rapport d'évaluation du GIEC qu'a été élaboré le nouvel accord international visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Des outils pour le climat

Affiner la connaissance sur l'évolution du climat et apporter une base scientifique étayée pour les décideurs implique des mesures harmonisées à l'échelle européenne et internationale et la mise à disposition de données de haute précision.

- L'infrastructure pan-européenne ICOS-RI connecte plus de 100 stations mesurant la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et leurs flux au travers des écosystèmes marins et terrestres. La Belgique met à sa disposition

10 stations de mesure. L'une d'elles est installée sur le navire océanographique A962 Belgica qui, en continu, collecte diverses données telles que le pH et la pCO₂.

- En collaboration avec l'ESA, la Belgique a développé les satellites SPOT-VEGETATION et PROBA-V qui, depuis 1998, offrent à la communauté internationale des données de haute qualité permettant un suivi continu de l'état de la végétation globale sur une base quotidienne. Un tel outil est primordial tant pour l'évaluation des stocks de carbone que pour le suivi des impacts des changements climatiques; un successeur à PROBA-V est dès lors d'ores et déjà prévu.

- Dans le cadre de Copernicus, 6 familles de satellites d'observation de la Terre, les Sentinelles fourniront des informations sur la végétation, les zones urbaines ou les mers, mais aussi sur les concentrations des gaz à effet de serre, les températures ou la qualité de l'air.

- EUMETSAT, l'organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques, exploite une flotte de satellites en orbites géostationnaire et polaire qui fournissent des données essentielles pour le suivi de la météo, du climat et de l'environnement.

Les auteurs

Aline van der Werf (Direction Programmes de recherche-BELSPO) et Martine Stélandre (Direction Applications aérospatiales-BELSPO)

Plus

BELSPO (1985-2016): Programmes GC - PADDI - PADDII - SSD - BRAIN-be - STEREO

www.belspo.be/belspo/research/index_fr.stm

ESA's CCI: <http://cci.esa.int>

Copernicus – Sentinelles: <http://copernicus.eu>

JPI climate: www.jpi-climate.eu

GIEC: www.ipcc.ch

ICOS: www.icos-ri.eu

BELGICA: <http://odnature.naturalsciences.be/belgica>

PROBA-V: <http://proba-v.vgt.vito.be>

EUMETSAT: www.eumetsat.int

PARTIE 1 : SYSTÈME ET ÉVOLUTIONS CLIMATIQUES

1.1. SURVEILLANCE À LONG TERME

L'évolution du climat belge

L'EXPLOITATION DES ARCHIVES CLIMATOLOGIQUES PERMET L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION DES CLIMATS RÉGIONAUX EN BELGIQUE

Les longues séries climatologiques de la station d'Uccle donnent les grandes tendances de l'évolution du climat belge depuis plus de cent ans. Des recherches en cours permettront également de caractériser cette évolution ailleurs dans le pays.

Evolution du climat à Uccle

L'IRM a publié l'an passé la brochure *Vigilance climatique 2015* qui présente les différentes activités de recherches menées à l'Institut dans le cadre des changements climatiques¹. Un chapitre est consacré à l'évolution du climat belge depuis plus de cent ans. Pour ce faire, la station climatologique de référence d'Uccle a principalement été utilisée. Depuis les années 1880, on y mesure quotidiennement de nombreux paramètres météorologiques. Précédemment, depuis 1833, les mesures étaient effectuées à l'Observatoire de Saint-Josse-ten-Noode. Il ressort des analyses effectuées que le climat de la région bruxelloise a évolué depuis le début du 20^e siècle. En particulier, la température moyenne annuelle a augmenté d'environ 2°C, avec les 4 années les plus chaudes après 2005. La vitesse moyenne du vent a diminué au cours des dernières décennies et les quantités maximales annuelles de précipitations cumulées sur une période de quelques jours ont augmenté significativement. Par contre, on n'observe pas

de tendance à long terme pour la durée d'insolation, les quantités maximales annuelles de précipitations horaires ou la fréquence des tempêtes.

Numérisation de longues séries d'observations

L'étude de l'évolution climatique ailleurs dans le pays demande de disposer d'autres longues séries d'observations de qualité. Depuis quelques années, dans le cadre des programmes financés par BELSPO pour la Numérisation du Patrimoine culturel et scientifique des Etablissements scientifiques fédéraux, l'IRM a entrepris la numérisation systématique des observations climatologiques effectuées depuis les années 1880 dans le réseau climatologique belge. Environ 5 millions de données journalières ont ainsi déjà été encodées. Ces données concernent les données journalières de précipitations et de températures extrêmes (températures maximale et minimale).

Etude des climats régionaux

L'étude de l'évolution du climat à partir des données instrumentales brutes pose un certain nombre de problèmes spécifiques. En effet, outre la présence inévitable de valeurs erronées dans les séries d'observations, de nombreux types de changements des conditions de mesures au cours du temps (tels que les changements d'instruments ou

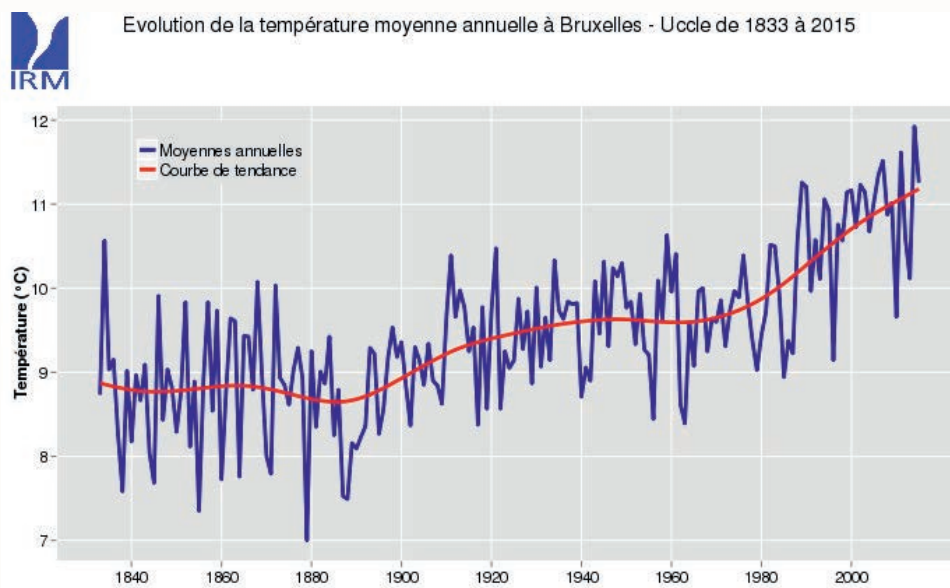


Figure 1: Evolution de la température moyenne annuelle à Bruxelles/Uccle de 1833 à 2015. Les températures ont été ramenées à l'abri fermé utilisé depuis les années 1980 comme abri de référence.



Figure 2 : Un exemple de changement de conditions de mesures : différents types d'abris thermométriques (semi-ouverts, fermés) ont été utilisés depuis la fin du 19^e siècle dans le parc climatologique à Uccle.

d'abris, les déplacements des stations, etc.) peuvent introduire des variations non négligeables dans les séries de mesures qui viennent se superposer au signal climatique. Il est donc primordial de détecter et corriger les biais présents dans les séries de données (c'est ce que l'on appelle 'l'homogénéisation' des séries d'observations). L'IRM a récemment entrepris de produire de longues séries d'observations thermométriques et pluviométriques validées et homogénéisées pour plusieurs endroits du pays². Ces séries de référence permettront d'établir dans le futur des diagnostics fiables sur l'évolution du climat en Belgique, tant au niveau national que régional.

Les auteurs

Christian Tricot et Cédric Bertrand, Institut royal météorologique (IRM), Service scientifique Renseignements météorologiques et climatologiques

Notes

¹ http://www.meteo.be/resources/20150508vigilance-oogklimaat/vigilance_climatique_IRM_2015_WEB_FR_BAT.pdf.

² Cette recherche sur les climats régionaux est actuellement menée grâce à des financements BELSPO, via les projets 'Belgian Homogenized Long-term Reference Climate Time Series' (BEL-HORNET, BRAIN.be) et 'Development of a gridded dataset of daily climate data for Belgium' (engagement de chercheurs supplémentaires).

Koninklijk Meteorologisch Instituut van België *IRM* Waarnemingspost van Haacht Nummer 245 EA²

Haacht, Juni 1947

No.	Temperatuur			Scherdenwind		Korrelmeten van het water (mm)					Bewaardige verschijnselen	
	M	m	Max	duur	richting	7u	12u	18u	24u	24u		
1	13.0	14.7	23.1	0	0	5	5	5	3	7	16	1) in aangehouden schijf mette bijhouden
2	13.0	14.4	22.8	0	0	5	5	5	0	1	1	id.
3	13.0	14.3	24.6	0	0	5	5	5	0	2	1	id.
4	14.0	15.8	24.5	0	0	2	5	5	5	7	10	2) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
5	14.0	15.3	24.4	0	0	3	5	5	5	10	10	3) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
6	15.5	16.9	24.8	0	0	5	5	5	5	9	7	4) op waarnemingspost van 2 W. 6.7 m
7	15.5	16.1	24.2	0	0	4	5	5	5	11	5	5) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
8	15.5	16.3	24.4	0	0	5	5	5	5	10	5	6) W. 6.7 m
9	16.1	17.2	24.5	0	0	5	5	5	5	9	5	7) W. 6.7 m - te 1.40 m
10	18.0	18.6	24.8	0	0	5	5	5	5	1	1	8) mette bijhouden
11	21.1	21.6	25.1	0	0	5	5	5	5	3	4	9) draagpale van 1.8 m
12	23.0	23.6	24.4	0	0	5	5	5	5	4	1	10) mette bijhouden
13	21.0	21.7	24.5	0	0	5	5	5	5	1	3	id.
14	21.1	21.9	25.1	0	0	5	5	5	5	16	8	11) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
15	21.0	21.3	24.3	0	0	5	5	5	5	9	10	12) waarnemingspost van 2 W. 6.7 m
16	18.4	19.7	24.4	0	0	5	5	5	5	3	3	13) mette bijhouden
17	21.5	22.7	25.3	0	0	5	5	5	5	0	0	id.
18	24.5	25.7	28.7	0	0	5	5	5	5	0	0	id.
19	30.0	29.5	27.8	0	0	5	5	5	5	10	7	14) in 2.10m
20	24.4	26.8	27.4	0	0	5	5	5	5	14	10	15) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
21	23.1	24.7	29.0	0	0	5	5	5	5	9	9	draagpale van 1.8 m
22	22.0	23.2	26.1	0	0	5	5	5	5	10	9	16) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
23	18.1	19.6	25.3	0	0	5	5	5	5	7	11	17) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
24	23.5	24.8	25.1	0	0	5	5	5	5	2	0	18) mette bijhouden
25	27.0	28.7	28.1	0	0	5	5	5	5	1	1	id.
26	21.0	22.0	26.6	0	0	5	5	5	5	1	0	id.
27	26.0	27.4	26.7	0	0	5	5	5	5	2	1	id.
28	31.7	29.3	28.1	0	0	5	5	5	5	0	0	19) in 2.10m en 3 lange 0. tot 4.45m - te
29	32.4	26.4	28.7	0	0	5	5	5	5	10	5	20) mette bijhouden
30	27.5	23.9	24.0	0	0	5	5	5	5	6	7	id.
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												
41												
42												
43												
44												
45												
46												
47												
48												
49												
50												
51												
52												
53												
54												
55												
56												
57												
58												
59												
60												
61												
62												
63												
64												
65												
66												
67												
68												
69												
70												
71												
72												
73												
74												
75												
76												
77												
78												
79												
80												
81												
82												
83												
84												
85												
86												
87												
88												
89												
90												
91												
92												
93												
94												
95												
96												
97												
98												
99												
100												

Waarnemingen:

1	18.0	18.0	18.0	18.0
2	22.0	22.0	22.0	22.0
3	24.0	24.0	24.0	24.0
4	26.0	26.0	26.0	26.0
5	28.0	28.0	28.0	28.0
6	30.0	30.0	30.0	30.0
7	32.0	32.0	32.0	32.0
8	34.0	34.0	34.0	34.0
9	36.0	36.0	36.0	36.0
10	38.7	38.7	38.7	38.7

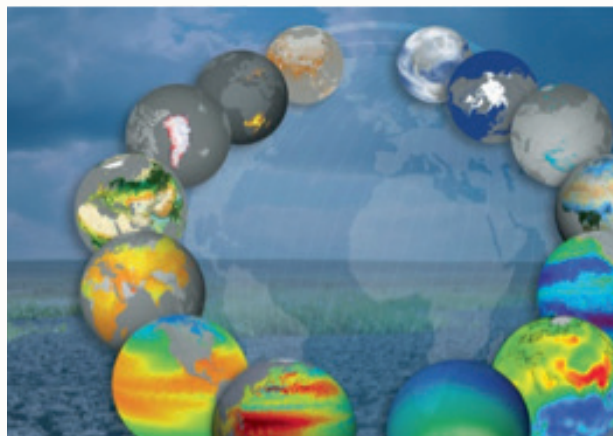
De Waarnemer: H. Cooley

Figure 3 : Exemple du bulletin climatologique de juin 1947 pour la station de Haacht. Pour chaque jour, l'observateur a relevé les températures extrêmes et la quantité de précipitations. Une série d'autres renseignements sont encore signalés (visibilité, nébulosité, phénomènes météorologiques). On remarquera la température maximale de 38,7°C indiquée au 28 juin (la date du relevé), mais qui correspond au maximum de la veille, le 27 juin. Ce jour fut l'un des jours les plus chauds dans le pays depuis la fin du 19^e siècle.

L'évolution de l'atmosphère dans un climat qui change

LE SUIVI MINUTIEUX DE L'OZONE, DES GAZ À EFFET DE SERRE ET DES AÉROSOLS À LONG TERME

Figure 1 : Le climat terrestre subit des variations naturelles depuis la nuit des temps. Distinguer cette variabilité naturelle des changements induits par l'humain est important pour faire face aux défis d'aujourd'hui. Les données de satellites étudiant la Terre ont une importance cruciale dans le suivi des principaux paramètres du changement climatique : les variables climatiques essentielles. ©ESA



Le changement climatique est un des principaux défis auxquels notre génération et celles de nos enfants et petits-enfants sont confrontées pour ce XXI^e siècle. Les observations réalisées depuis la Terre et depuis l'espace ciblant notre atmosphère, les océans et la terre ferme forment une source d'informations unique et capitale pour la compréhension et la réponse au changement climatique.

L'initiative sur le changement climatique de l'ESA

En réponse à la nécessité de disposer de données climatiques fiables et précises, l'Agence spatiale européenne (ESA) a lancé en 2009 son Initiative sur le Changement Climatique (*Climate Change Initiative, CCI*). Au travers de cet ambitieux programme, l'ESA vise à générer des séries temporelles multi-capteurs d'observations satellitaires à long terme stables pour 14 variables climatiques essentielles (ECV), en incluant également des informations relatives à leurs erreurs et incertitudes. Pareils ensembles de données constituent un puissant outil pour suivre la situation du système climatique, mieux comprendre les mécanismes sous-jacents à son évolution ainsi que prédire les conséquences d'un changement du climat par le biais de modèles complexes.

L'Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique (IASB) est activement impliqué dans l'étude de trois de ces variables climatiques essentielles : l'ozone (Ozone_CCI), les gaz à effet de serre (GHG_CCI) et les aérosols (Aerosol_CCI). L'institut produit des ensembles de données permettant d'étudier l'interaction entre les concentrations variables de ces éléments et le bilan radiatif de l'atmosphère, des processus qui sont à la base du changement climatique.

Observations à long terme de l'ozone

L'étude des interactions entre la couche d'ozone et le climat nécessite des observations s'étalant sur au moins plusieurs décennies. Compte tenu de la durée de vie limitée d'une mission satellitaire, il est capital d'harmoniser de manière aussi optimale que possible les observations fournies par différents instruments, pour obtenir ainsi des séries temporelles très longues, utiles à la recherche climatologique.

L'IASB fournit une contribution substantielle à cet effort, tant par son implication dans des réseaux de mesures terrestres internationaux qu'au travers de la coordination du projet Ozone_CCI et sa participation notable au sein de celui-ci. Un des principaux succès engrangés fut la production de données multi-capteurs sur la base d'observations fournies par les instruments GOME, SCIAMACHY, GOME-2 et OMI pour des colonnes d'ozone totales, qui restituent la quantité d'ozone présente au-dessus d'un endroit déterminé sur la Terre. La validation de ces ensembles de données, qui a pris non loin de 20 ans, a confirmé que leur qualité satisfait parfaitement aux exigences posées par l'étude de l'évolution du climat.

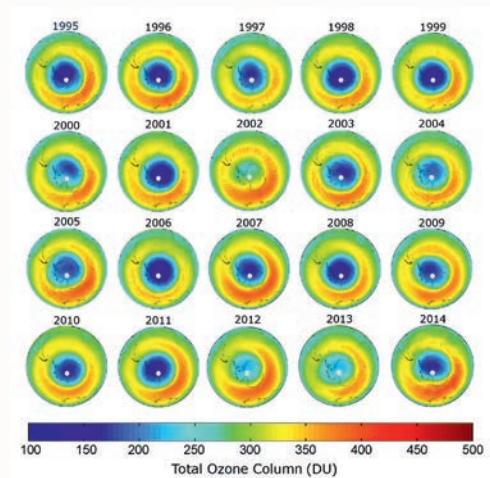


Figure 2 : Évolution de la colonne d'ozone totale au-dessus de l'Antarctique sur les 20 dernières années, déduite des séries temporelles relatives à l'ozone mesurées par les instruments européens GOME, SCIAMACHY, GOME-2 et OMI. Au vu des projections actuelles, lesquelles tiennent compte de l'interaction entre l'ozone et le changement climatique, le trou dans la couche d'ozone ne devrait pas être comblé avant 2050.

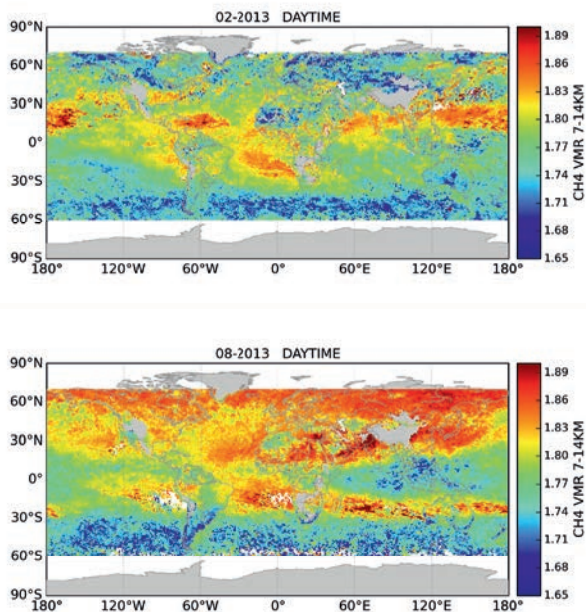


Figure 3 : Les valeurs mensuelles moyennes pour le méthane dans la zone située entre 7 et 14 km pour février 2013 et août 2013 illustrent clairement l'augmentation de la teneur en méthane de l'atmosphère pendant la période de l'été boréal.

Mesures de précision des gaz à effet de serre

Les deux composants chimiques intervenant dans la problématique du climat les plus connus sont le dioxyde de carbone (CO_2) et le méthane (CH_4). Pour fournir des informations variables en vue de la détermination des flux de méthane sur la base de modèles atmosphériques incluant les concentrations observées, les concentrations doivent être mesurées avec grande précision (tolérance inférieure à 2 %). Les satellites ont encore des difficultés à répondre à cet impératif mais l'on s'attache activement à améliorer les données satellitaires.

Dans le cadre du projet GHG_CCI, l'IASB est responsable de la validation des données satellitaires pour le CO_2 et le CH_4 au moyen d'observations bien caractérisées à partir du sol, entre autres au sein du réseau TCCON (Total Carbon Column Observing Network). Depuis 2011, l'IASB entretient et exploite une station d'observation à l'île de La Réunion et en 2016, il installera en partenariat avec BELSPO une nouvelle station à Porto Velho, dans la forêt amazonienne, zone pour laquelle une incertitude persiste quant à la fiabilité des données satellitaires. L'IASB œuvre également à la génération de nouveaux ensembles de données à partir de données satellitaires pour le CH_4 , assorties d'une meilleure sensibilité aux concentrations, au niveau de la surface terrestre (où est produit le méthane) et offrant davantage de détails concernant leur répartition verticale dans la troposphère.

Le rôle des aérosols

Les aérosols des sables du désert (poussière, sable) propulsés dans l'atmosphère par des cisaillements de vent sont essentiellement d'origine naturelle mais ils sont également influencés par des activités humaines associées à la désertification, au déboisement et à l'exploitation du sol. Ils influencent le climat de différentes manières, générant parfois des effets contradictoires qui rendent particulièrement ardue la tâche de conclure de manière définitive quant à leurs incidences sur la température à la surface de la terre. Différents paramètres interviennent ici, la répartition verticale des aérosols figurant parmi les principaux. C'est pour cette raison que l'IASB concentre prioritairement son activité de recherche sur ce point. Des mesures au nadir réalisées par le satellite de l'IASB



Figure 4 : Le 10 mai 2003, le volcan Anatahan, un volcan plutôt discret des Mariannes, entre en éruption. Même si, au niveau global, les retombées de cette éruption sont très réduites, certains scientifiques soupçonnent l'accumulation d'éruptions de ce type dans les régions tropicales d'avoir engendré l'augmentation graduelle des teneurs en aérosols stratosphériques depuis l'an 2000. D'autres attribuent la cause de cette augmentation essentiellement à l'humain (exploitation du charbon, pollution domestique et urbaine). La série temporelle GOMOS devrait permettre de faire la clarté sur ce point. © USGS

en infrarouge ont permis de distiller pour la première fois des informations relatives à deux couches d'aérosols indépendantes à partir de données de colonnes.

La troposphère n'est pas le seul endroit où les aérosols jouent un rôle. Ils peuvent également atteindre la stratosphère via la circulation atmosphérique globale, surtout lors de mégas-éruptions volcaniques. De par leur incidence sur le rayonnement, la physico-chimie et la dynamique de l'atmosphère, ils sont, lors de périodes de ce type, des acteurs déterminants du climat. Les modèles climatologiques actuels recourent essentiellement à des climatologies d'aérosols stratosphériques sur la base d'expérimentations satellitaires historiques. Les scientifiques de l'IASB sont ainsi parvenus à créer des séries temporelles de données d'aérosols stratosphériques à l'aide de mesures par occultation stellaire réalisées par l'instrument GOMOS embarqué dans le satellite Envisat. Cet instrument est utilisé, entre autres, pour l'élaboration d'un inventaire des sources d'aérosols, dans le but d'identifier les influences respectives des volcans et des sources humaines dans l'augmentation graduelle des quantités d'aérosols dans la stratosphère depuis l'an 2000.

Investir dans l'avenir

L'IASB continuera également de s'engager à l'avenir dans la recherche climatologique au sein de programmes non seulement européens mais également belges. Ainsi, ses chercheurs œuvrent actuellement d'arrache-pied à la préparation de la mission ALTIUS, la première mission belge d'observation de la stratosphère par microsatellite. La mission visera entre autres une grande quantité de gaz associés au changement climatique, et comprendra des recherches destinées à déterminer les quantités dans lesquelles ils apparaissent dans les couches les plus élevées de l'atmosphère : ozone, vapeur d'eau, dioxyde d'azote, oxyde de brome, méthane et aérosols.

L'auteure

Karolien Lefever, Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique (IASB), Service Communication

1.2. DYNAMIQUE DU SYSTÈME CLIMAT

Le Soleil et le climat

Le Soleil, première source d'énergie du système Terre, est essentiel à la compréhension des températures de l'atmosphère, des terres émergées et de l'océan.

L'observation systématique du Soleil

Des mesures régulières du Soleil sont faites grâce à l'observation des taches solaires depuis l'antiquité, mais c'est à Galilée (en 1610) qu'on doit d'avoir développé une méthode de mesure fiable utilisant le télescope. Actuellement, le centre mondial de suivi des taches solaires se trouve à l'Observatoire royal de Belgique. Les observations font apparaître un cycle de 11 ans, mais montrent aussi plusieurs anomalies dont le minimum de Maunder (1645-1715) qui coïncide avec un refroidissement de l'Europe, le 'petit âge de glace' entre 1600 et 1850. Le premier scientifique à faire une liaison entre le Soleil et le climat est William Herschell en 2001 qui montra une corrélation entre l'étude du prix du blé et l'activité solaire.

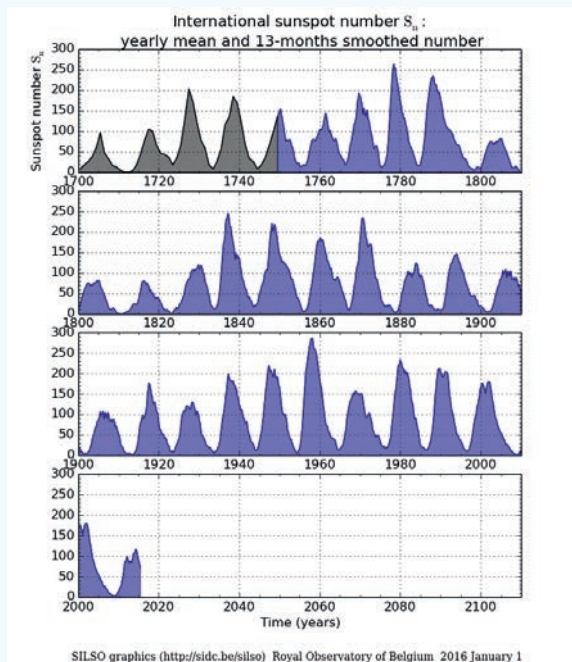


Fig.1 : représentation du cycle solaire depuis 1700 à partir des données conservées à l'Observatoire royal de Belgique. (document ORB).

