

ANNUAIRE DU PNUE

LES PROBLÈMES ÉMERGENTS
NOTRE ENVIRONNEMENT MONDIAL

2012



Programme des Nations Unies pour l'environnement



ANNUAIRE DU PNUÉ

LES PROBLÈMES ÉMERGENTS
NOTRE ENVIRONNEMENT MONDIAL

2012



PNUÉ

Programme des Nations Unies pour l'environnement

À la mémoire de





Crédit: Brigitte Lacombe





Professeur Wangari Maathai

Le Professeur Wangari Maathai nous a quittés le 25 septembre 2011 à Nairobi (Kenya), après une vie consacrée à la défense de l'environnement, des droits de l'homme et de l'autonomisation des femmes. Grâce à son Mouvement de la Ceinture verte, les femmes des zones rurales du Kenya ont été encouragées à planter des arbres afin d'améliorer leurs moyens d'existence et de lutter contre les effets de la déforestation.

Le Professeur Maathai a été la première femme africaine et la première environmentaliste à recevoir le Prix Nobel de la Paix. Honorée pour son engagement en faveur de l'autonomisation des femmes et du développement durable, elle a aussi été membre du Parlement kényan et a occupé les fonctions de Vice-Ministre de l'environnement et des ressources naturelles. Mme Wangari Maathai a passé son doctorat à l'Université de Nairobi en 1971, devenant ainsi la première femme de la région de l'Afrique centrale et de l'Est à se voir décerner un diplôme de ce niveau.

1940-2011

Table des matières

	Préface	v
	Acronymes	vi
	Résumé à l'intention des décideurs	vii
	Une année en perspective	1
	Changements climatiques, phénomènes climatiques extrêmes et gestion des risques de catastrophes	1
	Dynamique démographique et rareté des ressources	4
	Énergie et atténuation des changements climatiques	6
	Conservation de la biodiversité mondiale	11
	La période à venir	12
	Regards sur 2011	14
	Calendrier des événements de 2012	15
	Références	16
	Les avantages du carbone dans le sol	19
	Stockage du carbone et autres services écosystémiques vitaux fournis par les sols	21
	Quels sont les facteurs qui déterminent la distribution mondiale du carbone du sol?	22
	Modélisation, mesure et suivi	23
	Vulnérabilité des stocks de carbone du sol face aux activités humaines	25
	Conséquences des pertes de carbone du sol et potentiel de restauration	27
	Les prochaines étapes : gérer le carbone du sol pour tirer au mieux parti de ses multiples avantages	29
	Références	32
	Fermeture et démantèlement de centrales nucléaires	35
	Qu'est-ce qu'un démantèlement?	35
	Démantèlement d'installations : situation et tendances	36
	Trois stratégies de démantèlement	37
	Les défis du démantèlement	39
	Risques liés au démantèlement	43
	Enseignements	47
	Références	48
	Principaux indicateurs environnementaux	51
	Épuisement de la couche d'ozone	51
	Changements climatiques	53
	Exploitation des ressources naturelles	55
	Produits chimiques et déchets	61
	Gouvernance de l'environnement	61
	La période à venir	62
	Références	64
	Remerciements	66
	Questionnaire	68

Préface



L'Annuaire du PNUE de 2012 met en lumière deux problèmes émergents qui soulignent les défis mais aussi les choix auxquels les nations sont confrontées pour assurer un développement durable au XXI^e siècle — améliorer sans attendre la gestion des sols dans le monde et démanteler les réacteurs nucléaires.

À première vue, ces deux problèmes peuvent paraître tout à fait distincts et sans liens entre eux. Pourtant, chacun touche à plusieurs questions fondamentales : comment le monde se nourrira-t-il et se procurera-t-il les combustibles dont il a besoin, tout en luttant contre les changements climatiques et en gérant les déchets dangereux.

La fine couche de sol à la surface de la terre fait souvent partie des écosystèmes oubliés, alors qu'il s'agit de l'un des plus importants pour la survie de l'humanité à l'avenir.