L'âge spatial et le GIEC

Le mécanisme d'influence du Soleil sur le climat n'a pu être déterminé que par des mesures quantitatives obtenues par des moyens spatiaux. La première mesure effectuée fut celle de la 'constante solaire'. Le belge Marcel Nicolet, fondateur de l'Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique, en fut un des spécialistes. La mesure de l'ul-



Fig. 2: le paquet SOLAR sur le module européen COLUMBUS de la station spatiale internationale, SOLAR est en opération depuis mars 2008. (document ESA)

traviolet solaire à partir de ballons et de satellites constitua un sujet prioritaire pour l'IASB et devint même le sujet de thèse de Dirk Frimout qui sera le premier astronaute belge en 1992. En parallèle, l'Institut royal météorologique développa un instrument destiné à mesurer la constante solaire dans l'espace. La première charge utile de Spacelab sur la navette spatiale COLUMBIA en 1983 comptait 3 instruments de mesure solaire avec une participation des 2 instituts d'Uccle. 30 ans après, ces instruments et d'autres ont permis de conclure que la constante solaire variait ! Ce terme est maintenant remplacé par l'expression 'irradiance solaire totale'.

Les conclusions du GIEC sont-elles définitives ?

La science se remet constamment en question, les résultats de modèles présentés dans le rapport du GIEC n'incluent pas tous les phénomènes, en particulier l'ultraviolet extrême qui fluctue bien plus que l'irradiance totale et déclenche des réactions chimiques dans la haute atmosphère, perturbant tout le système Terre. L'observation spatiale continue, par exemple, depuis février 2008, un ensemble d'instruments européens observe le Soleil depuis la station spatiale internationale, il inclut un instrument de mesure de l'UV lointain SOL-ACES et deux instruments à forte participation belge (SOVIM, IRM) et SOLSPEC (IASB), les observations sont conduites depuis le B.USOC (Belgian User Support and Operation Centre) localisé à l'IASB.

L'auteur

Christian Muller, Institut royal d'Aéronomie spatiale de Belgique (IASB)

Les carottes de glace antarctiques : déchiffrer le passé au service du futur

Les carottages de glace antarctiques pénètrent la calotte sur plus de 3000 mètres et permettent la reconstruction d'un grand nombre de variables climatiques et environnementales sur près d'un million d'années. Ils nous permettent de décoder des rouages essentiels du climat et d'ainsi construire et valider les modèles climatiques globaux, nos seuls 'outils' pour envisager le climat du futur.

Le Programme IPICS (International Partnerships in Ice Core Sciences) coordonne la recherche paléoclimatique internationale sur les carottes glaciaires. Il cristallise les priorités futures de cette recherche selon quatre thèmes préférentiels qui diffèrent par leur échelle de temps : a) le carottage le plus ancien (> 1.5 million d'années), b) la période interglaciaire précédente (130-110 années), c) la dernière période glaciaire (40 années) et, d) les deux derniers millénaires. Le laboratoire de glaciologie de l'ULB a principalement contribué aux recherches qui ont mené aux priorités a) et d).

Le sondage EPICA Dome C est aujourd'hui celui qui remonte le plus loin dans le temps (800.000ans, Fig. 1). Il confirme la relation étroite entre gaz à effet de serre, température de l'air, niveau marin et forçage radiatif (insolation) sur 8 cycles climatiques successifs d'environ 10^5 ans (1a). L'étude détaillée du dernier glaciaire (1b) a montré les variations couplées de la température entre les deux hémisphères, en opposition de phase (froid en HN, chaud en HS) avec un décalage de 500 à 1000 ans, lié au temps de transit des eaux d'un pôle à l'autre dans l'océan Atlantique (bipolar seesaw). Les glaces basales, proches du lit rocheux, montrent cependant des signes clairs de perturbations et de discordance avec les enregistrements des sédiments marins (1c, encadré rouge) : une limitation à notre voyage dans le temps dans la glace ?

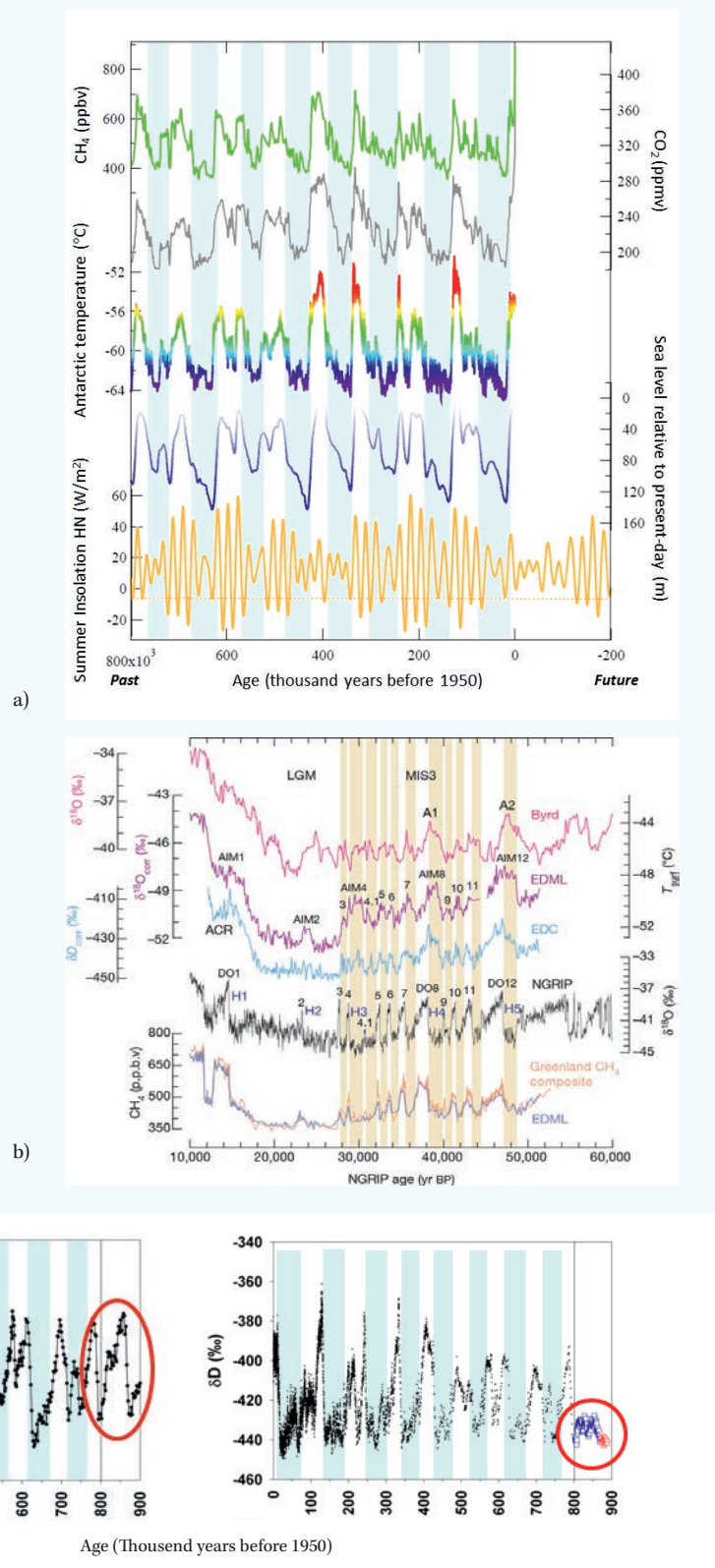


Figure 1 : Données paléoclimatiques du projet EPICA : a) 8 cycles climatiques naturels (époques glaciaires en bleu clair) : températures, gaz à effet de serre, niveau marin (Masson-Delmotte et al., 2010) ; b) synchronisation HN (NGRIP)/HS (EDC, EDML) au cours du dernier glaciaire (EPICA Community, 2006) et c) discordance entre proxys de température dans les sédiments marins (benthic $\delta^{18}\text{O}$, bas) et dans la glace basale (haut et milieu : δD glace) d'EPICA (Tison et al., 2015).

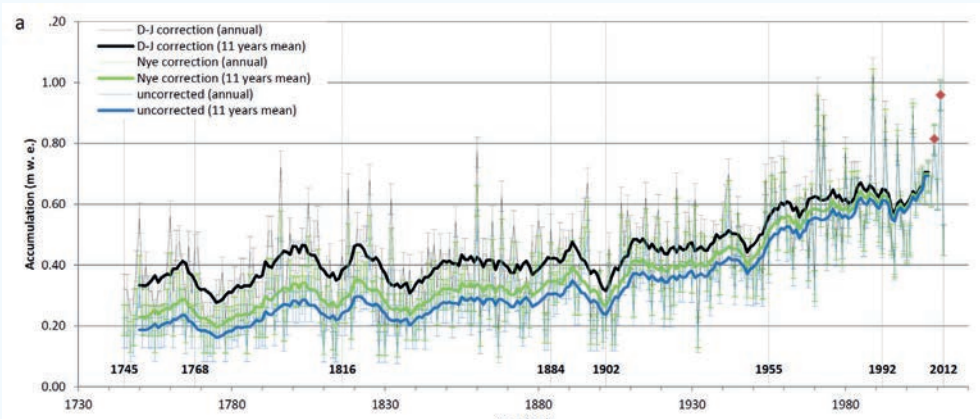
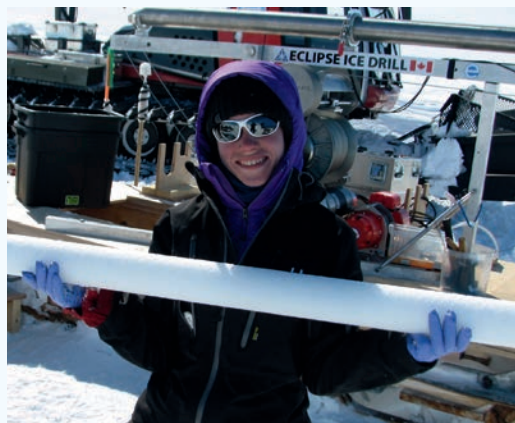


Figure 2 : Sondage de 120 m au Derwael ice Rise (Princess Ragnhild Coast, à proximité de la base Princesse Elisabeth. A gauche : carotte de névé, à droite : reconstitution du taux d'accumulation en mètres équivalents eau (bleu : mesures, vert et noir : deux types de corrections pour la déformation de la glace au-delà du changement de densité). Traits fins=valeurs annuelles, Traits grossiers=lissage 11 ans.

Documenter la transition vers l'Anthropocène (ère du climat influencé par l'Homme) est également une priorité actuelle. Alors que la majeure partie des sondages de surface de l'Antarctique du Nord-Est (façade Atlantique) ne montrent pas de signe clair de l'augmentation de précipitations attendue dans le cadre de la transition vers le réchauffement anthropique, un sondage côtier de 120 mètres de long au Derwael ice Rise (Base princesse Elisabeth) est le premier à montrer cette tendance (Figure 2) de manière irréfutable (Philippe et al., 2016).

Et Demain ? Le prochain challenge sera de découvrir un site Antarctique où l'on pourra échantillonner des glaces de plus d'un million d'années qui soient non-perturbées par la proximité du lit rocheux et ayant résisté à la fonte liée au flux géothermique... une possibilité unique de documenter l'environnement et l'atmosphère d'une période où les cycles climatiques naturels étaient de 40000 ans !

L'auteur

Jean-Louis Tison, Université libre de Bruxelles, Laboratoire de Glaciologie

Plus

- IPICS website: www.scar.org/ssg/physical-sciences/ipics
- Masson-Delmotte, V. et al., 2010. EPICE Dome C record of glacial and interglacial intensities, *Quaternary Science Reviews*, v. 29, p. 113-128.
- www.climat-en-questions.fr
- EPICA Community Members, 2006. One-to-one coupling of glacial climate variability in Greenland and Antarctica
- Tison et al., 2015. Retrieving the paleoclimatic signal from the deeper part of the EPICA Dome C ice core, *The Cryosphere*, 9, 1633–1648.
- Philippe et al. 2016. Ice core evidence for recent increase in snow accumulation in Coastal Dronning Maud land, Antarctica, *The Cryosphere*, submitted.

La fonte de glace et hausse du niveau marin

Le niveau marin a augmenté de +/- 20 cm depuis 1900 et monte aujourd'hui de plus en plus vite. Cette augmentation est principalement due à la dilatation thermique des océans : en se réchauffant, les océans augmentent leur volume. La deuxième plus forte contribution au niveau marin provient de la glace stockée sur les continents – glaciers et calottes glaciaires, y compris Antarctique et Groenland – qui est alors transférée aux océans.

Le Groenland (Figure 1 - bas) perd principalement de la glace par fonte à la surface de la calotte et ruissellement ainsi que, dans une moindre mesure, par décharge des glaciers émissaires aux marges du Groenland. Cependant, l'augmentation des précipitations à l'intérieur des terres atténue partiellement la perte de masse de la calotte.

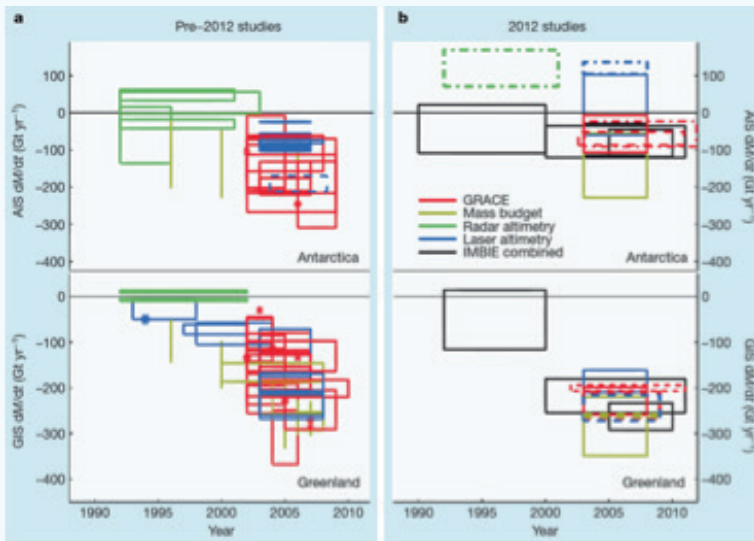
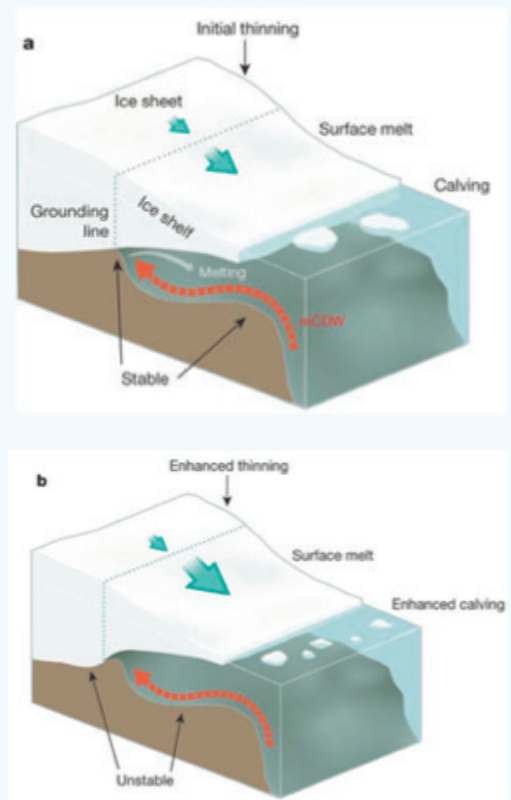


Figure 1 : Bilan de masse des calottes antarctique et groenlandaise estimé à partir de différentes études (Hanna et al., 2013). Une perte 360 Gt de glace augmente le niveau marin global de 1mm.

Figure 2 : (a) Le courant chaud circumpolaire profond modifié (mCDW) fait fondre la calotte à son point de contact avec l'océan (*grounding line*), cela amincit les plateformes de glace flottante (*ice shelf*) et fait reculer le point de contact, accentuant l'amincissement. (b) La calotte se déstabilise lorsque le point de contact avec l'océan recule sur une pente descendant vers l'intérieur des terres. (Hanna et al., 2013).



En Antarctique (Figure 1 -haut), ce sont surtout les glaciers émissaires de l'Antarctique de l'Ouest qui perdent de la masse, ce qui compense l'augmentation générale des précipitations sur la calotte. La perte de glace se manifeste par l'amincissement de la calotte, l'accélération des glaciers émissaires et le retrait de la zone de contact avec l'océan (Figure 2). La calotte contribue au niveau marin dès que la glace commence à flotter. C'est dans ce contexte que les plateformes de glace flottante (*ice shelf*) contrôlent la stabilité de la calotte antarctique. Lorsque les plateformes de glace se désintègrent, les glaciers qui les alimentent accélèrent, menaçant la calotte de s'effondrer. La calotte se déstabilise par fonte à la base lorsque des incursions d'eaux chaudes et salines (mCDW) remontent des profondeurs et rentrent en contact avec la base des plateformes de glace.

Le futur niveau marin dépendra de la réaction de ses différents contributeurs face aux changements climatiques. Les estimations de la montée des eaux dépendent des modèles numériques dont les résultats divergent tant au niveau des échelles temporelles qu'en magnitude ou taux d'augmentation. Le dernier rapport du GIEC prédit que les mers monteront de 30 à 60 cm d'ici 2100. Et, selon le scénario 'business as usual', l'augmentation pourrait même atteindre 100 cm d'ici 2100 alors que les études récentes la limitent à 140 cm. Quoi qu'il en soit, même si nous nous en tenons aux engagements de Paris et que nous limitons le réchauffement à 2°C, le niveau marin continuera de monter.

Des études récentes de l'ULB – financée par BELSPO dans le cadre de recherche antarctique à la station Princesse Elisabeth – mettent en avant les mécanismes qui stabilisent les plateformes de glace et qui améliorent les modèles numériques prédisant les pertes de glace.

Les auteurs

Frank Pattyn et Sophie Berger, Université libre de Bruxelles, Laboratoire de Glaciologie

Références

- Berger, S., L. Favier, R. Drews, J.J. Derwael, F. Pattyn (2016) Uncharted pinning points and their control on the flow of Antarctic ice shelves. *J. Glaciol.*, in press
- Durand, G. and F. Pattyn (2015) Reducing uncertainties in projections of Antarctic ice mass loss. *The Cryosphere* 9, 2043-2055
- Favier, L. and F. Pattyn (2015) Antarctic ice-rise formation, evolution and stability. *Geophysical Research Letters* 42, doi:10.1002/2015GL064195.
- Hanna, E., F. Navarro, F. Pattyn, C. M. Domingues, X. Fettweis, E. R. Ivins, R. J. Nicholls, C. Ritz, B. Smith, S. Tulaczyk, P. L. Whitehouse, H. J. Zwally (2013) Ice sheet mass balance and climate change. *Nature*. 498 (7452), 51-59.
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC 5th Assessment Report.* Cambridge University Press.

Modéliser la dynamique du climat

Les modèles climatiques sont des outils indispensables pour améliorer notre compréhension du système climatique et pour réaliser des prévisions. Leur développement est un travail de longue haleine qui nécessite des expertises variées et de nombreux tests sont nécessaires pour mesurer leur validité.

Qu'est-ce qu'un modèle climatique ?

Le terme 'modèle' peut avoir un grand nombre de significations en fonction du contexte ou du domaine considéré. En climatologie, il correspond de manière standard à une représentation du système réel qui permet de mieux comprendre sa dynamique et de faire des prévisions des changements futurs. Une première étape du développement d'un modèle consiste à établir les équations qui gouvernent les différentes composantes du système climatique et donc, par exemple, de calculer la position des courants océaniques, la vitesse du vent, l'évolution de la température ou la couverture nuageuse. Ces équations mathématiques déduites des lois fondamentales de la mécanique, de la thermodynamique, de la chimie ou de la biologie constituent ce qu'on appelle un modèle mathématique du climat.

Cependant, vu la complexité de la dynamique du climat, les équations de ce modèle mathématique ne peuvent pas être résolues sur une feuille de papier. Pour ce faire, il faut développer un modèle numérique qui fournira une solution approchée de ces équations en utilisant la puissance de calcul de super-ordinateurs. Cette solution numérique n'est pas disponible en chaque point de la Terre mais en moyenne sur des boîtes dont la taille est actuellement de l'ordre de 100 km sur 100 km pour les modèles globaux. Une couverture plus fine, ce qu'on appelle une résolution plus élevée,

nécessite de faire des calculs sur un plus grand nombre de boîtes, ce qui n'est pas possible actuellement même sur les ordinateurs les plus puissants.

La validation du modèle

Des incertitudes sont présentes à chaque étape du développement d'un modèle climatique. Les grandeurs physiques incluses dans les équations sont mesurées avec une précision qui n'est pas toujours suffisante. Certains processus sont encore mal connus et ne peuvent donc être pris en compte que de manière approximative. La résolution numérique des équations introduit aussi des approximations. Il est donc nécessaire de tester au mieux la validité des modèles avant leur utilisation, par exemple pour faire des prévisions. Tout d'abord, un modèle doit reproduire de manière adéquate le climat actuel, en simulant bien la répartition spatiale des températures à la surface de la terre, le cycle saisonnier des précipitations en fonction de la latitude considérée, etc.

Une bonne représentation du climat moyen de la Terre est nécessaire mais ce n'est évidemment qu'une première étape. Le modèle doit aussi être capable de simuler les changements climatiques passés, en particulier le réchauffement observé au cours des 150 dernières années. Cependant, la période récente, correspondant aux observations directes basées sur des instruments comme les thermomètres ou les différents senseurs installés sur les satellites, ne couvre qu'une petite partie de la gamme des variations que la Terre a connues au cours de son existence. Les modèles doivent aussi être capables de simuler ces changements pour vérifier qu'ils ne sont pas valables uniquement pour les conditions présentes (Figure 1).

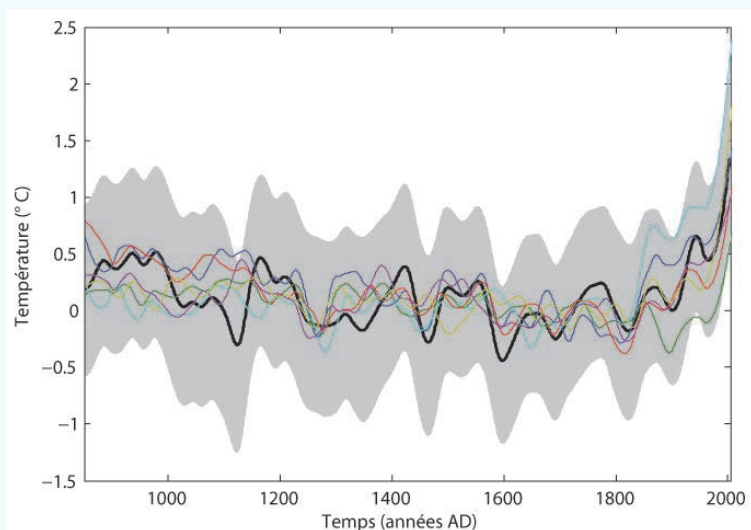
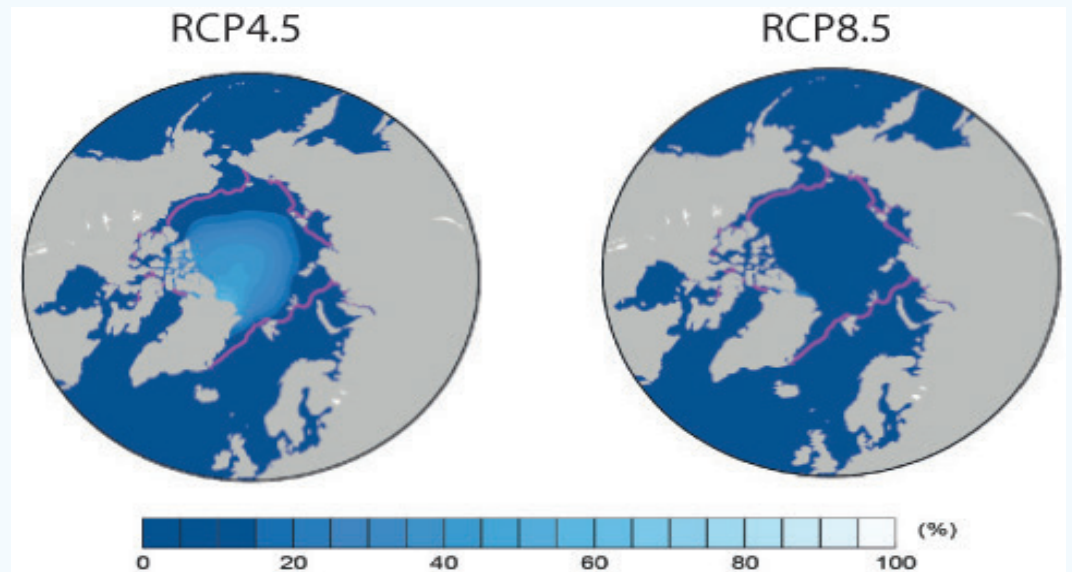


Figure 1. Séries temporelles des températures de surface reconstruites pour le dernier millénaire grâce à différentes observations indirectes du climat (PAGES 2k consortium, 2013, ligne noire) et simulées par six modèles climatiques différents (lignes de couleur). Les températures montrées sont les différences par rapport à une période de référence correspondant aux années 1500-1800 AD. L'incertitude de la reconstruction est montrée en gris. Toutes les séries temporelles ont été lissées en utilisant la méthode de Loess avec une fenêtre de 100 ans.

Figure 2. Concentration de glace de mer en septembre (zéro correspond à l'océan ouvert, 100% à une couverture de glace complète) simulée pour les années 2081-2100 en moyenne pour les résultats de plus de 35 modèles climatiques. A gauche, le scénario RCP4.5 correspond à une augmentation modérée de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère. La plupart des modèles considèrent que même si son étendue diminuera fortement, de la glace mer sera toujours présente en été au Nord du Groenland pour ce scénario. Par contre, dans le scénario RCP8.5 (à droite) où la concentration en CO₂ dans l'atmosphère augmente plus rapidement, pratiquement tous les modèles sont d'accord pour prévoir la disparition de la glace de mer en été avant la fin du siècle. La ligne rouge sur les figures correspond à la limite de l'étendue de la glace de mer observée en moyenne pour la période 1986-2005. Figure de Collins et al. (2013)



Le nombre de tests possibles est pratiquement infini. Les résultats de ceux-ci stimulent de nouveaux développements. Un modèle ne peut donc jamais être considéré comme parfaitement validé, le processus de développement et de validation devant être vu comme continu. A chaque étape, une version du modèle est utilisée, en connaissant grâce aux tests réalisés ses forces et ses limitations, et en sachant que la version suivante sera normalement plus performante.

Prévisions pour les prochaines décennies

Lorsque les performances des modèles ont été mesurées dans différentes circonstances et qu'elles sont satisfaisantes, ces modèles peuvent être utilisés dans différentes applications, en particulier afin de réaliser des prévisions pour différentes variables (Figure 2). En climatologie, on préfère en général le terme projection lorsqu'on parle du climat de la fin du 21^{ème} siècle car le climat va dépendre fortement de la quantité de gaz à effet de serre (en premier le CO₂) émise dans les années à venir, quantité qui est particulièrement incertaine. Les climatologues fournissent alors des estimations des changements futurs en fonction de différents scénarios pour ces émissions de gaz à effet de serre, mais aussi d'autres polluants, du taux de déboisement, etc.

Aucun de ces scénarios ne veut être une représentation parfaite des conditions futures mais fournit une estimation des changements en fonction des choix qui peuvent être faits. L'incertitude liée aux scénarios est donc un élément essentiel pour les projections climatiques. C'est même la plus grande incertitude pour de nombreuses variables, montrant l'impact considérable qu'auront les décisions qui seront prises dans les années à venir pour modérer les

émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Cependant, la variabilité naturelle du climat, qui est impossible à prédire à l'échelle du siècle et les approximations présentes dans les modèles sont aussi des sources importantes d'incertitude qu'il est nécessaire de prendre en compte lorsqu'on présente les résultats de projections climatiques. Cela s'est fait en comparant les résultats de simulations réalisées avec plusieurs modèles climatiques développés par des équipes de différents pays. Les caractéristiques communes des résultats de ces simulations peuvent en général être considérées comme fiables et robustes alors que celles qui sont clairement différentes entre les simulations doivent être prises avec beaucoup plus de précautions.

Les auteurs

Hugues Goosse et François Klein, Université catholique de Louvain, Earth and Life Institute, Centre de recherches sur la terre et le climat Georges Lemaitre

Références

Collins M. et al. (2013) Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F. et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

PAGES 2k Consortium : M. Ahmed et al. (2013) Continental-scale temperature variability during the last two millennia. Nature Geoscience 6, 339-346 DOI: 10.1038/NNGEO1797.

Cycles biogéochimiques dans les océans

Le cycle marin du carbone

Les océans, couvrant environ 70% de la surface de la Terre, jouent un rôle fondamental dans l'échange de dioxyde de carbone avec l'atmosphère et constituent un grand réservoir pour ce gaz à effet de serre. À ce jour, les océans ont absorbé approximativement 30% du CO_2 total émis par les activités humaines depuis l'ère industrielle (GIEC, 2013). L'Atlantique Nord représente un puits important de CO_2 anthropique (Figure 1). Ce processus naturel d'absorption a considérablement diminué le niveau de CO_2 atmosphérique et a réduit certains effets du réchauffement climatique. Le CO_2 dissous dans l'eau peut être utilisé pour la photosynthèse, contribuant à la 'pompe biologique'. Les océans jouent donc un rôle essentiel dans l'atténuation du changement climatique et dans le remodelage des principaux cycles biogéochimiques globaux de carbone et d'autres éléments importants tels que les nutriments (azote, phosphore, soufre, fer, ...) qui ont à leur tour des rétroactions sur le système climatique.

L'océan est en train de s'acidifier rapidement

L'absorption du CO_2 anthropique à travers la 'pompe physique' conduit à l'acidification des océans (AO), actuelle-

ment connu comme 'l'autre problème du CO_2 '. L'AO a des effets néfastes sur divers groupes importants d'organismes marins qui produisent des squelettes ou des coquilles calcaires comme les coraux et les mollusques (Orr et al., 2005). De nombreuses études ont porté sur l'effet de l'AO sur les coccolithophores, des algues microscopiques calcifiantes formant souvent des efflorescences massives dans les océans tempérés et sub-polaires (Figure 2). Le carbonate de calcium biogène agit en outre comme 'ballast' et augmente l'efficacité du transfert du carbone organique particulaire de la surface de l'océan vers les eaux profondes, intensifiant ainsi l'efficacité de la pompe biologique à carbone.

Désoxygénation des océans dans un monde en réchauffement

Le réchauffement de l'océan et la stratification accrue causés par le changement climatique, affectent la circulation et la ventilation océaniques et pourraient entraîner des niveaux réduits d'oxygène dans l'océan intérieur (désoxygénation des océans). La superficie et le volume de la zone présentant des minima d'oxygène sont en pleine expansion, ce qui a un impact sur la productivité de l'océan, et les

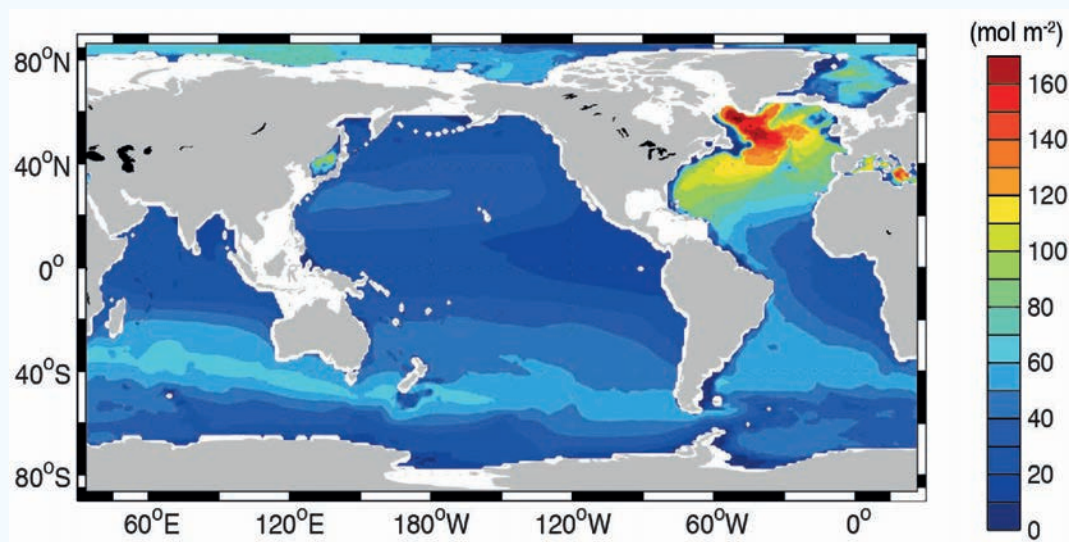


Figure 1. Inventaire du CO_2 anthropique intégré sur la colonne d'eau dans les océans (en unité de nombre de moles de CO_2 par mètre carré), excluant les mers marginales (d'après GEIC, 2013).

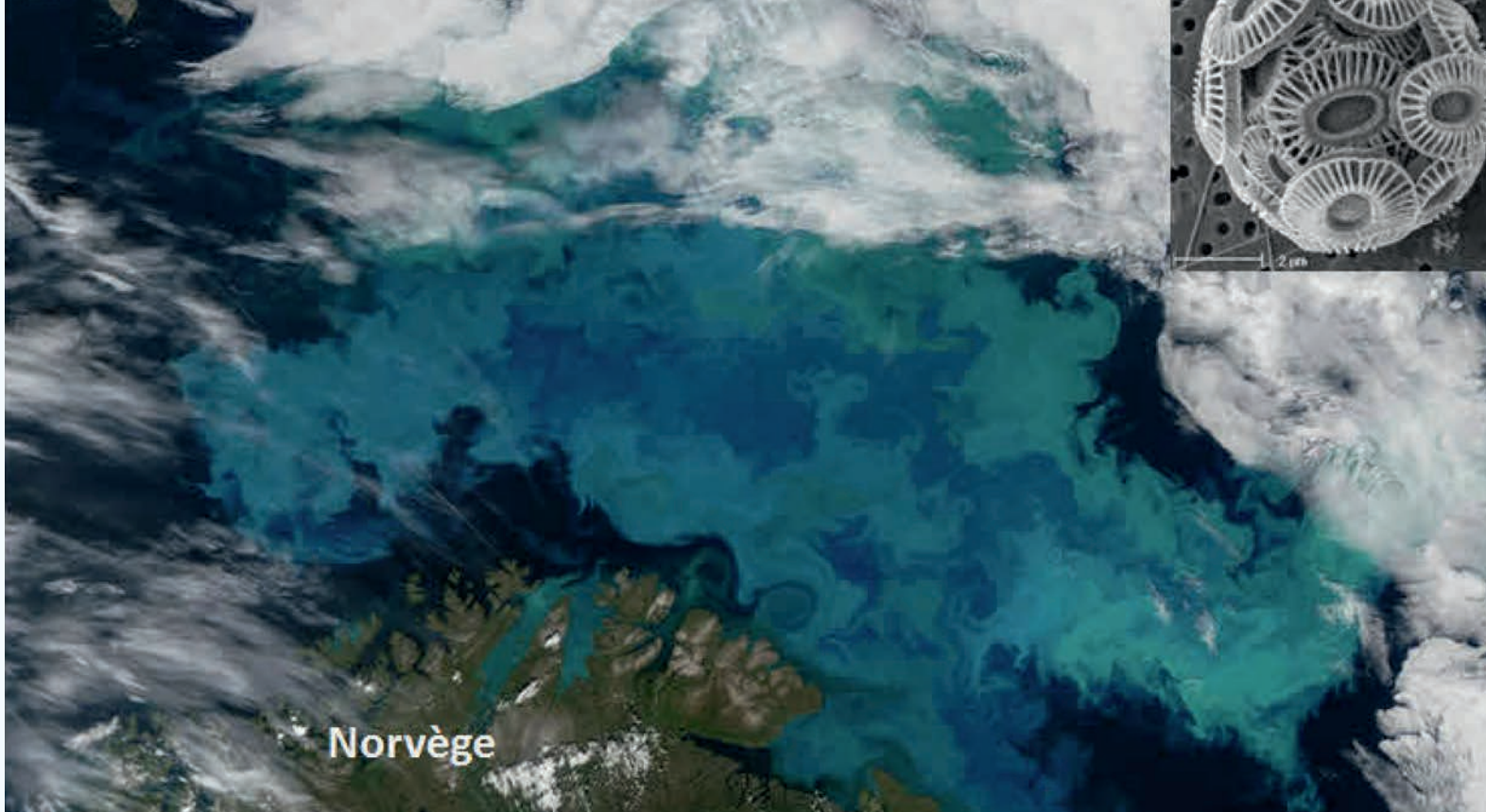


Figure 2. Image satellitaire des efflorescences des coccolithophores dans le nord de la Norvège comme indiquées par la couleur turquoise. Source : NASA Earth Observatory.

cycles biogéochimiques du carbone et des nutriments, avec des conséquences sur la pêche et les écosystèmes (Keeling et al., 2010).

Multiples facteurs de stress des écosystèmes marins

En raison de l'augmentation du CO_2 atmosphérique dans les prochaines décennies ou même les siècles, les écosystèmes marins seront de plus en plus stressés par au moins trois facteurs indépendants (Figure 3). L'augmentation de la température de l'eau de mer, l'acidification et la désoxygénation des océans vont provoquer des changements dans l'environnement physique, biologique et chimique, qui vont ensuite affecter les cycles biogéochimiques océaniques. (Gruber, 2011; Bopp et al., 2013).

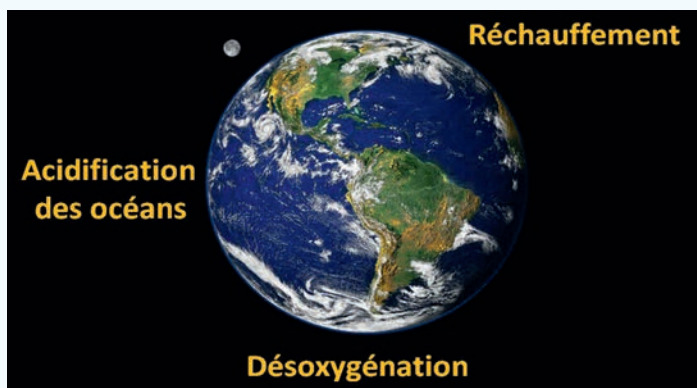


Figure 3. Multiples facteurs de stress des écosystèmes marins dans un climat en évolution.

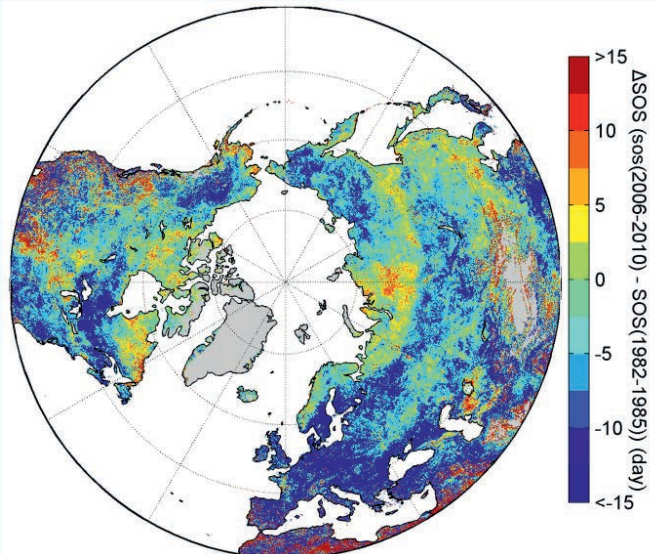
L'auteur

Lei Chou, Université libre de Bruxelles, Laboratoire de Biogéochimie et Modélisation du Système Terre (BGéSys) - Océanographie Chimique et Géochimie des Eaux

Références

- Bopp L. et al. (2013) Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. *Biogeosciences*, 10, 6225–6245. doi:10.5194/bg-10-6225-2013.
- GIEC (2013) Changements climatiques 2013: *Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [sous la direction de Stocker, T.F., et al.]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Gruber N. (2011) Warming up, turning sour, losing breath: ocean biogeochemistry under global change. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 369, 1980–1996. doi:10.1098/rsta.2011.0003.
- Keeling R.F. et al. (2010) Ocean deoxygenation in a warming world. *Annu. Rev. Mar. Sci.*, 2, 199–229.
- Orr J. C. et al. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681–686.

Absorption du CO₂ par les écosystèmes terrestres : combien de temps encore ?



La connaissance du cycle du carbone des écosystèmes terrestres est essentielle. Ceux-ci nous approvisionnent en nourriture, pâture et bois, et les bois et prairies peu perturbés absorbent également du carbone à dose massive, environ 30 % des émissions de carbone dues aux carburants fossiles et au déboisement (Le Quéré et al., 2015; Regnier et al., 2013). Les écosystèmes terrestres font ainsi obstacle à l'augmentation de la concentration atmosphérique en CO₂ (donc au réchauffement climatique) et nous rendent un important service. Dès lors, la question est de savoir combien de temps cela durera-t-il encore ?

L'absorption de CO₂ par les écosystèmes n'a cessé d'augmenter au cours des décennies précédentes, et cela pour plusieurs raisons. Premièrement, la période végétative débute toujours plus tôt – une réaction aux températures hivernales plus chaudes – et se termine dans la plupart des zones plus tard puisque les températures automnales plus chaudes permettent cette croissance végétative beaucoup plus longtemps. Ainsi, davantage de CO₂ est absorbé et fixé dans la matière organique. L'absorption terrestre de carbone croît également en raison des concentrations en CO₂ atmosphériques toujours plus importantes, qui stimulent directement la photosynthèse. La séquestration du carbone dans les écosystèmes terrestres est renforcée par la retombée atmosphérique d'azote. Ce dépôt d'azote élevé, comme c'est le cas en Belgique, est dommageable car elle conduit à la domination d'espèces compétitives, réduisant ainsi la biodiversité. Par ailleurs ce dépôt d'azote favorise la séquestration du carbone dans les écosystèmes terrestres puisqu'elle accélère la production de biomasse et ralentit la décomposition de litière végétale (Vicca et al., 2012; Janssens et al., 2010).

Bien que le puits de carbone terrestre continue à augmenter, de nombreux scientifiques se demandent combien de temps cette fonction de l'écosystème perdurera. Si la poursuite du réchauffement climatique devait davantage stimuler la décomposition de l'humus que la production de biomasse, le puits de carbone diminuerait. Les écosystèmes possédant de très grandes réserves de carbone dans le sol pourraient même se changer brusquement en sources de carbone, renforçant la croissance des concentrations de CO₂ atmosphérique plutôt que de la freiner. À mesure que le réchauffement climatique augmente, les extrêmes climatiques deviennent également plus fréquents et intenses. Les observations ont déjà démontré que ces extrêmes, tels une sécheresse exceptionnelle, peut à ce point libérer du CO₂ qu'elle anéantit en peu de temps, toutes les années d'absorption de CO₂, d'autant plus si la sécheresse s'accompagne d'incendies. C'est parce que le puits de carbone terrestre joue un rôle tellement considérable dans le réchauffement climatique que de nombreuses recherches se concentrent sur l'avenir du puits de carbone dans les écosystèmes terrestres.

Afin d'étudier l'évolution de l'absorption de carbone par les écosystèmes et de collecter des données en vue de tester les modèles globaux de cycle du carbone, les flux de carbone entre l'atmosphère et les écosystèmes terrestres sont mesurés en continu. L'Europe ainsi que la Belgique ont financé ces dernières décennies plusieurs projets liés au carbone qui ont débouché sur ICOS (Integrated Carbon Observation System - www.icos-ri.eu), une infrastructure de recherche (ESFRI – European Strategy Forum for Research Infrastructures) incluant des tours de mesure dans plusieurs pays européens. Celles-ci mesurent de façon standardisée les bilans de gaz à effet de serre de régions et d'écosystèmes européens, et continueront à le faire ces 20 prochaines années. Parce qu'ICOS ne mesure pas seulement les concentrations de gaz à effet de serre et les flux, mais aussi de nombreux déterminants importants du cycle du carbone, ce réseau améliorera considérablement notre compréhension du bilan carbone et gaz à effet de serre des écosystèmes et régions européens.

Évolution de la période végétative dans l'hémisphère nord entre 1982-1985 et 2006-2010 sur la base de mesures IVDN.



L'auteur
Ivan A. Janssens, Universiteit Antwerpen, Center of Excellence 'Global Change Ecology'

Puits ou source de carbone ?

Composite fausses couleurs du bassin du Congo réalisé sur base d'images journalières SPOT VEGETATION.

Pour soutenir les programmes de réduction des gaz à effet de serre, il est essentiel de 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. Mais les interventions de l'homme inversent la tendance. La dégradation des forêts est même le mécanisme majeur de basculement de puits en sources de carbone. Les feux volontaires, l'exploitation non durable et la conversion des forêts (en pâturages, terres agricoles...) 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 que déterminantes, étaient auparavant peu prises en compte dans les modélisations du cycle du carbone. Il en est de même de la variabilité saisonnière et interannuelle des flux de carbone en régions tropicales.

Traditionnellement les modèles sont alimentés par des informations provenant de cartes, de relevés de terrain, de données climatiques ou de données satellitaires statiques et de faible résolution. Pour améliorer la prévision du cycle du carbone dans les régions tropicales, le projet

STEREO II VEGECLIM a relevé le défi de créer le pont entre les experts en modélisation de la surface terrestre et les experts en observation de la Terre par satellite. Les chercheurs ont intégré de façon dynamique dans le modèle ORCHIDEE les caractéristiques de la surface continentale obtenues à partir de 10 ans de séries temporelles SPOT VEGETATION (type de végétation, évolution saisonnière et annuelle, zones sèches, coupées, brûlées, etc.). Ils ont ainsi pu améliorer l'estimation des stocks et des flux réels de carbone dans les bassins de l'Amazone et du Congo.

Le modèle a été testé avec les résultats de simulation de déforestation en République démocratique du Congo (RDC). 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 déforestation, principalement au profit de l'exploitation industrielle. Des projections de l'évolution des stocks et des flux de carbone peuvent ainsi être établies jusqu'en 2035 selon différents scénarios climatiques et de déforestation, permettant de déterminer si le bilan en carbone de la RDC restera négatif ou deviendra positif d'ici la fin du siècle, faisant basculer la RDC de puits en source de carbone. Les résultats obtenus sont utiles pour définir les politiques à adopter dans le cadre des mécanismes REDD+ ou d'autres stratégies d'atténuation des facteurs du changement climatique.

Les auteurs

Equipe Stereo - BELSPO (Direction Applications aérospatiales)

Plus

Projet VEGECLIM (UCL - UGent - LSCE)

Promoteur: Pierre Defourny

<http://eoedu.belspo.be/stereo> > Forêts

Photo à gauche : VEGECLIM a également produit une carte globale des forêts du monde utilisée comme pivot d'une exposition grand public destinée à attirer l'attention sur l'importance mais aussi la vulnérabilité des forêts.



Impact du changement climatique en Belgique

Introduction

Le réchauffement de la planète dû à l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère est sans équivoque selon le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, www.ipcc.ch). En effet, le changement climatique se fait sentir principalement par l'occurrence de situations météorologiques extrêmes (tempêtes violentes, inondations, vagues de chaleur, sécheresses). L'impact de ces changements va dépendre du type d'environnement dans lequel les gens vivent. Les gens vivant près des zones côtières et des rivières vont être confrontés davantage aux inondations alors que les vagues de chaleur auront un impact plus important dans les environnements urbains. L'estimation de l'impact local est donc un défi à facettes multiples. Cependant, en raison de la nature transdisciplinaire des sciences du climat, l'expertise belge au niveau de la modélisation climatique à haute résolution ainsi que des techniques 'd'augmentation de la résolution' dynamique est actuellement répartie entre différentes universités et institutions de recherche, tels que les établissements scientifiques fédéraux.

Un nouveau projet financé par BELSPO intitulé CORDEX.be a commencé au début de l'année 2015. Le but est l'établissement d'un réseau de recherche belge pour fournir des informations climatiques cohérentes et détaillées au niveau de la Belgique. Ce réseau regroupe 9 partenaires actifs dans le développement de modèles scientifiques et la mise en œuvre de simulations numériques pour l'étude de l'évolution du climat et de son impact. Le but final de CORDEX.be est de créer une base scientifique pour l'établissement de services climatiques en Belgique.

Résultats attendus

Le but final du projet CORDEX.be est de créer un lien entre la société belge et la recherche sur le climat via l'étude de l'impact des changements climatiques sur la vie de tous

les jours des citoyens. Les résultats du projet pourront être utilisés aussi pour des études concernant les stratégies d'adaptation et de réduction nécessaires à la protection de la population et de l'infrastructure face aux défis futurs de la société liés aux changements du climat, mais en même temps pour la création de nouvelles opportunités économiques.

En zones urbaines, l'impact des changements climatiques est notamment lié aux vagues de chaleur et aux pics de pollution. Les vagues de chaleur, comme celles de 2003, peuvent engendrer une surmortalité par rapport aux conditions normales alors que les épisodes de chaleur excessive ont un impact sur l'activité économique (l'agriculture et le tourisme). Par contre, en zones côtières, les inondations futures liées à l'augmentation du niveau de la mer combinées à l'occurrence future des tempêtes peuvent avoir un effet dévastateur sur la qualité de vie de la population côtière et un coût pour le maintien des infrastructures. Un autre phénomène météorologique rare mais ayant un grand impact sur la population est celui des rafales descendantes. Ce phénomène est fréquemment associé à de fortes grêles et est donc très important pour les compagnies d'assurances. Les rafales descendantes lors du festival Pukkelpop en août 2011 ont causé la mort de 5 personnes. Les changements climatiques perturbent aussi les écosystèmes par exemple avec l'arrivée de nouvelles espèces envahissantes.