Le premier mètre de sol fournit les éléments nécessaires à l'agriculture, aux forêts, aux pâturages et aux prairies, qui à leur tour génèrent les conditions indispensables à la santé et à la viabilité de nombre des espèces végétales et animales du monde. Le premier mètre de sol stocke aussi trois fois plus de carbone que l'atmosphère n'en contient. Or les changements intervenant dans l'affectation des terres entraînent une dégradation considérable des sols, avec des pertes significatives des nutriments et du carbone qui y sont stockés. L'Annuaire note que, dans certains endroits, l'érosion des sols intervient à un rythme 100 fois plus rapide que celui auquel le sol se régénère naturellement. Des politiques plus rationnelles et plus intégrées sont indispensables pour inverser ces tendances.

L'Annuaire fait état des pratiques de culture sans labour qui sont appliquées dans certains pays, en utilisant à titre d'illustration des études de cas de l'Argentine et du Brésil, car ces pratiques, outre d'autres avantages importants, contribuent à conserver le carbone stocké dans le sol. Il met aussi en lumière une forme novatrice d'agriculture appelée « paludiculture », qui permet aux agriculteurs de cultiver les tourbières sans les dégrader et, ainsi, à maintenir leurs énormes stocks de carbone tout en produisant des végétaux pour les biocarburants durables.

Le démantèlement des centrales nucléaires est considéré comme un problème émergent en raison du grand nombre de réacteurs qui sont en fin de vie ou s'en approchent. Près de 140 réacteurs nucléaires dans près de 20 pays ont été mis hors service, mais seulement 17 d'entre eux environ ont été démantelés, alors que davantage de fermetures d'installations anciennes sont prévues au cours des années et des décennies à venir. Entre-temps, le tsunami qui a frappé la centrale nucléaire de Fukushima au Japon en 2011 a incité certains pays à revoir leurs programmes nucléaires.

L'Annuaire passe en revue les options et les complexités du démantèlement. Il analyse aussi un autre problème sur lequel on dispose encore de peu d'informations, à savoir le prix à payer pour assurer la sécurité des installations et des matériaux radioactifs qu'elles contiennent pour les générations présentes et futures. D'après certaines estimations, le coût du démantèlement d'une centrale nucléaire pourrait représenter entre 10 et 60 % des dépenses initiales de construction – aspect qui devra sans doute être mieux pris en compte dans les choix énergétiques, parallèlement aux paramètres environnementaux et sociaux.

L'Annuaire de cette année est publié avant le Sommet Rio+20, à l'occasion duquel les gouvernements se retrouveront pour échanger leurs points de vue et concevoir des actions plus décisives et rapides pour assurer un développement durable et mettre en place une économie verte solidaire.

Les travaux menés par le PNUE dans tous ses sous-programmes, depuis les changements climatiques et les écosystèmes jusqu'à l'efficacité des ressources et la prévention des catastrophes et des conflits, reposent sur des données scientifiques rationnelles et impartiales, dont le rôle n'a cessé de s'accroître ces 20 dernières années et qui serviront aussi de fondement aux mesures que les nations pourront prendre pour réaliser leurs objectifs et aspirations au-delà de 2012.

Achim Steiner

Secrétaire général adjoint de l'Organisation des Nations Unies et Directeur exécutif du Programme des Nations Unies pour l'environnement