Plusieurs aspects des changements climatiques seront étudiés dans le cadre du projet CORDEX.be. En effet, les modèles régionaux du climat vont notamment permettre d'étudier les précipitations extrêmes alors que les modèles d'impact local vont être utilisés pour l'étude des effets urbains, des marées-tempêtes et des marées, des émissions biogéochimiques et du rendements des cultures. Ces projections climatiques à haute résolution peuvent être traduites en termes de cartes de vulnérabilité et de sensibilité

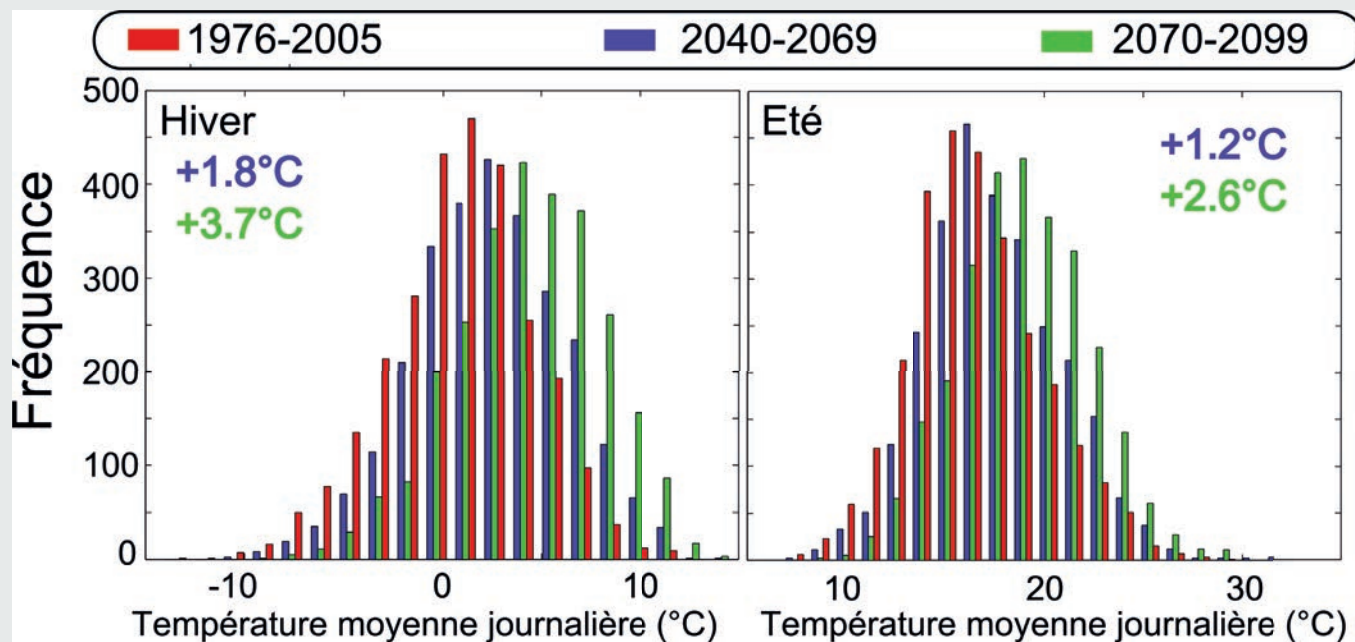


Fig. 1. Distribution de la température moyenne journalière à Uccle en hiver et en été pour la période historique 1976-2005 et selon le scénario futur RCP8.5 (pour Representative Concentration Pathway ; le 8.5 correspond au forçage radiatif pour l'année 2100) pour les périodes 2040-2069 et 2070-2099. Les valeurs chiffrées indiquent le changement moyen correspondant.

aux changements climatiques au niveau de la Belgique. Elles seront d'une grande utilité pour les décideurs politiques comme outils d'aide à la décision.

Le réseau belge

L'établissement d'un réseau belge coordonné est bénéfique mais surtout indispensable dans ce genre d'études et ceci pour différentes raisons. La première, la plus technique, est que les modèles à haute résolution spatiale, puisqu'ils tournent sur un domaine géographique limité, ont besoin de données d'entrée comme conditions aux bords de leurs domaines afin de produire des résultats réalistes. Ces données d'entrée sont simulées par des modèles à basse résolution spatiale. Par conséquent, une stratégie commune et cohérente entre tous les modèles impliqués est indispensable pour comparer les résultats obtenus avec différents modèles. La seconde raison est que les projections climatiques sont caractérisées par des incertitudes. En effet, différents modèles climatiques peuvent produire différentes projections. Les incertitudes sont calculées sur base des différentes simulations avec différents modèles climatiques combinées avec une expertise sur des méthodes statistiques sophistiquées de calibration et de réduction d'échelle. Finalement, l'établissement d'un réseau belge va stimuler la collaboration en Belgique et permettre l'exploitation des observations GNSS (Global Navigation

Satellite System) pour la vérification des simulations climatiques. Les instituts impliqués sont : l'Institut royal météorologique (IRM), la Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven), l'Université Catholique de Louvain (UCL), l'Université de Liège (ULg), la Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), l'Institut d'Aéronomie spatiale de Belgique (IASB), l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB) et l'Observatoire royale de Belgique (ORB).

Les auteurs

Le consortium Cordex.be: Piet Termonia (IRM), Rafiq Hamdi (IRM), Bert Van Schaeybroeck (IRM), Patrick Willems (KUL), Nicole Van Lipzig (KUL), Jean-Pascal van Ypersele (UCL), Philippe Marbaix (UCL), Xavier Fettweis (ULg), Koen De Ridder (VITO), Anne Gobin (VITO), Tris-sevgeni Stavrakou (IASB), Patrick Luyten (IRSNB), Eric Pottiaux (ORB).

www.euro-cordex.net

Le changement climatique et la mer du Nord

© IRSNB-Direction opérationnelle Milieux naturels

La mer du Nord abrite une abondante richesse de vie. Une grande diversité d'animaux et de végétaux vivent sur le fond de la mer et dans l'eau. D'autre part, la mer du Nord est également caractérisée par un trafic de navigation maritime intense, une pêche intensive, du tourisme, un grand nombre d'activités off-shore comme l'extraction pétrolière et gazière, la présence de câbles et de canalisations, l'extraction de sable et de gravier et la présence de parcs éoliens. Cette exploitation intensive met l'écosystème fortement sous pression. Elle a également pour conséquence une vulnérabilité très élevée de la communauté écologique, sociale et économique dans et autour de la mer du Nord face aux effets de perturbations additionnelles, comme les changements climatiques.

Le changement climatique occasionne un grand nombre d'effets directs sur la mer du Nord. Ces effets comprennent e.a. la hausse du niveau de la mer, l'augmentation possible de la fréquence de fortes tempêtes, une hausse de la variation des précipitations, le changement de schémas d'érosion et de sédimentation, des modifications de température et des variations de la salinité. De grandes incertitudes demeurent cependant concernant les effets directs du changement climatique.

Une analyse statistique des niveaux de l'eau à la côte belge montre pour la période allant de 1927 à 2006 une élévation du niveau de la mer à Ostende d'1,7 mm par an, hausse qui est toutefois sujette à des fluctuations pluriannuelles. La température de l'eau de la mer a augmenté dans la partie méridionale de la mer du Nord d'environ 0,034 °C par an. Une analyse de la vitesse du vent et de la hauteur de houle significative n'a pas pu, à ce jour et pour la côte belge, montrer de tendance climatique claire.

Sur la base de ces effets directs, des effets indirects du

changement climatique sur l'écosystème et les activités socioéconomiques de la mer du Nord (pêche, transport et port, risque d'inondation, énergie éolienne, tourisme) sont également attendus.

Puisque la plaine de la côte belge s'étend seulement de 2 à 4 m au-dessus du niveau de la mer, notre pays est l'un des pays d'Europe les plus vulnérables en termes d'inondations résultant d'une hausse du niveau de la mer. L'*Agentschap voor Maritieme Dienstverlening en Kust* (Communauté flamande) a élaboré un *Geïntegreerd Kustveiligheidsplan* (plan de sécurité intégré pour la côte) afin de garantir notre sécurité.

La hausse de température de l'eau de la mer a par exemple également une influence sur les populations de poissons vivant en mer du Nord. Ainsi, de plus en plus d'espèces de poissons d'eau chaude migrent en provenance du Sud (notamment des sardines et anchois) vers la mer du Nord tandis que d'importantes espèces commerciales, comme le cabillaud, la plie, la morue, ... partent vers le nord à la recherche d'une eau plus froide.

Dans le cadre du projet CORDEX.be¹, financé par BELSPO dans le cadre de BRAIN-be, les conséquences des changements climatiques sur les eaux de la côte belge sont étudiées par l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique. Le projet réunit neuf instituts belges qui étudient les changements climatiques et leurs conséquences.

L'auteur

Dries Van den Eynde, Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB)

Références

¹ www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/CORDEX_fr.pdf

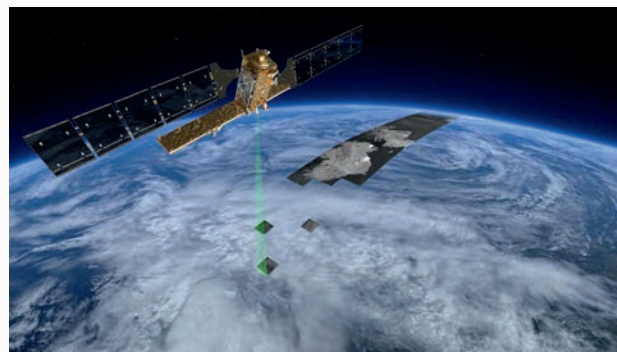
Alerte aux inondations

90 % des catastrophes recensées ces 20 dernières années sont dues à des événements hydrométéorologiques extrêmes : inondations, tempêtes, vagues de chaleur, glissements de terrain... Selon le GIEC, la progression de ces phénomènes s'aggraverait encore en cas d'augmentation de la température moyenne globale. Les inondations représentent à elles seules 47 % de ces catastrophes ; en 20 ans, elles ont fait plus de 150 000 morts et affecté 2,3 milliards de personnes. L'ampleur des dégâts causés est directement liée à l'évolution démographique et au nombre croissant de personnes vivant dans des zones à risque, mais aussi à des choix de pratiques agricoles souvent défavorables à une bonne régulation des eaux.

Les images satellitaires sont irremplaçables pour le suivi des catastrophes. Leur précision, leur récurrence et l'étendue des zones couvertes en font des outils décisifs d'aide à la gestion de crise. Elles permettent de modéliser le risque, de disposer rapidement d'une information pour gérer la crise, d'évaluer les dégâts et de soutenir la reconstruction. Différents projets du programme STEREO cherchent à améliorer, grâce à la télédétection, chacune des étapes de la gestion des catastrophes.

Prévoir et suivre les crues grâce au radar

Les projets HYDRASENS et FLOODMOIST ont étudié les processus qui influencent les inondations dans les bassins versants de la Dyle en Belgique et de l'Alzette au Luxembourg. L'objectif ? Développer des modèles de prédiction des crues plus fiables afin de mieux assurer la protection des habitants. Traditionnellement, les agences civiles utilisent des modèles basés sur le niveau des rivières qui ne tiennent pas compte du taux



L'ESA a montré son intérêt pour ces projets: la mission Sentinel-1 est constituée de 2 satellites équipés de radar à synthèse d'ouverture.

de saturation des sols, donc de leur capacité à absorber l'eau. Pour intégrer ce paramètre important, les chercheurs ont optimisé un modèle couplant hydrologie et hydraulique. Côté hydrologie, pour estimer sa capacité d'absorption, il faut connaître le taux d'humidité du sol qui détermine la fraction des précipitations qui va s'infiltrer et celle qui va ruisseler en surface. Sur le terrain, cette variable est obtenue à l'aide du radar à pénétration de sol. À l'échelle du bassin versant, elle est extraite des données radar satellitaires SAR. Les taux d'humidité du sol dérivés des 2 types de capteurs sont ensuite corrélés de façon innovante. Côté hydraulique, il faut définir l'étendue de l'inondation. Cette cartographie, souvent difficile en zone urbaine ou sous un couvert végétal, est réalisée en fusionnant les données SAR avec des modèles numériques de terrain à haute résolution. Les données hydrologiques et hydrauliques sont enfin injectées dans le modèle de prédiction pour en augmenter la performance. En utilisant des données satellitaires enregistrées en temps quasi-réel, les autorités civiles pourraient s'appuyer sur des modèles alimentés 'en direct' pour motiver les décisions d'alerte avant la catastrophe, et pour organiser les secours pendant la crise.



L'Asie est le continent le plus touché : on y dénombre 95 % des personnes affectées par les inondations.

Les auteurs

Equipe Stereo - BELSPO (Direction Applications aérospatiales)

Plus

Projets FLOODMOIST et HYDRASENS (UGent - UCL - LIST Luxembourg - UBristol UK)

Promoteur: Niko Verhoest

<http://eoeu.belspo.be/stereo> > Catastrophes

La météorologie comme facteur déclenchant de la mortalité et de l'accouchement prématuré

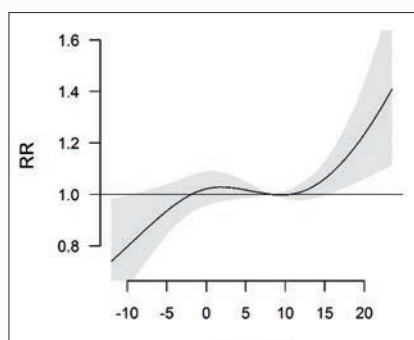
CC peasap-SA 2.0

De nombreuses études ont montré une étroite association entre la pollution de l'air liée aux particules fines et une augmentation de la mortalité journalière. Cependant, la toxicité spécifique des composants de ces particules n'a pas encore été entièrement élucidée. Notons toutefois qu'en ce qui concerne les composés spécifiques de polluants, le projet SSD PARHEALTH¹ a identifié que le fer, le plomb et le zinc sont les plus fortement corrélés avec l'augmentation de la pression artérielle de personnes âgées. Par ailleurs, à ce sujet, l'unité de toxicologie pneumologique (KULeuven) a développé une base de données unique en Belgique sur l'association entre la pollution de l'air aux particules fines et la mortalité (globale, cardiovasculaire et/ou respiratoire). Il en ressort que les effets de la pollution de l'air sont beaucoup plus importants en été qu'en hiver, même sous nos climats. Jusqu'à présent, nous pouvons seulement spéculer sur les mécanismes responsables de cette forte association durant les périodes les plus chaudes alors que les concentrations en particules sont les plus élevées en hiver.

Les prévisions climatologiques émanant du projet ERA_ENVHEALTH ACCEPTED (Assessment of Changing Conditions, Environmental Policies, Time-activities, Exposure and Disease)² montrent, pour le changement climatique à l'échelle urbaine, un réchauffement sensible dans les villes de Bruxelles et de Paris, avec des estimations de hausses de température d'ici 2050 de respectivement 1,6°C et 1,8°C. Les changements de conditions météorologiques peuvent influencer la concentration de polluants, mais peuvent également être intrinsèquement un facteur déclenchant notamment d'affections coronariennes aiguës et d'accouchements prématurés. Les températures extrêmes sont jugées responsables de 0,86 % de la mortalité mondiale totale, la part de décès liés au froid étant sensiblement plus grande que la part de décès liés à la chaleur.³

Outre des maladies coronariennes, des complications périnatales, notamment des accouchements prématurés, peuvent également être déclenchées par des conditions météorologiques. L'accouchement prématuré est la principale cause de morbidité et de mortalité périnatales et est également associé à des décès plus tard dans la vie.⁴ Les effets à court terme de variables météorologiques sur le risque d'accouchement prématuré n'ont jusqu'à présent été étudiés que de manière limitée. C'est la raison pour laquelle nous avons étudié dans le cadre du projet ERA_ENVHEALTH ACCEPTED l'influence des conditions météorologiques sur les accouchements prématurés, notamment en Flandre.⁵

La température jusqu'à 6 jours avant l'accouchement est associée à un risque accru d'accouchement prématuré de 8,8 % (intervalle de confiance à 95 % : 0,7 % à 17,5 %) pour une hausse de température minimale de 8,3 °C (50e percentile) à 16,3 °C (95e percentile). L'estimation correspondante pour une hausse de température maximale de 14,7 °C (50e percentile) à 26,5°C (95e percentile) est de 9,1 % (IC à 95 % : -0,3 % à 19,2 %).⁴ Nos résultats suggèrent que les femmes enceintes doivent se protéger des températures extrêmes. Ces constatations sont importantes dans le contexte des projections climatiques futures qui prédisent une augmentation tant de la fréquence que de l'intensité des conditions atmosphériques extrêmes. La pertinence de ces risques liés à la température est élevée, attendu que même une légère baisse de la durée de la grossesse est associée à des effets négatifs sur la santé tôt et tard dans la vie.



Relation entre température minimale (6 jours avant la naissance) et accouchement prématuré. La ligne noire indique le risque relatif par rapport à la température de référence (médiane : 8,3 °C), la surface grise est l'intervalle de confiance à 95 %.

Les auteurs

Tim Nawrot et Bianca Cox, Universiteit Hasselt, Centrum voor Milieukunde. Remerciements à Suzanne Remy (Institut scientifique de service public-ISSeP) et Andy Delcloo (Institut royal météorologique) pour leur collaboration.

Références

¹ www.belspo.be/belspo/SSD/science/pr_health_envir_fr.stm

² www.acceptedera.eu/

³ Gasparrini A et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet* 2015;386(9991):369-375.

⁴ Crump C et al. Gestational age at birth and mortality in young adulthood. *JAMA* 2011;306(11):1233-1240.

⁵ Cox B et al. Ambient temperature as trigger of preterm delivery in a temperate climate. in review.

Traquer les maladies émergentes

Malaria, maladie de Lyme, de la langue bleue... chaque année ces maladies gagnent du terrain. Elles sont transmises par de petits organismes qu'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, les modifications climatiques leur ouvrant des altitudes et latitudes jusque-là préservées. De nouvelles régions parfois très vulnérables sont ainsi touchées. Face à ce 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

Au sein du programme STEREO, plusieurs recherches conjuguent données de terrain (température, humidité, données sanitaires, socio-économiques...) et satellitaires (climatologiques, occupation du sol...) pour analyser les mécanismes d'émergence, de propagation et de transmission des maladies infectieuses. Elles passent ainsi au crible les relations 'climat - environnement - santé' afin de pouvoir fournir aux acteurs de la santé publique des outils, comme des cartes de risque, leur permettant de surveiller et prévoir les épidémies.

Tiques sous influence

Le projet MULTITICK a étudié, à diverses échelles, les facteurs environnementaux, y compris ceux liés à l'activité humaine, qui influencent la distribution de la maladie de Lyme en Belgique et dans les pays baltes. Très sensibles aux changements climatiques comme aux modifications locales, l'aire de distribution des tiques évolue et s'élargit. Le projet a montré que la tique peut être rigoureusement associée à certains facteurs environnementaux (type de végétation, température, humidité...), dont plusieurs peuvent être dérivés des données de télédétection et introduits dans des modèles permettant d'identifier les environnements les plus favorables à l'apparition de la maladie.

Chaque année, plusieurs milliers de personnes sont touchées par la maladie de Lyme en Europe, et ce nombre ne fait qu'augmenter.



Les moutons sont les ruminants les plus sévèrement affectés par la maladie de la langue bleue.

La langue bleue, une maladie à suivre

Le projet BLUETONGUE s'est intéressé à la propagation de la fièvre catarrhale, aussi appelée maladie de la langue bleue, une pathologie virale des ruminants transmise par un moucheron. Auparavant seulement fréquente dans les régions tropicales et subtropicales, la maladie a atteint l'ensemble du bassin méditerranéen vers 1998, remontant petit à petit vers le Nord. En 2006, la Belgique signalait ses premiers cas; aujourd'hui elle continue à progresser, notamment en Europe de l'Est. En combinant l'information climatique dérivée de l'imagerie satellitaire et les observations de terrain, les chercheurs ont développé des modèles qui estiment la probabilité de présence des différentes espèces de moucheron et précisent leur dynamique de déplacement. Au vu des enjeux sanitaires et économiques, de telles applications sont cruciales pour gérer de façon coordonnée les situations de crise et pour analyser avec précision les facteurs de risque de contamination.

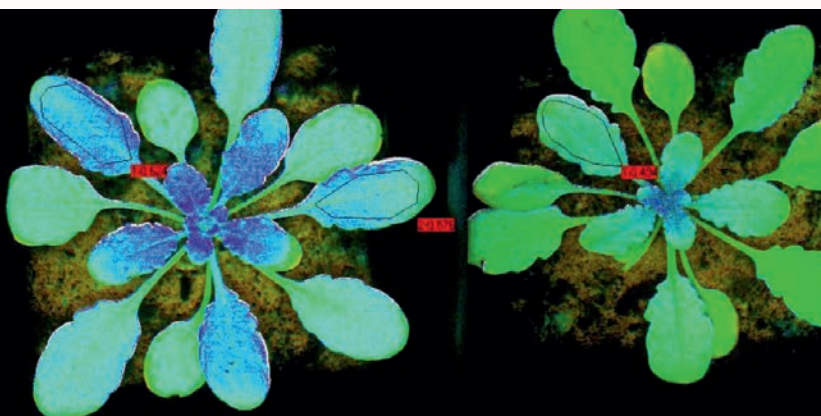
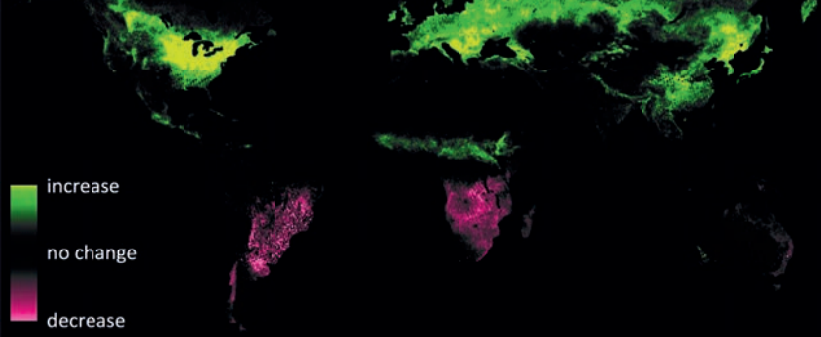
Les auteurs

Equipe Stereo - BELSPO (Direction Applications aérospatiales)

Plus

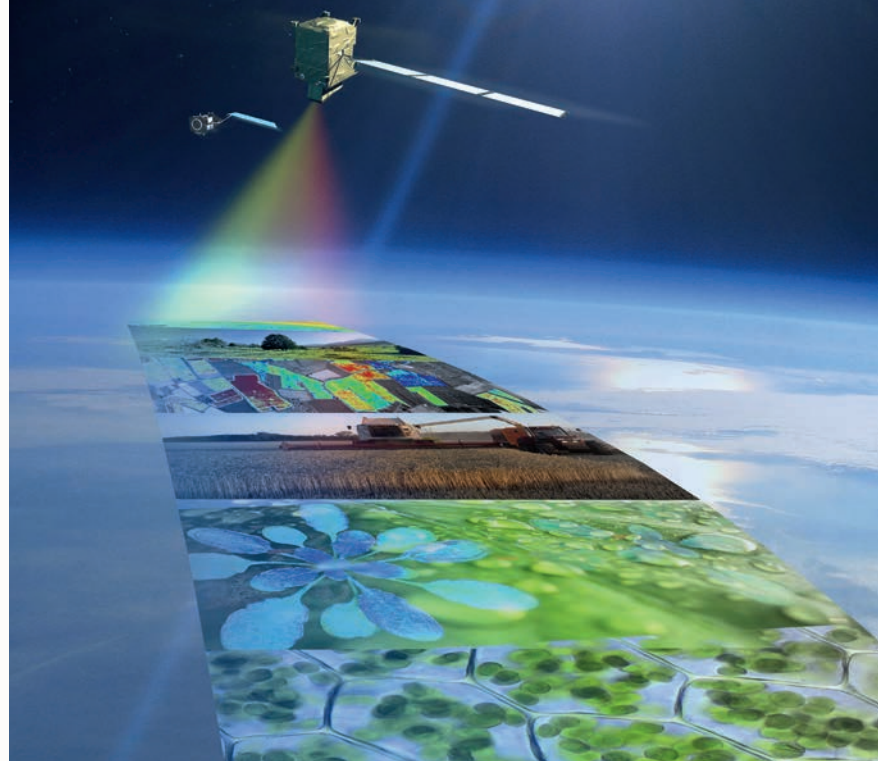
Projets MULTITICK (UCL) et BLUETONGUE (Avia Gis - ITM)
Promoteurs: Sophie Vanwambeke et Guy Hendrickx
eoeu.belspo.be/stereo > Epidémiologie





En haut : Variation de la fluorescence de la chlorophylle de l'hiver boréal à l'été boréal en 2011. Données provenant du capteur 'Global Ozone Monitoring Experiment (GOME)-2' à bord du satellite MetOp.

En-dessous : Fluorescence des plantes démontrée en laboratoire.
© U. Rascher, Forschungszentrum Jülich



La mission FLEX de l'ESA fournira des cartes globales de la fluorescence de la végétation, indicatrice de l'activité photosynthétique. Elles permettront d'améliorer notre compréhension du rôle de la végétation dans les cycles du carbone et de l'eau.
© ESA/ATG medialab

La fluorescence comme indicateur de stress de la végétation

Les extrêmes climatiques et hydrologiques (sécheresses, tempêtes, inondations, vagues de chaleur...) constituent de sérieuses menaces pour la société et les écosystèmes de par le monde. Des observations précises et à grande échelle des réponses des écosystèmes à ces perturbations sont dès lors requises. Les nouvelles mesures globales de la fluorescence constituent un outil très prometteur pour l'étude de ces impacts. La fluorescence de la végétation, une subtile lueur émise par les réactions chimiques durant la photosynthèse, est intimement liée au stress subi par l'écosystème. Des études récentes se sont intéressées à l'utilisation des mesures satellitaires de fluorescence comme indicateurs de la croissance des forêts mais leur exploitation dans la réponse de la végétation aux extrêmes climatiques est encore inexplorée.

Des progrès tout aussi pertinents en science de l'observation de la Terre, qui ne sont pas directement liés au développement de nouvelles technologies, devraient compléter ces études: avec presque 4 décennies d'observations globales de l'environnement et du climat, des initiatives récentes ont permis de générer des bases de données multi-satellites de variables cruciales telles que l'humidité du sol, l'évaporation et la teneur en eau de la végétation. Ces données enregistrées sur de longues périodes peuvent aider à révéler des changements très lents au niveau des extrêmes hydro-climatiques ainsi que leurs impacts sur les écosystèmes terrestres. Ces nouvelles observations par satellite et ces bases de données sur du long terme sont primordiales pour l'évaluation des capacités des

modèles climatiques à représenter ces processus qui, au final, déterminent la précision des estimations des températures dans le futur. Au sein du nouveau programme STEREO III, les projets SAT-EX et STR3S ont pour but d'estimer comment les sécheresses, les inondations et les vagues de chaleur ont évolué au cours des 3 dernières décennies et quelles ont été les implications pour les écosystèmes terrestres, tout en explorant l'utilisation de nouvelles technologies (comme les observations de la fluorescence) pour une meilleure compréhension des interactions climat-végétation. Ces projets fourniront les moyens d'évaluer la capacité des modèles climatiques actuels du GIEC à représenter les extrêmes et leurs impacts sur la biosphère. Ils sont également en phase avec les priorités de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et le lancement, dans les prochaines années, du satellite FLEX (*Fluorescence Explorer*) dédié à la fluorescence.

L'auteur

Diego Miralles, Universiteit Gent, Vakgroep Bos- en Waterbeheer

Plus

Projets SAT-EX et STR3S (UGent - ULB - TU Wien Austria - Colombia Un.USA)

Promoteurs: Diego Miralles et Niko Verhoest

<http://eo.belspo.be/STEREO3.aspx>

Performance énergétique et bâtiments historiques : le défi de la préservation des monuments

Introduction

Les secteurs ménager et tertiaire sont, en Europe, responsables de plus de 40 % de la consommation d'énergie. L'amélioration des performances énergétiques des bâtiments peut générer une économie énergétique relativement importante et donc également une réduction des émissions de CO₂. C'est dans la perspective d'une réduction des émissions de CO₂ et d'un respect effectif du protocole de Kyoto que des directives spécifiques et contraignantes se sont avérées nécessaires pour le secteur de la construction. Ces mesures ont été définies dans une directive européenne relative aux performances énergétiques des bâtiments à la fin de l'année 2002. L'aspect 'construction durable' acquerrait ainsi une position centrale dans les projets de construction nouvelle.

Dans le cas des monuments protégés, l'aspect construction durable entraine régulièrement en conflit avec des critères de nature historique, architecturale, déontologique et esthétique, rendant les mesures d'économies d'énergie pas toujours réalisables de manière aussi systématique que dans le cas des constructions nouvelles.

Performances énergétiques et monuments : un duo constitutif de défi

La sobriété en termes de consommation d'énergie n'était pas une priorité dans les exigences initialement imposées aux bâtiments historiques. Les évolutions des dernières décennies sur les plans politique, social et économique contraignent toutefois ces bâtiments à offrir de meilleures performances d'un point de vue énergétique. Le manque d'expérience en matière de techniques novatrices et le fait que l'efficacité et les risques associés n'ont pas été suffisamment établis pour notre patrimoine immobilier forment souvent un obstacle à leur application dans la pratique de la restauration. Les conséquences des interventions novatrices n'étaient, par le passé, pas toujours correctement évaluées, générant un risque de dégradation au niveau de la construction elle-même, des matériaux présents, de l'environnement ainsi que du voisinage immédiat. C'est pour ces raisons que les techniques de restauration novatrices (dont l'isolation) sont utilisées avec la plus grande prudence.

Isolation de bâtiments historiques

L'isolation est un thème central dans le secteur de la construction depuis plusieurs décennies, sous l'effet de considérations soit écologiques, soit environnementales.



Figure 1 : façade arrière sud-ouest et façade latérale sud-ouest du centre administratif de l'ancienne école vétérinaire. (© <http://arbres-inventaire.irisnet.be>, site de l'Inventaire des arbres remarquables de la Région de Bruxelles-Capitale)

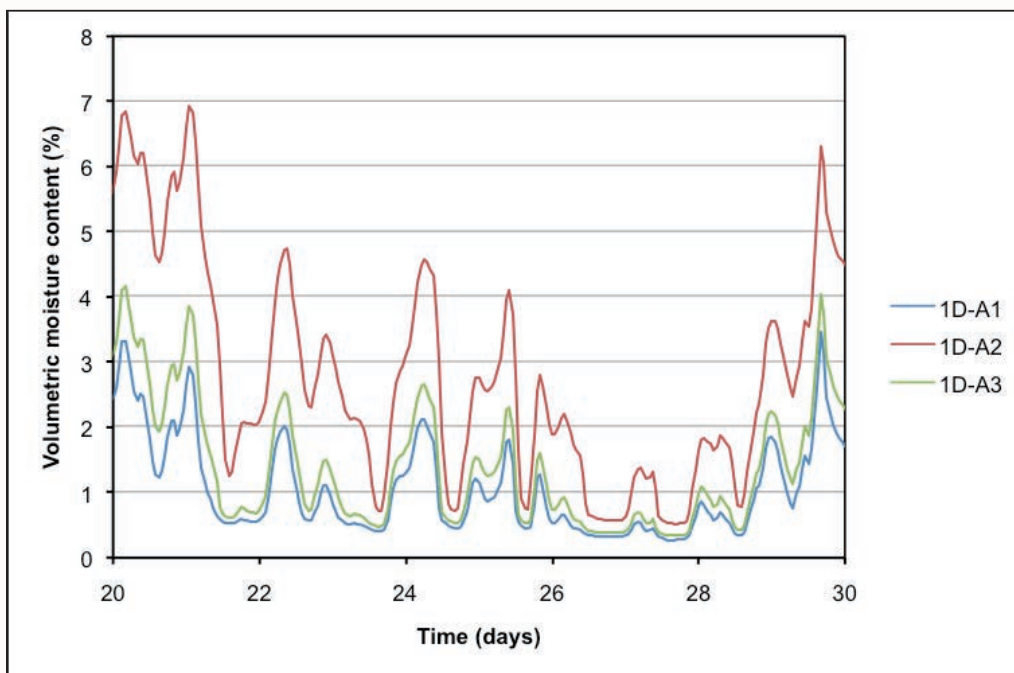


Figure 2 : teneur en humidité simulée (vol. %) à 3 mm d'épaisseur dans la brique durant une période hivernale, situation non isolée (A1) et isolée (12 cm plaque de silicate de calcium, A2 et 3 cm de plâtrage isolant, A3).

Dans ce domaine, les bâtiments historiques forment un sujet d'étude de choix, non seulement en Belgique mais également partout en Europe. Si l'on veut assurer la préservation des bâtiments historiques à l'avenir et trouver des gens disposés à exploiter et à occuper le patrimoine, il convient d'agir.

La mise en place d'une couche isolante sur la face extérieure de bâtiments historiques est souvent non souhaitable, compte tenu de l'impact esthétique. En pareil cas, pour améliorer les performances thermiques d'un bâtiment, on procède à l'installation d'un système d'isolation mis en place à l'intérieur. La mise en place d'une isolation intérieure sur une façade (historique) existante entraîne dans la plupart des cas une modification de l'hygrométrie dans la construction existante, consécutive à la modification des conditions de séchage de la paroi. Cela entraîne une augmentation généralisée de l'humidité dans la paroi, entraînant une hausse du risque de dégâts dus au gel. Ce risque peut être estimé par la réalisation préalable d'une étude de sensibilité au gel de la maçonnerie, et ce compte tenu des conditions climatiques caractérisées par une charge d'eaux de pluie extrême, typique de notre climat futur.

L'ancienne école vétérinaire d'Anderlecht

L'école vétérinaire d'Anderlecht est située dans le quartier de Cureghem sur un site de 4 ha construit entre 1903 et 1909 dans un style néo-renaissance flamande. Après une histoire allant d'un essor florissant à un abandon total, une revalorisation voit le jour au début du XXI^e siècle avec la transformation du bâtiment administratif de l'ancienne école vétérinaire d'Anderlecht (figure 1) en un centre destiné à héberger de jeunes entreprises.

Analyse de risque de l'isolation intérieure

Le laboratoire de l'IRPA a réalisé pour le compte de la commune d'Anderlecht, actuelle propriétaire du site et dans le cadre de la réaffectation en espaces de bureau, une analyse de risque ciblant 'l'augmentation de charge' des matériaux de construction des façades extérieures, en termes de charge hygrométrique et de nombre de cycles gel-dégel, consécutive à la mise en place d'une isolation intérieure. Cette analyse repose sur une approche théorique basée sur des modèles simulant le comportement d'hygrométrie dans les façades. Une telle simulation a permis de conclure qu'à une profondeur de 3 mm, la température baisse de manière généralisée de 2 °C dans la maçonnerie en briques dans l'hypothèse d'une mise en place de plaques de silicate de calcium de 12 cm d'épaisseur comme isolation intérieure. L'effet thermique est environ trois fois inférieur en cas d'utilisation d'un plâtrage isolant d'une épaisseur de 3 cm. L'humidité à cette profondeur double de manière généralisée après la pose de plaques de silicate de calcium de 12 cm et s'accroît de 5 à 25 % si l'on opte pour le plâtrage intérieur isolant testé (figure 2).

En conclusion, une augmentation généralisée du nombre de cycles gel-dégel est à prévoir, tout comme pour le risque de dégradation, singulièrement si ces cycles sont associés à une hygrométrie élevée, comme on peut s'y attendre avec notre climat futur.

L'auteur

Hilde De Clercq, Institut royal du Patrimoine artistique (IRPA), Direction opérationnelle Laboratoires

PARTIE 3 : ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET MESURES D'ATTÉNUATION

Changement climatique et sécurité alimentaire

La fourniture d'intrants agricoles, ainsi que la production, l'emballage, le traitement, le transport et la distribution de produits alimentaires représentent ensemble 19 à 29 % des émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial et exercent une pression importante sur les ressources naturelles, l'eau, l'azote et le phosphate, ainsi que les terres arables en particulier. Réformer les systèmes alimentaires dans le sens d'une plus grande durabilité est donc essentiel dans l'optique d'une transition orientée vers une société sobre en carbone et efficiente sur le plan des ressources (De Schutter, *Transformative potential of the right to food. Report of the Special Rapporteur on the right to food*, 2014). Des pans de plus en plus larges de la société sont demandeurs d'un tel changement et manifestent leur recherche d'alternatives. De plus, le consensus dont faisait l'objet le productivisme sur le plan de la gestion des systèmes alimentaires, apparu après la seconde guerre mondiale, a beaucoup perdu en popularité et a été partiellement remplacé par diverses approches et orientations de valeurs nouvelles. L'efficacité économique et la rationalisation technologique demeurent importantes mais elles s'accompagnent de préoccupations touchant à la qualité nutritionnelle, à la sécurité alimentaire, aux retombées environnementales, à l'efficacité des ressources et aux questions d'équité, au titre de 'principes organisateurs' égaux en importance sur la base desquels l'innovation en matière de produits et les nouvelles pratiques en matière de consommation évoluent.

La communauté scientifique a saisi cette évolution de la demande des consommateurs et couple celle-ci aux défis auxquels les systèmes alimentaires sont confrontés. Les experts internationaux définissent les 'régimes durables' comme étant 'des régimes alimentaires ayant de faibles conséquences sur l'environnement, qui contribuent à la sécurité alimentaire et nutritionnelle ainsi qu'à une vie saine pour les générations actuelles et futures, contribuant à protéger et à respecter la biodiversité et les écosystèmes, culturellement acceptables, économiquement équitables et accessibles, abordables, nutritionnellement sûrs et sains, ainsi que permettant d'optimiser les ressources naturelles et humaines.' (Symposium scientifique international *Biodiversité et régimes alimentaires durables*, 2010).

Les incitants commerciaux conventionnels et la réglementation directe tiennent de plus en plus compte de ces préoccupations. Toutefois, les réformes aboutissent trop souvent à des échecs en raison du fait qu'elles cherchent à influencer sur le comportement exclusivement par le biais d'incitants agissant 'de l'extérieur' plutôt que 'de l'intérieur' : des outils fiscaux et réglementaires sont mis en place pour organiser l'ensemble d'incitants adéquats mais les valeurs auxquelles



tiennent les acteurs, les normes sociales auxquelles ils adhèrent ou l'influence sociale qu'ils subissent sont ignorés. La recherche menée dans le projet Food4Sustainability financé par BELSPO dans le cadre du programme BRAIN-be, s'attache à comprendre ces motivations intrinsèques et à mettre en lumière le rôle qu'elles peuvent jouer dans la transition (www.food4sustainability.be). L'hypothèse de ce projet est qu'il est possible d'augmenter progressivement le poids de différentes innovations sociales de manière efficiente sur le plan des coûts, souvent sous la forme de formules de gouvernance hybrides, en mettant en place des mécanismes collectifs basés sur les motivations tant extrinsèques (récompenses externes) qu'intrinsèques (reconnaissance des valeurs personnelles et des normes sociales) qui déterminent le comportement des acteurs des systèmes de transition (Dedeurwaerdere, *Combining internal and external motivations in multi-actor governance arrangements*, Env. Sc. & Policy, 2016). Nous mettrons cette hypothèse à l'épreuve dans le domaine spécifique de la gestion des systèmes alimentaires et en déduirons des implications stratégiques.

Nous avons identifié des processus collectifs dans des scénarios de transition au sein de chaînes alimentaires courantes, mais aussi dans des chaînes d'approvisionnement courtes et par le biais d'initiatives en faveur de régimes alimentaires durables dans la restauration collective publique et privée.

Les auteurs

Olivier De Schutter et Tom Dedeurwaerdere, Université catholique de Louvain, Centre de Philosophie du droit



Le verdissement de la ville offre une réponse efficace sur le plan des coûts à des défis sociaux tels que le réchauffement climatique, la régulation des eaux, la santé humaine et le bien-être. Il permet également d'augmenter la biodiversité en ville. Ici : Green Park, Londres. Photo CC Hachimaki-SA 2.0

La nature comme solution pour les défis de société

Une approche intégrée

Partout dans le monde, les solutions basées sur la nature gagnent de plus en plus les faveurs des gestionnaires, planificateurs urbanistiques, décisionnaires et acteurs du monde des affaires. La nature est utilisée pour résoudre des problèmes urgents, tels que le changement climatique, la sécurité alimentaire et l'approvisionnement en eau. Mais les solutions basées sur la nature sont plus que cela. Elles ont également des retombées positives sur la biodiversité et sur le dynamisme des écosystèmes et stimulent l'économie et l'emploi. Elles sont souvent mises à profit pour favoriser la santé publique et le bien-être en milieu urbain. Les solutions basées sur la nature intègrent des facteurs sociaux tels que le bien-être, la lutte contre la pauvreté et le développement socio-économique, et constituent donc un complément à la préservation de la nature traditionnelle.

Si la notion de 'solutions basées sur la nature' est un concept relativement récent, la force de la nature n'a rien de nouveau. Depuis des siècles déjà, la nature offre des ressources de base telles que de l'eau, des aliments, de l'énergie, des abris, des matières premières et des médicaments. Néanmoins, avec une croissance démographique exponentielle et une utilisation non durable des terres, nous semblons

dépasser sans cesse davantage les frontières de l'humain et de la planète. Les solutions purement technologiques ne suffisent souvent plus à inverser efficacement la tendance.

Les solutions basées sur la nature peuvent offrir une solution alternative au modèle de croissance économique à court terme, générateur de gaspillages. La protection des mangroves en est un bel exemple. Elles fournissent du bois (carburant et matériau de construction) à la population locale tout en protégeant les occupants des zones littorales contre les tempêtes et les raz-de-marée. Les racines retiennent les sédiments et contribuent ainsi très significativement à la lutte contre l'érosion du littoral. Elles offrent en outre des zones de reproduction et de couvée aux crustacés, poissons et mollusques vivant en mer.

Du vert dans la ville

Sous l'effet du changement climatique, les périodes de hautes températures vont se faire plus fréquentes et plus longues. La chaleur et la sécheresse constituent dès lors un problème de société toujours plus grand, y compris en milieu urbain. Les bâtiments et l'asphalte retiennent la chaleur, ce qui a pour conséquence que la température peut y être jusqu'à 10 °C supérieure à celle enregistrée dans les

zones environnantes. L'implantation d'espaces verts en ville (davantage de parcs et de toits verts) est une mesure adaptative qui s'est avérée efficace dans plusieurs cas de problématiques liées au climat, et contribue en outre à un environnement de vie attrayant. Les toitures et façades vertes récoltent l'eau de pluie, empêchant celle-ci de s'écouler directement dans les égouts. Les éléments verts assurent une isolation des façades et des toits, réduisant les besoins de refroidissement ou de chauffage. Prêter attention à la biodiversité est également crucial ici : toutes les plantes et tous les arbres ne sont pas tous à même de résister au changement climatique futur, avec des périodes de sécheresse plus longues, des épisodes de pluie et de froids exceptionnels en hiver. Le verdissement de la ville implique une approche intégrée.

A cause de la hausse du niveau des mers, de l'augmentation possible du débit des rivières et de l'extension des zones urbaines, de plus en plus de régions vont être confrontées à une protection insuffisante contre les inondations. Ici aussi l'utilisation d'éléments naturels (par ex. le développement de berges multifonctionnelles) peut offrir une solution durable afin d'écarter le risque d'inondation dans les zones urbaines. En outre, ces zones offrent souvent des possibilités de loisirs supplémentaires.

Nature et climat

Les solutions basées sur la nature fonctionnent également à plus grande échelle. Le déboisement est responsable de 20 % des émissions de CO₂ au niveau mondial. Contrer l'effet de serre par le biais d'une réduction sensible des émissions de CO₂ implique donc, avant tout, de prévenir le déboisement tout en investissant dans le reboisement et le rétablis-

sement des forêts. Le reboisement engendre généralement une augmentation de l'absorption de CO₂. En outre, les forêts stabilisent le sol, ce qui réduit le risque d'érosion. Les tourbières forment également un gigantesque réservoir à CO₂ durable au niveau mondial. Les mesures de protection de ces écosystèmes prêtant parallèlement attention aux besoins socio-économiques sont dès lors à la fois efficaces et durables.

La solution ?

Les solutions basées sur la nature étant faciles à comprendre intuitivement, elles impliquent que diverses parties prenantes se retroussent les manches collectivement, pour augmenter sensiblement les chances de réussite. Néanmoins, la question de savoir si des solutions basées sur la nature sont effectivement la clé de la réussite en termes d'objectifs socio-écologiques de durabilité pour l'ensemble de l'humanité n'est pas encore tranchée. Beaucoup dépendront en effet d'une application correcte de celles-ci, à savoir une mise en œuvre tenant compte de la biodiversité, des services générés par les écosystèmes et des droits des communautés. Le risque que l'avantage économique prime, avec toutes les conséquences néfastes que cela implique, est réel. Nous devons donc rester vigilants et tendre vers un modèle économique équilibré à l'égard des capacités de l'humain et de la nature. Il convient de continuer à s'intéresser à des solutions novatrices écologiquement efficaces, économiquement réalistes et socialement équitables.

L'auteur

Hilde Eggermont, Plate-forme belge de la Biodiversité

Vue sur les toitures vertes à Stuttgart (Allemagne), une des premières villes à avoir introduit une législation exigeant que les toits des nouveaux bâtiments incluent une toiture verte.
© 2013 Diane Cook & Len Jenschel



'Changer la société, pas le climat'

Ce slogan est sans doute simpliste mais il met le doigt sur les enjeux socio-économiques considérables qu'implique l'évolution du climat. Ces enjeux concernent à la fois les conditions de l'atténuation (*mitigation*) et de l'adaptation.

Effet rebond

Nos sociétés sont dépendantes des énergies fossiles pour les grandes comme pour les petites choses. Les grandes : la croissance, les investissements ou les infrastructures. Les petites : les normes de mode de vie contemporain comme la consommation, le confort ou les déplacements. Comme l'a montré le projet HECORE, la part de l'énergie dans les budgets des ménages a peu varié sur 40 ans, passant de 5,9% en 1958 à 5% en 2001. Dans le même temps on a assisté à des gains d'efficacité énergétique importants (pensons aux véhicules par exemple), mais ceux-ci ont été largement absorbés par les différentes formes d'effet rebond¹, étudiées par ce même projet. De nombreux travaux montrent toute la difficulté de modifier les niveaux de consommation d'énergie, ceux-ci étant le fruit de pratiques habituelles fortement ancrées¹.

Dans la mesure où la facture énergétique représente une part relativement faible des dépenses totales des ménages, il n'y a pas d'incitant économique pour que les citoyens diminuent cette consommation. La taxation de l'énergie ou du carbone est une recommandation économiquement justifiée, mais si aucune mesure complémentaire n'est prise, le problème de la précarité énergétique s'accroîtra².

Société bas carbone

Ce type de constatation est à la base d'un autre projet actuellement en cours, SUSPENS. Il vise à étudier les conditions d'une transition vers une société bas carbone qui concilierait les objectifs environnementaux et de justice sociale. Pour ce faire il s'agit notamment de construire une base de données qui combine des informations sur les revenus, la consommation et l'impact environnemental de la consommation au niveau des ménages en Belgique, et d'identifier les relations entre ces facteurs ainsi que le contexte actuel de gouvernance des politiques bas carbone en Belgique.

Adaptation

Ces projets ne sont qu'illustratifs d'enjeux majeurs pour le moyen terme. Ainsi la diminution rapide et massive de consommation d'énergie fossile est-elle possible, et avec quels effets ? D'autre part que signifiera réellement l'adap-



© Enzo Leroy

tation au changement climatique, un thème qui se révélera certainement de plus en plus multiforme, en fonction des phénomènes, des groupes sociaux, et de l'horizon temporel.

Les auteurs

Edwin Zaccai, Université libre de Bruxelles, Centre d'Etudes du Développement Durable et Kevin Maréchal, Université libre de Bruxelles, Centre d'Études économiques et sociales de l'Environnement

Notes

¹ Maréchal K. and Holzemer, L. (2015), *Getting a (sustainable) grip on energy consumption: the importance of household dynamics and 'habitual practices'*, Energy Research and Social Science 10: 228-239.

² Baromètre de la précarité énergétique en Belgique : www.kbs-frb.be/fr/Activities/Publications/2015/20151123NT1

Références

www.belspo.be/belspo/ssd/science/projects/HECORE%20E.pdf

www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/SUSPENS_en.pdf

Maréchal K., *The economics of climate change and the change of climate in economics*, Routledge, London and New-York, 2012

Van Gameren V., Weikmans R., Zaccai E., *L'adaptation au changement climatique*, Repères, La Découverte, 2014

Le rôle des pouvoirs publics en vue de stimuler une société à faible intensité de carbone

Si le nombre de personnes qui ont réalisé ces dernières années des transformations économes en énergie dans leur habitation est croissant, il n'est pas aussi important qu'imaginé. Il existe pourtant une grande assise sociétale en vue d'aborder les problèmes climatiques. La conférence sur le climat à Paris l'a clairement démontré. Dans une société à faible intensité de carbone, nous essayons d'utiliser le moins possible de combustibles fossiles, de recycler les matières premières et les produits afin de diminuer les émissions de CO₂ et d'enrayer le changement climatique.

Le projet de recherche ALPI¹ financé par BELSPO dans le cadre du programme BRAIN-be entend passer à la loupe un certain nombre d'instruments de politique afin de soutenir une société à faible intensité de carbone. À travers des subsides, des avantages fiscaux ou des campagnes d'information, les pouvoirs publics peuvent inciter les citoyens à diminuer leur empreinte carbone. Mais les pouvoirs publics sont également eux-mêmes consommateurs, 28 % de la consommation européenne totale étant le fait des pouvoirs publics. Pensons à l'achat de matériels de bureau, aux bâtiments, mais aussi à l'alimentation dans les restaurants du personnel.

Les pouvoirs publics sont-ils un consommateur durable ?

À travers la réglementation européenne relative au *market public ecological* (MPE), les pouvoirs publics feront des achats respectueux de l'environnement. Dans le cas du bois, si l'on suppose que tous les pouvoirs publics achètent uniquement des produits en bois certifié, cette certification

implique une diminution de l'abattage illégal d'arbres. Les chercheurs du projet ALPI ont pu démontrer qu'à court terme, cet achat de bois certifié a un effet sur le commerce mondial de flux de bois. Alors que la plupart des régions à travers le monde satisfont à leur propre demande de bois certifié et que la production de bois certifié augmente en Europe et en Amérique, curieusement c'est surtout le commerce de bois non certifié qui augmente. Et puisque le prix diminue pour le bois conventionnel, la consommation augmente donc, avec pour conséquence la production de davantage de bois conventionnel, principalement en Afrique. Ceci est en opposition avec l'objectif initial du MPE, à savoir stimuler une production plus durable, également dans les pays du sud. Par ailleurs, la certification représente souvent un coût trop élevé pour des producteurs de bois à petite échelle dans le sud. C'est la raison pour laquelle il est très important d'apporter un plus grand accompagnement en ce qui concerne la certification dans le sud. Cette analyse démontre donc qu'il est important d'avoir une vision globale de l'impact d'une politique climatique régionale.

Les primes des pouvoirs publics sont-elles suffisamment convaincantes ?

Malgré toutes les primes destinées à favoriser, ces dernières années, la construction et la transformation économe en énergie, le nombre de maisons économes en énergie croît trop lentement. Les décideurs politiques essaient de convaincre les propriétaires de maison avec des arguments rationnels comme l'économie à réaliser sur la facture d'énergie. Toutefois ALPI entend démontrer que la décision de transformer ou pas son habitation est prise de manière plus intuitive. Outre les stimuli financiers, davantage d'instruments de politique devraient être engagés. Des actions de sensibilisation réfléchies, une meilleure conception du certificat de performance énergétique d'un bâtiment ainsi qu'une visualisation de la consommation d'énergie sont des instruments possibles.

L'auteur

Ann Verspecht, Universiteit Gent, Vakgroep Landbouweconomie

Plus

www.alpi.ugent.be



Notes

¹ www.belspo.be/belspo/brain-be/themes_5_Social_fr.st-m#ALPI



L'importance du stockage géologique du CO₂ pour la Belgique

Le captage et le stockage de CO₂ dans des réservoirs géologiques est une mesure susceptible d'être nécessaire pour parvenir aux objectifs climatiques définis. Si la Belgique offre également un potentiel en la matière, les différents sous-aspects de cette technologie (dont entre autres la capacité de stockage requise, l'infrastructure mais également l'aspect financier) doivent être harmonisés pour permettre l'exploitation de projets commerciaux.

Pourquoi stocker du CO₂ dans le sous-sol profond ?

Lors de la Conférence sur le Climat de décembre à Paris, il a été décidé de limiter le réchauffement de la planète à 2 degrés, et même de tenter de le contenir à 1,5 °C. Rien n'a toutefois été décidé quant aux mesures à prendre en elles-mêmes. L'Agence internationale de l'Énergie (AIE) souligne depuis pas mal de temps déjà qu'il n'y a pas de solution unique pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (et de CO₂ en particulier) de manière économiquement réaliste. La manière la plus sûre d'y parvenir consiste à mettre en œuvre toutes les méthodes possibles et disponibles. Plusieurs des solutions figurant dans cet éventail sont évidentes et d'ores et déjà bien connues de tout un chacun : citons par exemple l'efficacité énergétique ou l'utilisation de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne.

Le captage des émissions de CO₂ en vue du stockage ultérieur dans le sous-sol profond (*CO₂ capture and geological storage, CCS*) est une technologie moins connue. Il s'agit toutefois d'une technologie clé dans l'optique de concrétiser la réduction des émissions de CO₂ en offrant le meilleur rapport coût/efficacité possible pour les méga-sources industrielles. L'AIE est parvenue à la conclusion que dans le scénario le plus favorable sur le plan du rapport coût/efficacité, la CCS pourrait permettre à l'horizon 2050 d'assurer 17 % de la réduction des émissions mondiales de CO₂. Cette technologie est en outre la seule solution permettant de concrétiser les objectifs de réduction à court et à moyen terme pour de nombreux secteurs. Pensons simplement à la production d'acier ou d'engrais chimiques, pour lesquelles les méthodes de production alternatives sont inexistantes à ce jour ou n'en sont qu'aux balbutiements. Le captage de CO₂ aérien (par combustion de biomasse ou par voie directe à l'avenir), puis le stockage dans des réservoirs géologiques forment également l'unique option d'atténuation permettant de parvenir à des émissions négatives nettes. Des résultats de recherche provisoires obtenus au Service géologique de Belgique, composante de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (SGB-IRSNB), pour la Suède par exemple, démontrent que certains pays pourraient, de cette manière, disposer du potentiel permettant de parvenir à des émissions négatives même à l'échelle nationale.

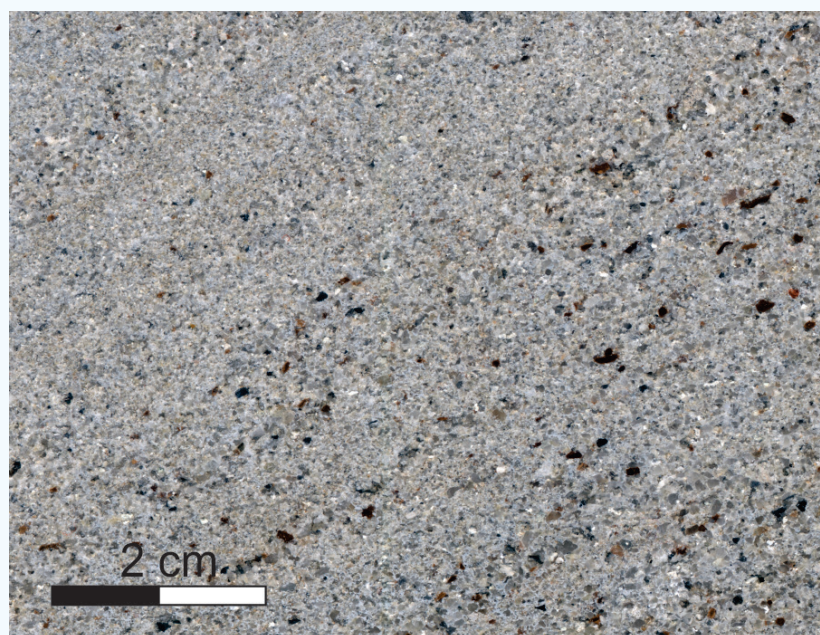
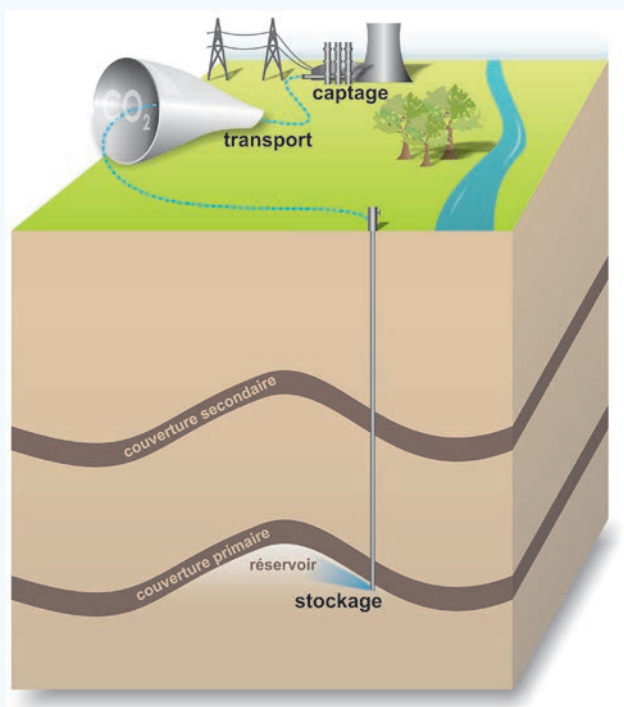


Figure 1. La chaîne de CCS, avec captage, transport par pipeline et injection dans un réservoir géologique, où différentes couches isolantes assurent un stockage sûr et permanent.

Figure 2. Vue détaillée d'une roche de réservoir typique (grès) pour le stockage de CO₂. Le CO₂ est injecté sous pression dans les pores.

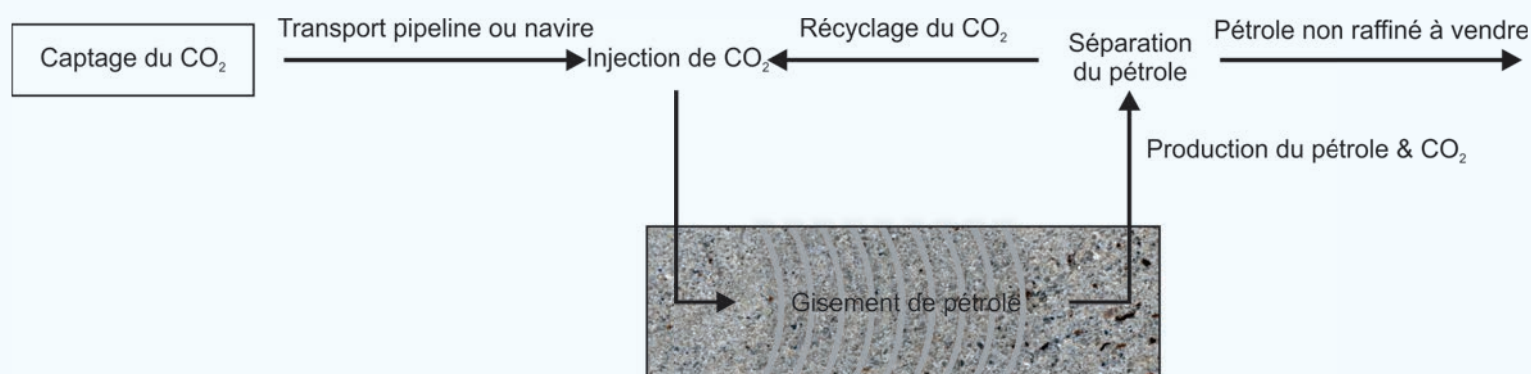


Figure 3. Présentation schématique de la technique de récupération assistée du pétrole. Le CO₂ dilue le pétrole et lors de la production, le mélange est séparé, ce qui permet le réemploi du CO₂.

La CCS en Belgique

Plusieurs projets pilotes, de démonstration et commerciaux sont déjà en cours dans le monde, prouvant que la technologie est disponible et même économiquement réaliste. Pourtant, le contraire est affirmé et répété au niveau politique pour 'enterrer' la CCS. On constate, les dernières années, dans les différents États membres de l'UE, une tendance à rejeter les aides publiques pour des projets de CCS, mettant un frein à la recherche, et ce au contraire de ce qui se fait dans le reste du monde, où la recherche et la mise en œuvre se poursuivent, alors que la situation était exactement inverse il y a une dizaine d'années.

Concernant spécifiquement la Belgique, les projets PSS-CCS nationaux ont été lancés en 2005 avec le soutien de BELSPO, sous la coordination du SGB-IRSNB. L'objectif de ces projets consistait à étudier la faisabilité des différents aspects de la CCS pour la Belgique, concernant tant le captage que le transport et le stockage de CO₂. L'intérêt économique pour le sous-sol profond étant historiquement faible en Belgique (hormis le cas des mines de charbon), les lieux de stockage possibles sont peu connus et il règne une grande incertitude à ce propos. Une méthode a dès lors été développée pour obtenir une image des possibilités de stockage en dépit de ces incertitudes. Les résultats ont révélé que du fait de la présence d'une industrie intensive en CO₂, un potentiel existe en tout état de cause en termes de captage, et qu'un potentiel de stockage significatif pourrait également exister, la Campine étant l'emplacement le plus prometteur. Les projets PSS-CCS confirment également l'importance de la CCS dans l'optique d'un éventail équilibré pour la production d'électricité et l'industrie.

La recherche actuelle

Depuis qu'il a été mis fin aux projets PSS-CCS en 2011, les pouvoirs publics n'accordent plus aucun incitant au profit d'un approfondissement de la recherche en matière de CCS en Belgique. Ces recherches constituent néanmoins la base critique d'une poursuite de la recherche au sein du Service géologique de Belgique, qui se poursuit encore et toujours et est même élargie. Un exemple notable à cet

égard est celui de la recherche consacrée aux opportunités commercialement intéressantes pour la CCS, comme l'utilisation de CO₂ pour améliorer la production de produits pétroliers (*CO₂-EOR, récupération assistée du pétrole*). Une fois les méthodes de production traditionnelles épuisées pour un gisement, il est fréquent que plus de la moitié du pétrole soit encore présente dans le sous-sol en raison de différents processus physiques tels que des forces capillaires. Lorsque l'on injecte du CO₂ sous pression dans le réservoir de pétrole, le CO₂ dilue partiellement ce pétrole, ce qui facilite sa production. La place dégagée par le pétrole extrait peut en outre être mise à profit pour stocker d'autres quantités de CO₂. Outre la valeur ajoutée pour la compagnie pétrolière en raison du volume commercialisable supplémentaire, cette technique offre encore d'autres avantages, tels qu'une plus grande sécurité énergétique pour le pétrole de la mer du Nord, sans oublier le fait que les coûts de stockage du CO₂ sont couverts par les revenus pétroliers.

Même si la Belgique ne dispose pas elle-même de champs pétrolifères, la proximité de la mer du Nord offre la possibilité de transporter, d'utiliser et de stocker de manière permanente le CO₂ capturé. L'industrie active autour du port d'Anvers, par exemple, est particulièrement bien adaptée à la fourniture de CO₂ pour des projets de CO₂-EOR de ce type, ce qui permettrait alors de mettre à disposition de l'industrie pétrochimique bien développée dans notre pays du pétrole à teneur relativement faible en CO₂. La recherche actuelle se concentre, entre autres, sur la rentabilité des projets potentiels en mer du Nord, compte tenu de la situation économique et des incertitudes inhérentes aux réservoirs.

Les auteurs

Kris Welkenhuysen et Kris Piessens, Service géologique de Belgique, Direction Opérationnelle Terre et Histoire de la Vie, Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB)

Soutenir les plantations durables en République démocratique du Congo (RDC)

Image SPOT HRV fausses couleurs de la frontière entre la RDC et le Rwanda au nord du lac Kivu. En rouge foncé, la végétation dense délimite les contours du Parc national des Virunga et du Parc national des volcans. © CNES 2010, Distribution Airbus DS

Les écosystèmes forestiers '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, libère ces stocks de carbone et contribue à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc au réchauffement climatique. Plusieurs initiatives s'inscrivent dans une volonté internationale de freiner le déboisement. La recherche en observation de la Terre, notamment au sein du programme STEREO, contribue à ces efforts en permettant le développement d'outils d'estimation et de surveillance plus performants, de l'échelle globale jusqu'au niveau le plus local.

Reboiser la RDC

Le Parc national des Virunga s'étend sur 790 000 ha à l'est de la RDC. Il comprend une chaîne de volcans et une étonnante variété d'habitats qui abritent une biodiversité exceptionnelle. Malgré son inscription au Patrimoine mondial de l'Unesco, la déforestation y est alarmante, due à l'extension des terres agricoles et des pâturages, mais aussi à une intense exploitation illégale du bois. Les familles rurales du Nord-Kivu, fuyant les combats incessants, viennent gonfler la population de la capitale, Goma, qui atteint aujourd'hui 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 %

Le makala est vendu sur les marchés locaux.
© K.Holt/WWF-UK



de ces ressources sont quotidiennement extraites du Parc national voisin. En 2007, le WWF a initié le programme EcoMakala, une filière alternative de production de makala à partir de plantations d'arbres à croissance rapide sur de petites parcelles en périphérie du Parc. Elle offre le double avantage d'améliorer les conditions de vie des paysans planteurs et de préserver les ressources forestières du Parc.

Une carte d'éligibilité pour bénéficier des financements carbone

Les plantations EcoMakala stockent du carbone et réduisent la déforestation du Parc. Elles sont dès lors parfaitement éligibles aux financements carbone prévus par les accords de Kyoto. Mais il faut apporter la preuve que les parcelles répondent aux critères requis. La télédétection, déjà suggérée pour le suivi de grandes parcelles, n'avait jamais encore été utilisée pour déterminer le pourcentage de couverture arborée sur de petites surfaces. Le projet STEREO MORECA a comblé cette lacune. En utilisant des images SPOT à 20 m de résolution et en sélectionnant la méthode de classification la mieux adaptée aux paysages montagneux et fragmentés de l'est de la RDC, l'étude a produit des cartes d'éligibilité qui permettent pour chaque parcelle de calculer les surfaces occupées par le couvert forestier. L'antenne WWF de Goma a ainsi pu fournir les preuves nécessaires à l'octroi des financements pour les plantations EcoMakala. La méthode pourra être reproduite pour étayer des demandes de fonds pour d'autres régions avec des critères d'éligibilité différents.

Les auteurs

Equipe Stereo - BELSPO (Direction Applications aérospatiales)

Plus

Projet MORECA (ULB - UCL - WWF)

<http://eoedu.belspo.be/stereo> > Afrique



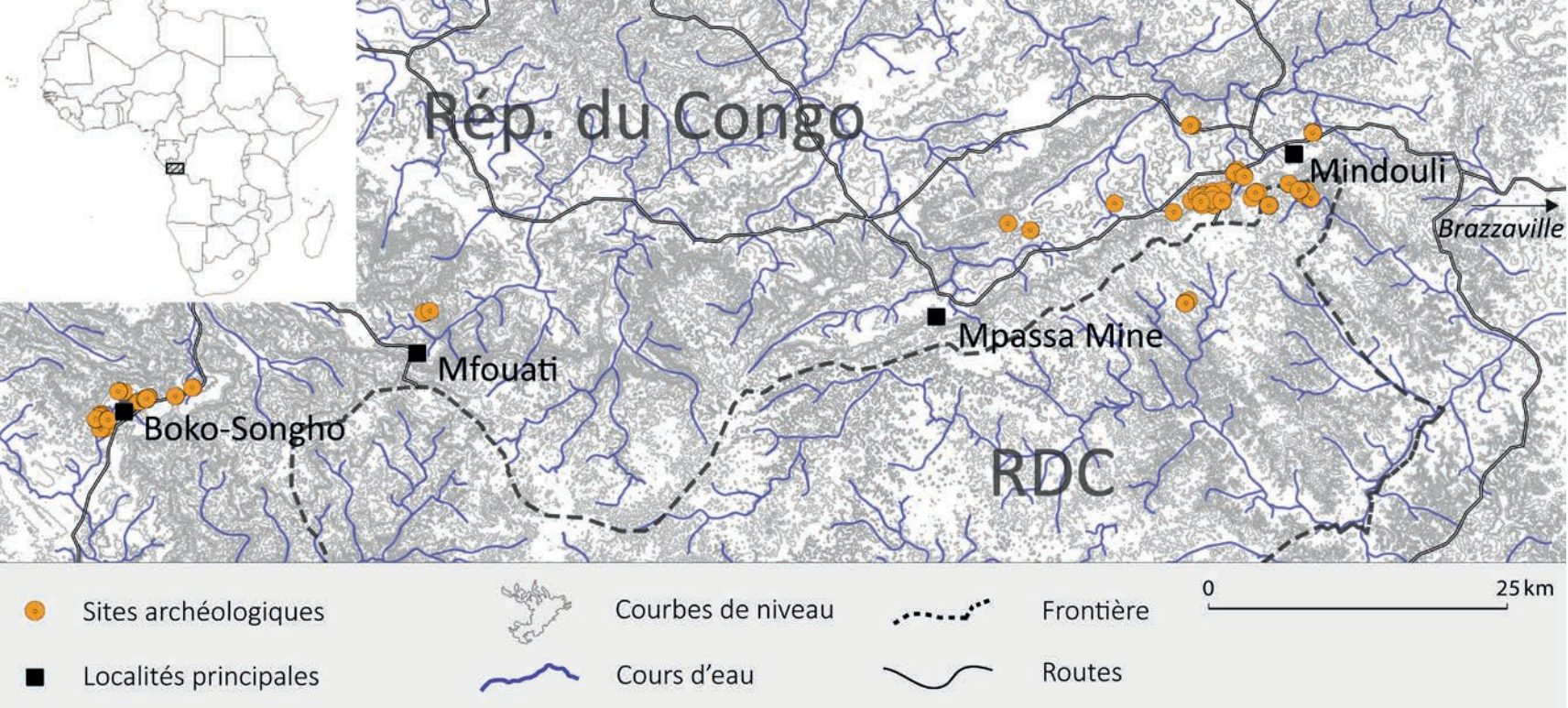


Fig. 1 : Carte de localisation des zones étudiées et des sites de production de cuivre (N. Nikis 2015).

Le cuivre du Niari, une ressource ancienne et prisée

ÉTUDES GÉOLOGIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE DES MINES DE CUIVRE-PLOMB-ZINC DU BASSIN DU NIARI (RÉPUBLIQUE DU CONGO)

Nicolas Nikis et
Thierry De Putter

En collaboration avec l'Université libre de Bruxelles (ULB), le Musée royal de l'Afrique centrale (MRAC) entreprend depuis plusieurs années des recherches archéologiques dans les zones cuprifères du bassin du Niari en République du Congo (fig. 1). Celles-ci sont menées dans le cadre de la thèse de doctorat de Nicolas Nikis sur la production ancienne de cuivre en Afrique centrale. La mission de l'été 2015 a permis d'y joindre le regard du géologue Thierry De Putter, qui s'est intéressé à la formation de ces gisements complexes et relativement méconnus.

Contexte géologique des sites du district de Mindouli

La zone cuprifère du bassin du Niari, ou district minier de Mindouli, est localisée dans le sud de la République du Congo, à environ 150 kilomètres à l'ouest de la capitale, Brazzaville. La région comprend plusieurs gisements – autour de Mindouli, Boko-Songho et Mfouati – qui s'alignent le long d'une falaise, orientée est-nord-est/ouest-sud-ouest (fig. 2). Cette falaise, trait saillant

du paysage (fig. 3), marque la présence d'une série de failles qui séparent des roches anciennes, néoprotozoïques (1000-540 millions d'années), de natures différentes. Les plateaux méridionaux sont constitués de grès fins, tandis que les terrains situés au nord de la faille sont des calcaires algaires (stromatolitiques). Ces derniers ont subi, à une époque ancienne, une importante karstification, matérialisée par la présence de poches de dissolution, de puits naturels et d'un réseau de grottes (endokarst). À une époque encore indéterminée – mais forcément postérieure au dépôt des sédiments les plus récents (grès) – le massif poreux et perméable formé par les grès, les failles et les calcaires karstiques a été parcouru de fluides chauds, hydrothermaux, qui y ont formé des amas de minerais sulfurés de cuivre-plomb-zinc et des brèches à ciment sulfuré. Plus tard, très probablement au cours du Cénozoïque, ces minerais sulfurés ont été soumis à l'action des fluides de surface et se sont oxydés, donnant naissance à une grande diversité de minéraux secondaires (fig. 4) de cuivre, de plomb et de zinc. Le district de Mindouli est d'ailleurs connu des mi-

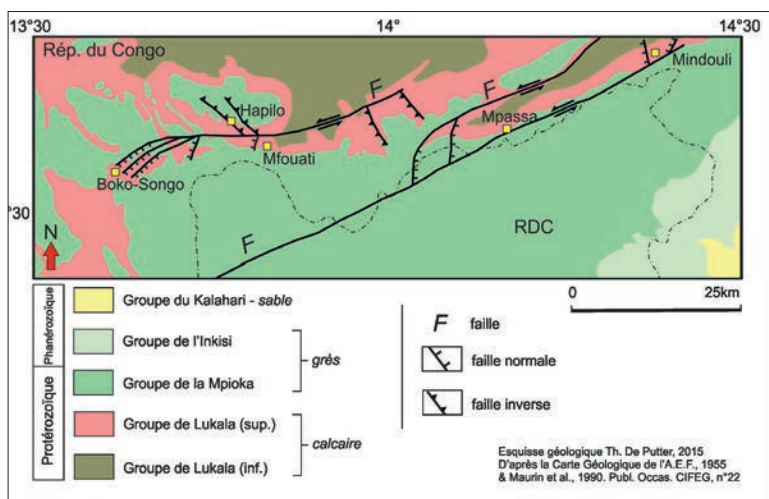


Fig. 2 : Carte géologique de la région de Mindouli, Boko-Songho et Mfouati (Th. De Putter 2015).



Fig. 3 : Vue de la ligne de crête (falaise), orientée est-nord-est/ouest-sud-ouest et constituée de dépôts gréseux, qui domine la région de Mindouli. Au pied de cette déclivité passe une faille (trait tireté rouge) qui met les grès en contact avec des calcaires plus anciens. Cette faille a facilité la mise en place de la minéralisation hydrothermale de cuivre-plomb-zinc (Th. De Putter 2015).

Fig. 4 : En haut: minerai de cuivre constitué de placages de malachite (vert) et d'azurite (bleu), sur une roche fine, argileuse : le minerai doit donc être broyé et la malachite séparée des phases stériles pour produire le métal; gisement de Mindouli, longueur 10 cm. En-dessous: Échantillon de malachite botryoidale; gisement de Boko-Songho, longueur 8cm (Th. De Putter 2015).



néralogistes et collectionneurs pour ses minéraux rares, de cuivre (diopside, planchéite) et de plomb (wulfénite).

Les gisements de Mindouli à travers les âges

Les gisements du district de Mindouli contiennent, comme ceux du Katanga, des quantités significatives de malachite, un carbonate de cuivre. La réduction de la malachite pour obtenir du cuivre métallique est attestée en Afrique centrale depuis la seconde moitié du premier millénaire de notre ère au Katanga (République démocratique du Congo, RDC). Dès cette époque, le cuivre joue, dans l'ensemble de cette immense région, un rôle économique et social important. En effet, qualifié d'or rouge tant son usage était proche de l'or dans d'autres régions du monde, le cuivre était prisé des élites locales. Cependant, les gisements de cuivre sont seulement localisés dans certaines zones de l'Afrique centrale et le métal a fait dès lors l'objet d'un commerce sur de longues distances.

Au cours du 2^{ème} millénaire de notre ère, les gisements du bassin du Niari et ceux de Bembe, au nord-est de l'Angola, ont joué un rôle majeur dans l'approvisionnement en cuivre des différentes entités politiques ayant occupé l'ouest de l'Afrique centrale, comme les royaumes Kongo, Loango ou Teke. Ce commerce est mentionné dans des sources européennes dès le 16^{ème} siècle de notre ère.

Tous les gisements connus actuellement semblent avoir fait l'objet d'une exploitation ancienne (cfr. fig. 1) et les recherches archéologiques de ces dernières années suggèrent une exploitation active dès le début du 14^{ème} siècle de notre ère (fig. 5), dans la région de Mindouli. Des barrettes de cuivre (fig. 6) – une sorte de petits lingots – destinées aux échanges y étaient notamment fabriquées. Certaines céramiques associées au cuivre dans les fouilles attesteraient de liens sur de longues distances. En effet, ces poteries proviendraient de la zone du Pool Malebo (région de Kinshasa et Brazzaville) (fig.

7). Cette période coïncide avec la montée en puissance des pouvoirs régionaux et il semble que des conflits aient pu éclater pour le contrôle des zones riches en ressources telles que le cuivre. La production du cuivre se maintient au cours des siècles suivants. Au 16^{ème} siècle, des sources portugaises rapportent que plusieurs cargaisons de cuivre sont envoyées par le roi Kongo au roi du Portugal tandis qu'au début du 17^{ème} siècle, le métal rouge est un des principaux produits d'exportation, avec l'ivoire et le bois du royaume de Loango, situé sur la côte. Des sites métallurgiques du 15-16^{ème} siècle ont été repérés dans la région de Boko-Songho tandis qu'une série de lieux de fonte des 16^{ème} et 17^{ème} siècles sont attestés dans la région de Mindouli. Malgré la concurrence du laiton européen, importé massivement depuis les comptoirs côtiers, la production de cuivre est encore vivace à la fin du 19^{ème} siècle, quand les autorités coloniales prennent possession des mines et mettent fin à l'exploitation locale. Les sites de cette époque récente sont notamment caractérisés à Mindouli par l'usage abondant de petits creusets, probablement calibrés pour contenir une certaine quantité de cuivre (fig. 8). Le cuivre produit à cette période atteint, sous forme de lingots, des régions aussi éloignées que l'actuel Gabon ou la zone de Mbandaka, au nord-ouest de la RDC. Diverses descriptions ethnographiques de cette même époque décrivent la fabrication du cuivre et complètent les données archéologiques, en nous donnant de précieuses informations sur certains processus techniques complexes, comme des ajouts d'autres métaux ou types de minerai (de plomb, notamment) pour améliorer la réduction. Ces sources ethnographiques nous permettent aujourd'hui de mieux comprendre et interpréter certains vestiges matériels (fig. 9).

L'étude des traces matérielles du travail métallurgique, déchets (scories ou fragments de tuyères, fig. 10) ou restes de fourneaux (fig. 11), nous indique que le travail du cuivre a connu des variations techniques importantes au cours du temps et dans les différentes zones étudiées.

Les gisements de Mindouli ne sont pas isolés sur la face atlantique de l'Afrique...

Les gisements de cuivre-plomb-zinc du district de Mindouli se présentent sous la forme d'un chapelet d'amas minéralisés, le long de failles orientées est-nord-est/ouest-sud-ouest. Cette disposition n'est pas unique dans la région : des alignements de gisements comparables sont connus au Bas-Congo (RDC) et, plus au sud, dans le nord de l'Angola, une zone qui semble aussi avoir été exploitée anciennement. Les gisements du Bas-Congo (notamment Bamba Kilenda) et ceux du Congo-Brazzaville sont désormais activement étudiés au MRAC. Plus au sud, en Namibie, le célèbre gisement de Cu-Pb-Zn de Tsumeb présente lui aussi des similitudes frappantes avec les gisements congolais et angolais. Il est pour l'instant le seul dont la partie superficielle, oxydée (ou supergène) ait été datée du Miocène. L'hypothèse de travail qui est testée au MRAC est



Fig. 5 : Site de production du cuivre daté entre le 14^{ème} et le 15^{ème} s. en cours de fouilles. Les taches sombres (terres rubéfiées, fragments de charbons de bois, de scories et tuyères) correspondent à des zones de travail métallurgique. Région de Mindouli, République du Congo (N. Nikis 2014).

que la phase initiale, hydrothermale et sulfurée, de tous ces gisements serait liée à la réactivation de réseaux de failles anciennes, orientées est-ouest, lors de l'ouverture de l'océan Atlantique au Mésozoïque (il y a environ 150 millions d'années). Les circulations de fluides hydrothermaux associées à ces réactivations auraient conduit à la formation de dépôts de cuivre-plomb-zinc assez comparables en divers endroits de la face atlantique de l'Afrique méridionale, la première à s'être séparée de l'Amérique. Les minéralisations supergènes, elles, se sont formées – en Namibie comme en RDC – beaucoup plus tard, au Miocène, à la faveur de grands aplanissements régionaux, à l'échelle continentale.

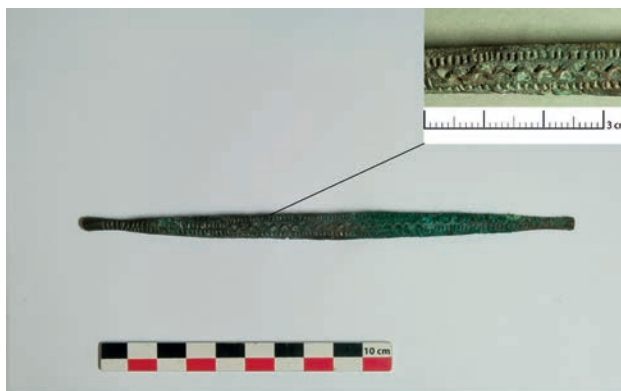


Fig. 6 : Barette de cuivre (13-14^{ème} s.) destinée aux échanges provenant de la région de Mindouli (N. Nikis 2013).



Fig. 7 : Tesson de céramique (13-14^{ème} s.) découvert dans la région de Mindouli. Probablement originaire de la région du Pool Malebo, il atteste de liens commerciaux entre les deux régions (N. Nikis 2014).



Fig. 8: Petit creuset (19^{ème} s.) utilisé pour la fonte du cuivre. Région de Mindouli (N. Nikis 2014).

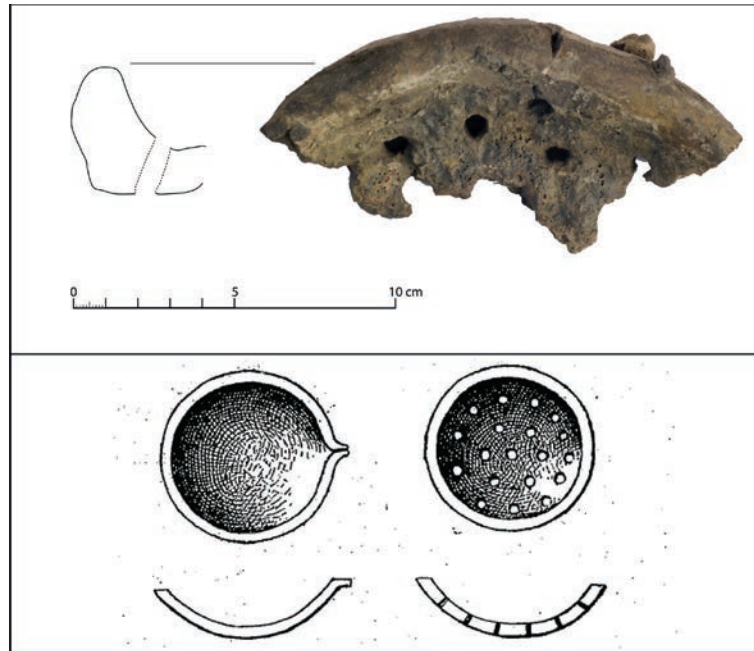


Fig. 9 : Terre cuite perforée (19^{ème} s.) découverte dans la région de Boko-Songho (en haut) et représentation du même outil (sans échelle) dans un texte du 19^{ème} s. (en bas), permettant une interprétation des vestiges archéologiques (N. Nikis 2014 et Pleigneur 1888).

Gisements de cuivre et archéoméallurgie en Afrique (projet Brain.be EACoM)

L'étude pluridisciplinaire des gisements de métaux de base permet un enrichissement mutuel des approches de chaque discipline. Le géologue prête une attention plus grande qu'il ne le ferait habituellement aux traits du paysage, à la présence et à l'accessibilité probable des minerais dans un environnement préindustriel, à la nature des résidus minéraux sur les sites archéologiques. Ces résidus sont en effet le résultat d'une soustraction du minerai utile (malachite), laissant les seuls produits inutilisables (silicates ou autres) ; la somme des composants, résiduels et disparus, donne une idée assez précise du type d'assemblage minéral à rechercher dans les mines voisines. L'archéologue pour sa part a une vision plus claire des stratégies d'approvisionnement des anciens fondeurs ainsi que des minerais privilégiés pour la fabrication du métal.

Le géologue et l'archéologue font face à un challenge commun, de sourcing et de traçabilité des minerais utilisés dans la métallurgie précoloniale. Une malachite du Katanga ressemble évidemment à une malachite de Mindouli mais il est utile de caractériser ces minerais de façon précise (composition chimique et isotopique) de manière à pouvoir 'tracer', lors de l'analyse des artefacts en cuivre, les caractéristiques spécifiques des minerais d'origine. On pourra ainsi, à terme, retracer plus précisément l'origine des métaux découverts en contexte archéologique, hors des zones de production, et identifier les aires de diffusion respectives des différents gisements au cours du temps. Ce genre d'information est extrêmement utile pour reconstituer les réseaux économiques anciens.



Fig. 11 : Fourneau pour la production de cuivre. Vue en plan avant la fouille (haut) et en coupe de la structure en cours d'étude (bas) (N. Nikis 2015).

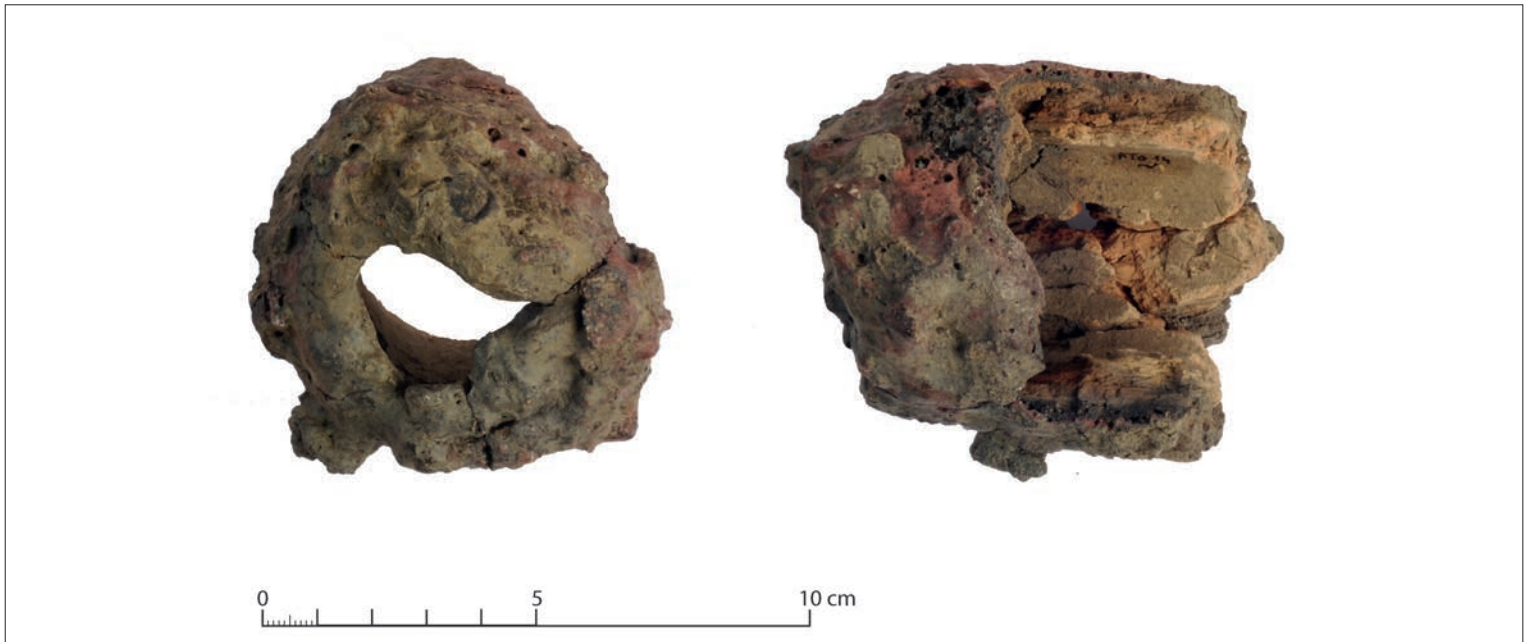


Fig. 10 : Exemple de tuyère (objet utilisé pour amener l'air lors de la réduction du minerai) découvert sur un site du 19^{ème} s. Des empreintes de support autour duquel elle a été moulée sont encore visibles sur l'argile de la face interne (N. Nikis 2014).

Dans la mesure où il regroupe à la fois des archéologues et des naturalistes, le Musée royal de l'Afrique centrale est incontestablement un institut privilégié pour le développement de telles approches pluridisciplinaires, géo-archéologiques et archéométriques. Notre étude des mines de cuivre-plomb-zinc du district de Mindouli donne un exemple concret de cet atout unique du MRAC. Ce potentiel est valorisé notamment dans le projet Brain.be EACoM (*Egyptian and African Copper Metallurgy*) qui, sous la houlette de Luc Delvaux (Musées royaux d'Art et d'Histoire), regroupe des experts des MRAH, du MRAC, de la KU Leuven et de l'Université libre de Bruxelles autour de la thématique de la métallurgie du cuivre, en Égypte pharaonique et en Afrique centrale, à l'époque précoloniale. Ce projet novateur veut replacer les objets liés à la métallurgie du cuivre des collections des deux musées au sein de la chaîne opératoire de fabrication. L'objectif, avec cette contextualisation des objets, est de valoriser les aspects techniques de la fabrication, souvent méconnus, en faisant intervenir plusieurs disciplines.

Par ailleurs, une collaboration avec le projet ERC *KongoKing* (European Research Council Starting Grant No. 284126 accordé à Koen Bostoen) permet de replacer la production du cuivre dans un contexte historique régional et d'explorer les liens entre le bassin du Niari et le royaume Kongo.

Les auteurs

Thierry De Putter est géologue et chef du service de Géodynamique et Ressources minérales au Musée royal de l'Afrique centrale. Il s'intéresse à la formation des gisements minéraux et à l'utilisation/exploitation des ressources minérales, que ce soit dans l'Antiquité (Égypte, Rome) ou dans des périodes plus récentes, en Afrique (cuivre précolonial, minerais de conflit).

Nicolas Nikis est aspirant du F.RS./FNRS, rattaché au CReA-Patrimoine de l'Université libre de Bruxelles et chercheur associé du service Patrimoines, Musée royal de l'Afrique centrale. Ses recherches sur le cuivre portent à la fois sur les aspects de production et sur les routes de diffusion.

Plus

<http://www.kongoking.org/>
<http://eacom.be>



CC GotCredit 2.0

Inégalités sociales de mortalité en Belgique

De multiples dimensions, de multiples causes

De nombreuses études, menées notamment en Belgique, révèlent l'association négative entre la situation socioéconomique et la mortalité. Une augmentation des inégalités de santé et de mortalité est en outre observée en Belgique ainsi que dans de nombreux pays européens. Le projet Causineq¹ financé par BELSPO dans le cadre du programme BRAIN-be (voir encadré) étudie les mécanismes qui produisent les différences sociales de mortalité et de santé en se concentrant sur les différentes dimensions de la position socioéconomique, leurs effets additifs et interactifs, et en effectuant une analyse détaillée des causes de mortalité. L'identification de ces mécanismes constitue un appui fondamental à la mise en place d'une politique 'health for all' efficace, tant aux plans national que régional.

Dans le contexte actuel d'une dé-standardisation accrue des parcours de vie (diversification et fragilisation), l'accroissement des inégalités sociales de santé et de mortalité serait au moins en partie lié à l'instabilité des carrières professionnelles et des parcours familiaux. Afin de réaliser les objectifs de l'étude, quatre 'Work Packages' (WP) sont distingués. Le WP1 analyse l'évolution à long terme, entre 1970 et 2011, des inégalités sociales de mortalité en se basant sur le couplage des données issues des recensements et du Registre national. Le WP2 envisage le rôle sur la mortalité (générale et

par cause) de l'instabilité de la carrière professionnelle, avec une attention particulière accordée aux périodes de chômage. Le WP3 étudie les relations entre l'évolution des situations matrimoniales ainsi que familiales et la mortalité générale et par cause. Les analyses du WP4, compléments de celles des WP3 et 4, portent sur la santé plutôt que sur la mortalité et vérifient principalement les relations entre la mauvaise santé et les conditions d'emploi ou le type de famille.

Le lecteur trouvera ci-après un aperçu des résultats dans chacun des quatre WP à mi-parcours du projet.

Le programme BRAIN-be (Belgian Research Action through Interdisciplinary Network) est un programme-cadre de recherche en réseau multidisciplinaire mis en œuvre par BELSPO en 2012. Il est composé de 6 axes thématiques et de projets pionniers portant sur l'étude du vivant et de l'univers en passant par de la recherche stratégique en soutien aux politiques fédérales, l'étude du patrimoine culturel, historique et scientifique et la gestion des collections. Actuellement, 125 projets de recherches ont été financés. Pour en savoir plus : www.belspo.be/brain-be

WP1. L'évolution des inégalités sociales de mortalité en Belgique : un cadre général

Les analyses du WP1 reposent sur une base de données résultant du couplage des données du Registre national et des recensements de la population et des bulletins de décès de l'état civil.

Des inégalités de mortalité entre groupes sociaux très importantes !

Dans la littérature, le positionnement des individus dans le continuum social est généralement déterminé par les quatre dimensions suivantes : le niveau d'instruction, le statut socio-professionnel, les conditions de logement et le revenu. Si la corrélation entre ces dimensions est élevée, elles peuvent exercer une influence variable sur la vie des individus. Par exemple, en matière d'état de santé et de mortalité, le niveau d'instruction, mesure du niveau de connaissance et du capital culturel, va davantage déterminer les attitudes de prévention, de décisions et de recours aux soins de santé, alors que les trois autres dimensions se réfèrent plus au niveau de vie et donc aux ressources matérielles et à l'accessibilité financière en matière de soins de santé. En définitive, c'est bien une combinaison des quatre dimensions qui influence le positionnement des individus dans le continuum social.

Sur base des données des recensements de 1991 et de 2001, un indicateur composite, basé sur les quatre dimensions, a permis d'établir une typologie du positionnement social des individus, initialement structurée en 16 groupes, ramenée pour les analyses à quatre groupes sociaux, du moins au plus défavorisés. Chacun reprend approximativement un quart des individus pour lesquels les données nécessaires étaient disponibles. Les individus pour lesquels il a été impossible de déterminer le groupe social ont été regroupés dans la catégorie des indéterminés.

En 2002-2006, tant du côté des hommes que des femmes, la mortalité varie bien en fonction du groupe social. Plus le groupe social est défavorisé, plus son espérance de vie, quel que soit l'âge considéré, sera faible (tableau 1). Les écarts absolus d'espérance de vie sont importants : à 25 ans, l'espérance de vie d'un homme du groupe social favorisé vaut 57,5 ans contre 48 ans pour son homologue du groupe défavorisé, soit une différence de près de 10 ans. Du côté des femmes, les inégalités sociales de mortalité sont moins marquées : à 25 ans, l'écart d'espérance de vie est seulement de 5 ans entre les groupes sociaux extrêmes.

Par ailleurs, les différences de mortalité entre les deux sexes varient fortement selon le groupe social : plus le groupe est défavorisé, plus la différence est importante. A 25 ans, pour le groupe social défavorisé, cet écart s'élève à plus de 8 années, alors qu'il n'est que de 3,5 ans pour le groupe social favorisé.

Tableau 1. Espérance de vie masculine et féminine selon le groupe social en années (Belgique 2002-2006)

Groupes sociaux	Hommes					Femmes				
	5 ans	25 ans	45 ans	65 ans	80 ans	5 ans	25 ans	45 ans	65 ans	80 ans
Défavorisé	67,49	48,10	30,24	15,84	7,08	75,88	56,19	37,22	20,28	9,39
Intermédiaire bas	72,01	52,58	34,01	17,58	7,63	78,71	58,96	39,64	21,73	9,88
Intermédiaire haut	75,11	55,71	36,68	19,12	8,52	80,64	60,86	41,36	22,90	10,68
Favorisé	77,15	57,50	38,06	20,09	8,88	80,83	61,00	41,39	22,82	11,18
Indéterminés	68,12	48,68	30,00	14,62	6,23	74,59	54,87	35,66	18,46	7,72
Total	71,29	51,80	32,93	16,36	7,06	77,06	57,30	37,92	20,12	8,82

Source : DGS-Registre national, ESE 2001.

Tendances récentes des inégalités de mortalité entre groupes sociaux

Entre 1992-96 et 2002-06, la différence d'espérance de vie à 25 ans, entre les groupes situés aux extrémités du continuum social, a augmenté de 7,7 ans à 9,4 ans chez



cc edanley - SA 2.0

les hommes et de 4,2 à 4,8 ans chez les femmes. Il y a donc bien un accroissement des disparités de mortalité, en particulier chez les hommes. En cause, des progrès d'espérance de vie à des rythmes variables : en bas de l'échelle sociale, les gains ont été de 2,4 ans chez les hommes et de 1,3 années chez les femmes, alors qu'au sommet de la pyramide sociale, plus de 4 années d'espérance de vie ont été gagnées par les hommes et 2,5 années par les femmes.

Dans la suite du projet, il est prévu, d'une part, d'intégrer les causes de décès aux analyses, notamment afin de mieux cerner les différences régionales et, d'autre part, d'étendre la période d'analyse (1970-2010, voire même au-delà de 2010).

WP2. Les inégalités sociales de mortalité par cause selon le statut d'emploi et les parcours professionnels

Le WP2 se concentre plus particulièrement sur l'association entre le chômage et la mortalité. Au cours des dernières décennies, le taux de chômage a connu une forte augmentation ; le chômage de longue durée devient de plus en plus fréquent et les personnes ayant une formation supérieure sont également touchées par le chômage. L'association entre le chômage et la mortalité a été confirmée par des études internationales, mais cette donnée n'a jusqu'à présent pas encore été étudiée en Belgique, malgré la disponibilité de données.

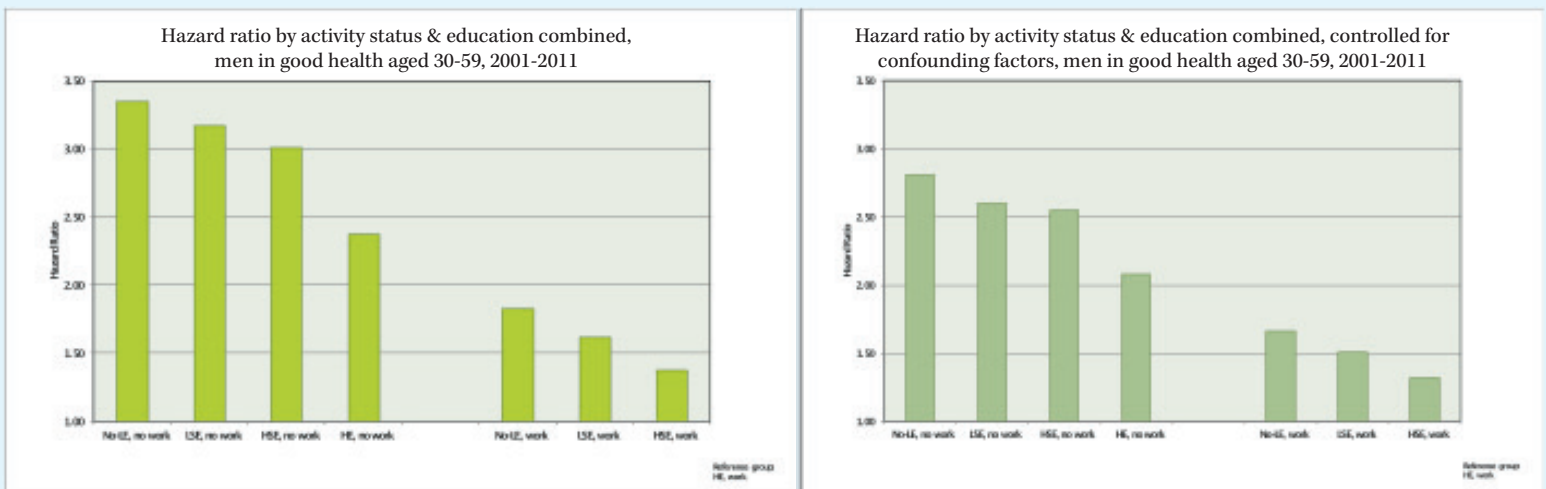
Avec le couplage des données du recensement de 2001, du Registre national relatives à la mortalité (et à l'émigration) au cours de la période 2001-2011, ainsi que des certificats de décès, ce WP vérifie s'il existe un lien entre le chômage et la mortalité et si une formation supérieure présente un effet protecteur à l'égard de l'impact du chômage sur la santé. Afin d'exclure les effets de sé-

lection, différents sous-groupes ont été délimités parmi les hommes de 30-59 ans. Les effets de la sélection sont une importante source de biais dans l'analyse des effets du chômage sur la santé, parce qu'un certain nombre de personnes perdent précisément leur emploi en raison de problèmes de santé. Afin de minimiser de tels effets de sélection, un contrôle a été réalisé quant au statut de santé des répondants au moment du recensement (2001) et l'analyse a été limitée aux demandeurs d'emploi et aux travailleurs. D'autres groupes, comme des personnes n'ayant jamais travaillé, des personnes ne travaillant pas pour des raisons familiales, sociales ou de santé et les pensionnés, n'ont pas été repris dans les analyses. Les risques de mortalité, calculés pour cette population sélectionnée, se sont révélés relativement stables dans le temps (2001-2011), ce qui indique la mise sous contrôle des effets de la sélection.

Les résultats montrent que les chômeurs, même ceux ayant un niveau de formation élevé et un logement de qualité, ont un risque de mortalité plus grand que les personnes ayant un travail. En général, les hommes sans emploi présentent un chiffre de mortalité deux fois supérieur aux hommes qui travaillent. En prenant en compte les facteurs de contrôle comme la formation, le logement, la nationalité et le type de famille, cette surmortalité se maintient.

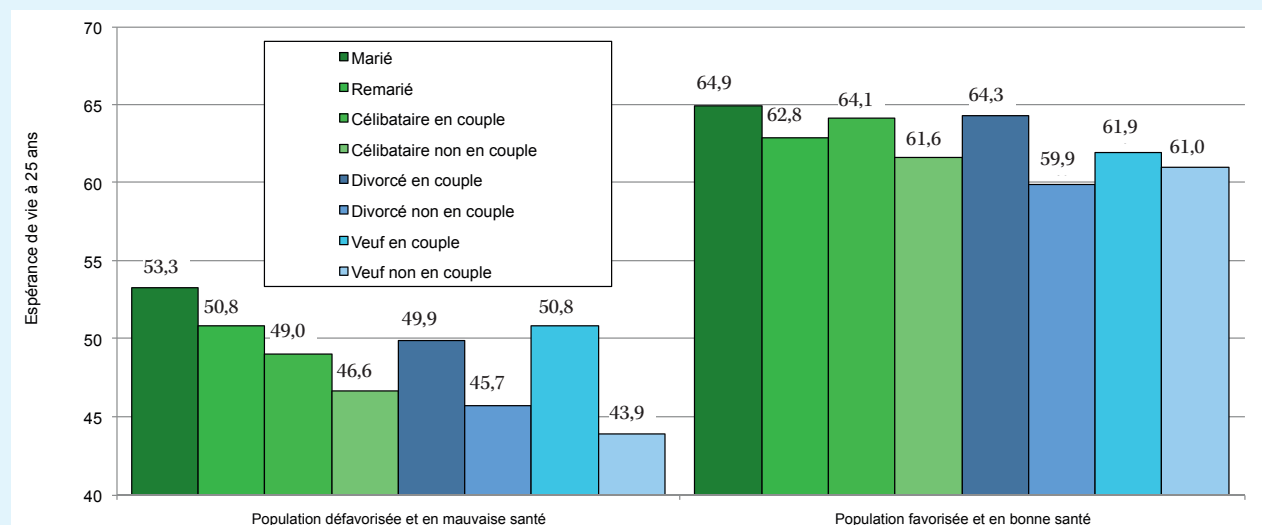
La formation exerce un effet légèrement protecteur : les chômeurs ayant une formation supérieure présentent un risque de mortalité un peu inférieur aux chômeurs de formation inférieure (figure 1). Cela vaut surtout pour la population d'origine belge, mais pas pour les ressortissants des communautés turque et marocaine, par exemple. Il est toutefois frappant de constater que les chômeurs possédant un diplôme de l'enseignement

Figure 1 : Taux de mortalité relatifs selon le statut d'emploi et la formation combinés, avant et après contrôle du logement, de la nationalité et du type de famille, hommes en bonne santé de 30-59 ans, 2001-2001



Source : Recensement 2001, couplé aux informations du Registre national sur la mortalité et la cause de décès, dépouillements propres

Figure 2. Espérance de vie masculine à 25 ans selon le statut matrimonial et le type de ménage (2002-2006)



Source: DGS- Registre national, ESE 2001

supérieur présentent une mortalité supérieure à celle des travailleurs sans diplôme ou ayant un diplôme de l'enseignement primaire.

Lorsque les analyses sont stratifiées selon le niveau de formation, il ressort que l'écart de mortalité entre chômeurs et travailleurs est plus grand chez les personnes ayant une formation supérieure. Cela confirme l'hypothèse du *'disappointment paradox'*: les attentes plus élevées de la personne de formation supérieure accentuent l'impact du chômage par rapport aux personnes de formation inférieure. D'autre part, les différences de conditions de travail font en sorte que les personnes ayant une formation supérieure exercent un travail plus sain que les personnes de formation inférieure, ce qui engendre également une plus grande différence entre travailleurs et chômeurs toujours au profit des personnes de formation supérieure.

Une analyse de la mortalité par cause démontre que l'excédent de mortalité s'applique pour tous les grands groupes de causes. Les plus grandes différences relatives sont observées pour la mortalité liée à l'alcool. Cette cause ne représente toutefois qu'un petit pourcentage de la mortalité totale.

Il ressort d'une comparaison du statut d'emploi aux recensements de 1991 et de 2001 que les personnes sans travail aux deux moments présentent une mortalité sensiblement supérieure à celles qui exerçaient une profession à l'un des deux ou aux deux moments.

Dans la suite du projet, l'impact de la durée du chômage sur la mortalité sera étudié plus en profondeur au moyen des données de la Banque carrefour de la sécu-

rité sociale ainsi que les différences de mortalité entre les employeurs à temps plein et les employeurs à temps partiels.

WP3. La contribution des trajectoires familiales et matrimoniales aux inégalités de mortalité par cause de décès

Le WP3 étudie l'association entre le type de famille, l'état matrimonial et la mortalité. Pour les analyses qui vont suivre, les individus seront répartis selon :

- le statut matrimonial selon que les individus vivent en couple ou pas (Registre national) ;
- la santé autoévaluée (recensement 2001) ;
- Le niveau socioéconomique selon les groupes présentés dans les commentaires du WP1.

Les mariés vivent plus longtemps que les non-mariés !

Comme le montre la figure 2, le contraste en matière d'espérance de vie est mieux marqué pour le groupe socialement défavorisé et en mauvaise santé. Aussi, les commentaires qui vont suivre porteront principalement sur ce groupe. Bien que plus ténues, les différences observées dans la population favorisée et en bonne santé nous amènent aux mêmes conclusions.

La catégorie des mariés se distingue par l'espérance de vie maximale. Par ailleurs, au sein des autres catégories, vivre en couple procure un avantage en matière d'espérance de vie. Ainsi, chez les veufs, la remise en couple (hors mariage) augmente l'espérance de vie de 6,9 ans; chez les divorcés de 4,2 ans et de 2,4 ans chez les célibataires.

Différentes explications sont avancées pour rendre compte de ces inégalités. Ainsi, à propos de l'espérance de vie la plus élevée affichée par les mariés, il semble



CC aloxe-SA 2.0

exister un effet de sélection au mariage, évènement pour lequel seraient sélectionnés les individus en bonne santé physique et mentale, et présentant un niveau socio économique plus élevé. Ensuite, le mariage procurerait une protection financière, par la mise en commun des biens des mariés et la réalisation d'économies d'échelles au sein du couple, ainsi qu'une protection sociale, par le support et le contrôle social que représenterait le conjoint. De même, la présence du conjoint permettrait d'atténuer le stress quotidien. En revanche, le divorce et le décès du conjoint seraient des évènements traumatisants qui influenceraient la santé des individus concernés.

Les écarts soulignés au sein des autres statuts sont au bénéfice de ceux qui vivent en couple et s'expliqueraient par les mêmes processus sociaux que ceux évoqués à propos de la dichotomie mariés/non-mariés. Par ailleurs, les différences entre cohabitants et mariés proviendraient de la cohésion plus forte qui existe entre les époux, qui diminue les risques de séparation et intensifie les effets de protection de la vie en couple. Ainsi, chez les plus défavorisés, l'espérance de vie des mariés est supérieure de 4,3 ans à celle des célibataires en couple, de 3,4 ans à celle des divorcés en couple et de 2,5 ans à celle des veufs en couple.

Une analyse par régression de Poisson a confirmé ces résultats. Par exemple, la présence d'un conjoint, marié ou cohabitant, diminue fortement les risques de décès, ce qui n'empêche pas la mortalité des non-mariés vivant

en couple d'être plus élevée à niveaux socioéconomique et de santé équivalents que celle des mariés.

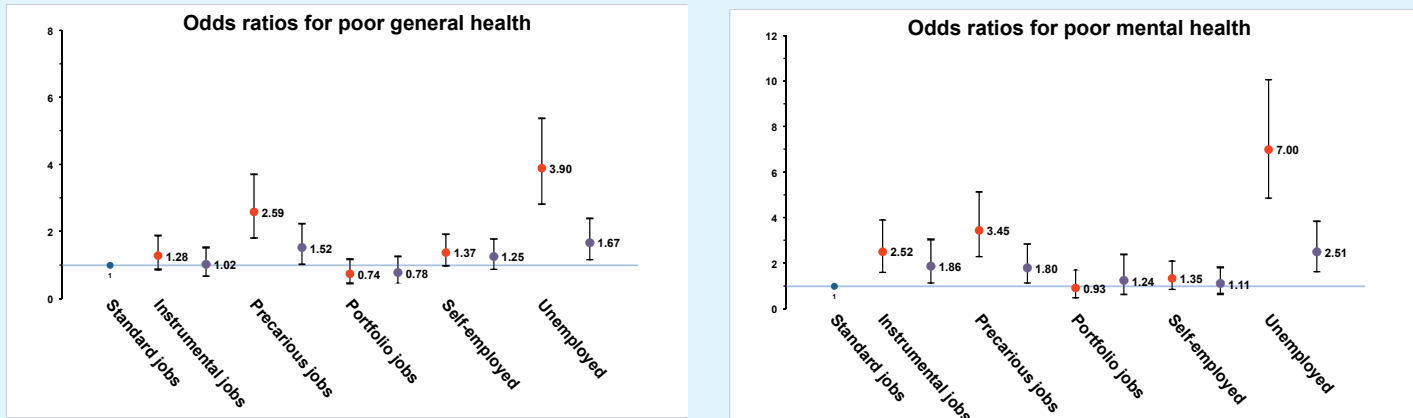
Dans le futur, ces analyses seront enrichies en prenant en compte les causes de décès. Par ailleurs, à plus longue échéance, nous adopterons une approche longitudinale d'analyse des inégalités.

WP4. L'interaction entre statut d'emploi et type de famille : associations avec la santé dans les données d'enquête

Le WP4 a pour objectif d'analyser les relations entre la santé (mentale et générale) autoévaluée et la position sur le marché du travail ainsi que la situation du ménage. Ces relations sont le siège de mécanismes importants dans la formation et le maintien d'inégalités sociales en matière de santé, comme il en ressort des WP2 et WP3. Une étude récente montre que, non seulement des formes différentes d'inactivité sur le marché du travail, mais aussi certaines formes de travail précaires, sont associées à des problèmes de santé. Le ménage est également important, en tant qu'environnement de vie et unité de consommation. Dans le WP4, ces deux éléments de la vie des individus sont abordés à la fois séparément et conjointement en relation avec la santé. Nous voulons ainsi étudier comment la précarité sociale et celle par rapport au travail sont liées entre elles et avec la santé des individus. Pour ce faire, des données d'enquête provenant de la 'Generations and Gender Survey' (GGs) sont utilisées.

Sur la base des variables en rapport avec la position sur

Figure 3 : La relation entre une typologie de positions sur le marché du travail et un mauvais état de santé mentale (à gauche) ou générale (à droite)



Source : GGS, dépouillements propres

le marché du travail de GGS (type de contrat, revenu, avantages extralégaux, temps de travail flexible pour raisons personnelles, temps de travail exceptionnels, travail à temps partiel involontaire, heures de travail prolongées, heures de travail irrégulières et possibilités de formation), une analyse de classes latentes a été réalisée, afin d'établir une typologie des positions sur le marché du travail. Cette typologie comprend cinq positions d'activité (emplois standard, emplois instrumentaux, emplois précaires, emplois portefeuilles et travail indépendant) et deux positions d'inactivité sur le marché du travail (chômage et autres formes d'inactivité sur le marché du travail). Chacune de ces positions sur le marché du travail s'avère fortement liée à certaines caractéristiques sociodémographiques des individus.

Ensuite, nous analysons la relation entre les positions sur le marché du travail et la santé mentale et générale des individus, par le biais de régressions logistiques binaires (voir la figure 3).

Ces analyses révèlent que certaines positions sur le marché du travail sont fortement associées à un état de santé désavantageux. Il s'agit surtout des positions d'inactivité sur le marché du travail, mais l'emploi précaire est également caractérisé par une fréquence relativement élevée de problèmes de santé. Étant donné qu'il y a aussi une relation nette entre les indicateurs de précarité sociale et la santé (mentale et générale), dans une dernière étape, nous avons réalisé une régression incluant la situation financière et les conditions de vie matérielle du ménage, ainsi que le soutien social sur lequel l'individu peut compter. L'intégration de ces indicateurs de précarité sociale entraîne une relation moins forte entre la typologie des positions sur le marché du travail et les indicateurs de santé mais, de manière générale, elle demeure statistiquement significative. Il est également intéressant de noter que les différences entre

les positions d'inactivité et précaires sur le marché du travail se réduisent par le contrôle de la précarité sociale. Ainsi, le type d'emploi précaire dans le modèle final présente un niveau similaire de mauvaise santé (mentale et générale) à celui des chômeurs.

En conclusion, les résultats soulignent d'abord et avant tout l'importance des facteurs liés au marché du travail et à la précarité sociale pour la santé autoévaluée des individus. Il existe une corrélation claire entre les différentes positions sur le marché du travail et les indicateurs de situation de ménage d'une part et l'état de santé mentale/générale d'autre part. Les personnes inactives et les personnes ayant un emploi précaire évoquent plus souvent des problèmes de santé.

Ces analyses seront affinées par l'exploitation des données issues de l'enquête sur la main-d'œuvre.

Les auteurs

Interface Demography (Vrije Universiteit Brussel) : Sylvie Gadeyne (professeur), Karen Van Aerden (junior research associate), Christophe Vanroelen (professeur) et Didier Willaert (chercheur).

Centre de Recherche en Démographie (Université Catholique de Louvain) :

Thierry Eggerickx (professeur), Catherine Gourbin (professeur), Paul Majerus (chercheur), Bruno Masquelier (professeur), Jean-Paul Sanderson (chercheur) et Christophe Vandeschrick (chercheur).

Plus

www.causineq.be



Voici comment un Dream Chaser équipé d'un module cargo sera arrimé à l'ISS.
© Sierra Nevada Corporation

Une touche belge sur le nouveau vaisseau ravitailleur de l'espace

En plus des deux cargos spatiaux sélectionnés par la NASA, l'agence spatiale américaine, la petite navette spatiale *Dream Chaser* a été également retenue pour ravitailler la station spatiale internationale ISS entre 2019 et 2024. Cette décision n'est pas sans conséquences positives pour notre pays.

Le Dream Chaser n'avait pas été sélectionné pour transporter des astronautes vers l'ISS, mais la société américaine Sierra Nevada Corporation (SNC) ne s'est pas laissée décourager et a décidé de poursuivre le développement du vaisseau spatial entamé dix ans auparavant. Avec succès, car le Dream Chaser dans sa version automatisée va maintenant pouvoir transporter à partir de 2019, et à au moins six reprises, jusqu'à 5500 kg de cargo vers l'ISS.



Ses ailes repliables permettent au Dream Chaser d'être lancé vers l'espace en prenant place sous la coiffe d'une fusée traditionnelle. A l'issue d'une mission, le vaisseau spatial de 9 m de long revient se poser sur une piste d'atterrissage, exactement comme l'a fait entre 1981 et 2001 sa grande sœur – elle était quatre fois plus grande ! – la navette spatiale. Ceci offrira la possibilité aux scientifiques d'avoir accès à leurs expériences en quelques heures seulement.

L'agence spatiale européenne (ESA) se montre d'ores et déjà enthousiaste sur le fait que le Dream Chaser sera mis en service pour le ravitaillement de l'ISS car elle est elle-même intéressée par les possibilités qu'offre la mini navette spatiale. L'ESA et Sierra Nevada Corporation (SNC) ont signé il y a deux ans un accord afin d'étudier comment du matériel, du logiciel et du savoir-faire européens pourraient être utilisés afin d'augmenter encore davantage les possibilités offertes par le Dream Chaser.

Vue d'un Dream Chaser avec les ailes repliées sous la coiffe d'une fusée Atlas V.
© Sierra Nevada Corporation

Ceci est particulièrement intéressant pour l'ESA et son *International Berthing Docking Mechanism* (IBDM), un système avancé permettant un arrimage 'en douceur' des différents vaisseaux spatiaux à l'ISS. Ce système absorbe tous les mouvements relatifs et minimise l'impact entre la station et le vaisseau. La société QinetiQ Space, basée à Kruibeke, près d'Anvers, joue un rôle particulier dans ce projet car c'est sous sa houlette qu'ont lieu les travaux de développement de l'IBDM. Ces activités cadrent dans un contrat de plusieurs millions d'euros. L'année dernière, toute une équipe de QinetiQ – normalement basée en Belgique – s'est rendue au Johnson Space Center de Houston pour y conduire une campagne de tests très poussés de l'IBDM, campagne qui s'est conclue avec succès.

L'arrière du Dream Chaser serait ainsi équipé d'un tel système afin de l'amarrer à l'ISS. Il est prévu que les Américains reçoivent un prototype de l'IBDM, mais que les exemplaires suivants soient achetés sur une base commerciale.

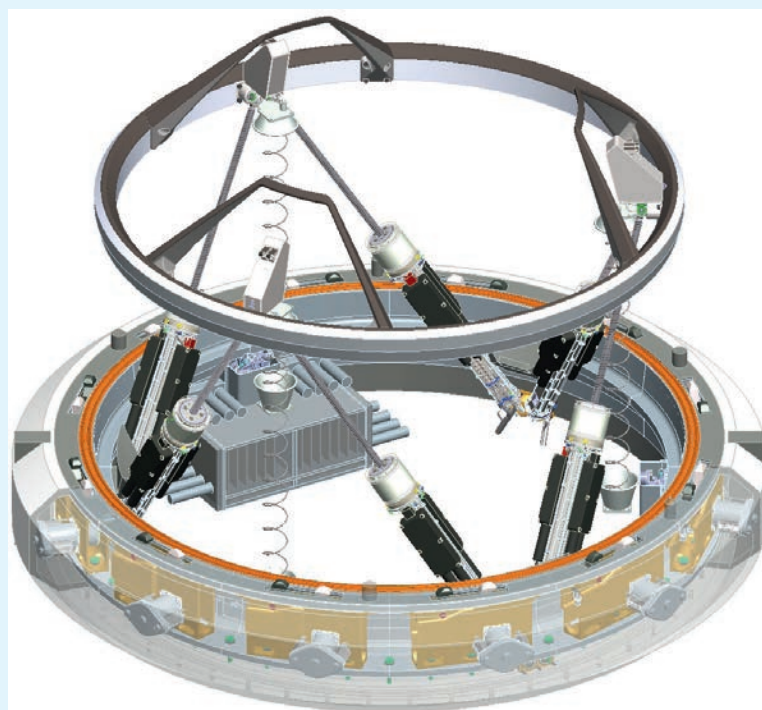
La NASA – l'agence spatiale américaine – a passé en 2008 deux contrats sur une base commerciale pour l'approvisionnement de l'ISS à l'aide de vaisseaux inhabités. Le véhicule cargo *Dragon* de la société SpaceX a réalisé un premier vol en 2010 et vole depuis 2012 vers l'ISS. La société Orbital ATK (anciennement Orbital Sciences) a quant à elle développé le vaisseau *Cygnus*. Ce dernier opère depuis 2013 vers la station spatiale internationale.

A partir de l'année prochaine, les Américains feront également appel au secteur privé pour le transport d'équipages vers l'ISS grâce au *CST-100 Starliner* développé par Boeing et au *Dragon V2 (Crew Dragon)*, une version habitée de la capsule cargo automatisée de SpaceX. La société Sierra Nevada Corporation (SNC) était également dans la course avec sa mini-navette *Dream Chaser* pour les missions spatiales commerciales habitées vers l'ISS, mais Boeing et SpaceX lui ont finalement été préférées.

Début 2016, la NASA a prolongé les contrats pour les missions automatiques de ravitaillement de l'ISS entre 2019 et 2024 avec les vaisseaux *Dragon* et *Cygnus* et y a cette fois bien ajouté le *Dream Chaser Cargo System*.
(source ESA)



Tout comme la navette spatiale, le Dream Chaser pourra revenir se poser sur une piste d'atterrissage. © Sierra Nevada Corporation



L'International Berthing and Docking Mechanism (IBDM). © QinetiQ

Science Connection souhaite connaître votre avis pour répondre encore mieux à vos attentes.
Nous vous demandons de consacrer un peu de temps pour répondre à quelques questions.

www.scienceconnection.be/enquete

SCIENCE CONNECTION

est le magazine gratuit de la Politique scientifique fédérale (Belspo)

Editeur responsable :

René Delcourt
Avenue Louise, 231
B-1050 Bruxelles

Coordination :

Patrick Ribouville
scienceconnection@belspo.be
www.scienceconnection.be

Ont collaboré à ce numéro :

Les auteurs des contributions du dossier climat peuvent être contactés via Emmanuèle Bourgeois (Politique scientifique fédérale - emmanuele.bourgeois@belspo.be) qui a coordonné ce dossier.

Pour l'Interface Demography-VUB: Sylvie Gadeyne, Karen Van Aerden, Christophe Vanroelen et Didier Willaert.

Pour le Centre de Recherche en Démographie-UCL: Thierry Eggerickx, Catherine Gourbin, Paul Majérus, Bruno Masquelier, Jean-Paul Sanderson et Christophe Vandeschrick.

Laurence Burnotte (Politique scientifique fédérale), David Cox (Politique scientifique fédérale), Thierry De Putter (Musée royal de l'Afrique centrale), Ria D'Haemers (Politique scientifique fédérale), Jacques Lust (Politique scientifique fédérale), Nicolas Nikis (ULB/Musée royal de l'Afrique centrale) et Patrick Ribouville (Politique scientifique fédérale).

Les auteurs sont responsables du contenu de leur contribution.

Photo de couverture Greta De Buel

Tirage :

13.000 exemplaires en français et en néerlandais.

Abonnement :

www.scienceconnection.be

Tous les numéros sont disponibles en format PDF.

Une erreur à votre patronyme ? Une adresse incomplète ? Un code postal erroné ? N'hésitez pas à nous le faire savoir par retour de courrier électronique ou en nous renvoyant corrigée l'étiquette collée sur l'enveloppe contenant votre magazine.

Conception graphique et impression :

Goekint Graphics
www.goekint.be

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

La mission de la Politique scientifique fédérale (Belspo) est la maximalisation du potentiel scientifique et culturel de la Belgique au service des décideurs politiques, du secteur industriel et des citoyens : 'une politique pour et par la science'. Pour autant qu'elle ne poursuive aucun but commercial et qu'elle s'inscrive dans les missions de la Politique scientifique fédérale, la reproduction par extraits de cette publication est autorisée. L'Etat belge ne peut être tenu responsable des éventuels dommages résultant de l'utilisation de données figurant dans cette publication.

La Politique scientifique fédérale ni aucune personne agissant en son nom n'est responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans cette publication ou des erreurs éventuelles qui, malgré le soin apporté à la préparation des textes, pourraient y subsister.

La Politique scientifique fédérale s'est efforcée de respecter les prescriptions légales relatives au droit d'auteur et de contacter les ayants droits. Toute personne qui se sentirait lésée et qui souhaiterait faire valoir ses droits est priée de se faire connaître.



Pour plus d'informations sur le système de management intégré Qualité-Environnement de la Politique scientifique fédérale : www.belspo.be

© Politique scientifique fédérale 2016
Reproduction autorisée moyennant citation de la source.

Interdit à la vente.



recherche



espace



nature



art



documentation

La Politique scientifique fédérale, outre la Direction générale 'Recherche et Spatial' et les Services d'appui, regroupe des Établissements scientifiques fédéraux et des Services de l'État à gestion séparée.

Etablissements scientifiques fédéraux



Archives générales du Royaume
Archives de l'Etat dans les provinces
www.arch.be



Bibliothèque royale de Belgique
www.kbr.be



Centre d'Etudes et de Documentation
Guerre et Sociétés contemporaines
www.cegesoma.be

CINEMATEK

Cinémathèque royale de Belgique
www.cinematek.be



Musées royaux des Beaux-Arts de
Belgique
www.fine-arts-museum.be



Musées royaux d'Art et d'Histoire
www.mrah.be



Institut royal du Patrimoine artistique
www.kikirpa.be



Institut royal des Sciences naturelles
de Belgique / Muséum des Sciences
naturelles
www.sciencesnaturelles.be



Musée royal de l'Afrique centrale
www.africamuseum.be



Observatoire royal de Belgique
www.astro.oma.be



Institut royal météorologique de
Belgique
www.meteo.be



Institut d'Aéronomie spatiale de
Belgique
www.aeronomie.be



Planétarium de l'Observatoire royal de
Belgique
www.planetarium.be

Institutions partenaires



Institut Von Karman
www.vki.ac.be



Fondation universitaire
www.fondationuniversitaire.be



Fondation Biermans-Lapôtre
www.fbl-paris.org



Academia Belgica
www.academiabelgica.it



Académie royale des
Sciences d'Outre-mer
www.kaowarsom.be



Académie royale des
Sciences, des Lettres et des
Beaux-Arts de Belgique
www.academieroyale.be



MUSEUM
NATURALSCIENCES.BE

EXPO

15.10.15 > 28.08.16



WOW

WONDERS OF WILDLIFE