Acronymes

[A/R]	boisement/reboisement	ILR	Index de la Liste rouge
AEN-OCDE	Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques	IPBES	Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques
AIEA	Agence internationale de l'énergie atomique	IRENA	Agence internationale de l'énergie renouvelable
AME	Accord multilatéral sur l'environnement	LULUCF	Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques	MARPOL	Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires
CDB	Convention sur la diversité biologique	MRV	Mesure, rapport et vérification
CFC	chlorofluorocarbones	N ₂ O	oxyde nitreux
CH ₄	méthane	NASA	United States National Aeronautics and Space Administration
CIPR	Commission internationale de protection radiologique	NIE	Notice d'impact sur l'environnement
CITES	Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction	NOAA	United States National Oceanic and Atmospheric Administration
CMS	Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage	OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
CNUED	Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement	OMD	Objectifs du Millénaire pour le développement
CNUDD	Conférence des Nations Unies sur le développement durable	OMM	Organisation météorologique mondiale
CNULD	Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification	PDO	Potentiel de destruction de l'ozone
CO ₂	dioxyde de carbone	PEFC	Programme de reconnaissance des certifications forestières
DoE	Département américain de l'énergie	PNUD	Programme des Nations Unies pour le développement
EIE	Étude d'impact sur l'environnement	PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
EqCO ₂	équivalent dioxyde de carbone	ppm	parties par million
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	REDD	Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts
FSC	Forest Stewardship Council	SAO	Substances qui appauvrissent la couche d'ozone
GEO	Rapport de la série L'Avenir de l'environnement mondial	SEPA	Agence écossaise pour la protection de l'environnement
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
Gt	gigatonne	UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
ha	hectare	UNSD	Division des statistiques de l'Organisation des Nations Unies
HCFC	hydrochlorofluorocarbones		
HFC	hydrofluorocarbones		

Résumé

En 2011, les scientifiques ont encore progressé dans la compréhension de l'environnement mondial. À l'heure où les pays se préparent pour la Conférence des Nations Unies sur le développement durable (Rio+20), qui se tiendra au Brésil en juin 2012, les éléments de preuve continuent de s'accumuler concernant certaines tendances environnementales, notamment les changements climatiques et leurs incidences, la perte de biodiversité et la dégradation des terres et des sols. Des obstacles énormes doivent être surmontés pour faire face aux causes et aux conséquences fondamentales de ces tendances, même si des évolutions positives peuvent aussi être signalées, par exemple l'adoption de technologies des énergies renouvelables et les investissements réalisés dans ces technologies. Les principaux indicateurs environnementaux, tels que ceux présentés dans l'Annuaire du PNUE, contribuent à suivre l'état de l'environnement en fournissant un tableau d'ensemble des dernières tendances observées et des données disponibles.

Chaque année, l'Annuaire passe en revue les phénomènes et faits nouveaux observés durant les 12 mois écoulés dans le domaine de l'environnement. En outre, il comporte des chapitres analysant les problèmes environnementaux émergents, rédigés par des groupes de scientifiques spécialisés. L'Annuaire de 2012 se concentre sur le rôle vital joué par le carbone contenu dans le sol et sur la nécessité critique de le préserver et de le renforcer, afin de pouvoir tirer parti de ses multiples avantages économiques, sociétaux et environnementaux. Il met aussi l'accent sur certaines des complexités et des incidences de l'augmentation rapide attendue du nombre de réacteurs nucléaires à démanteler dans les dix prochaines années.

2011 a été une année record en matière de phénomènes climatiques extrêmes. Des scientifiques de renom étudient la relation entre ces phénomènes et les changements climatiques. D'après les dernières analyses, les changements climatiques conduisent à des modifications de la fréquence, de l'intensité, de la durée, du calendrier et de la couverture géographique des phénomènes climatiques extrêmes. De nouvelles études indiquent que les incidences combinées de l'élévation des températures des océans, de l'acidification des mers, du manque d'oxygène et d'autres facteurs pourraient conduire à l'effondrement des récifs coralliens et à la multiplication des zones mortes océaniques. Un développement de la superficie totale des zones marines protégées pourrait stopper en partie ces dommages, à condition que des zones protégées soient établies suffisamment rapidement et soient gérées efficacement, sur la base de données scientifiques rationnelles.

Eu égard aux nouveaux changements dans l'affectation des sols et à l'intensification de l'utilisation foncière résultant de la nécessité de répondre à la demande mondiale de produits alimentaires, d'eau et d'énergie, la préservation, voire le renforcement, des stocks de carbone dans les sols devient une priorité. Durant les 25 dernières années, un quart de la superficie terrestre mondiale a souffert d'un recul de la productivité et de l'aptitude à fournir des services écosystémiques en

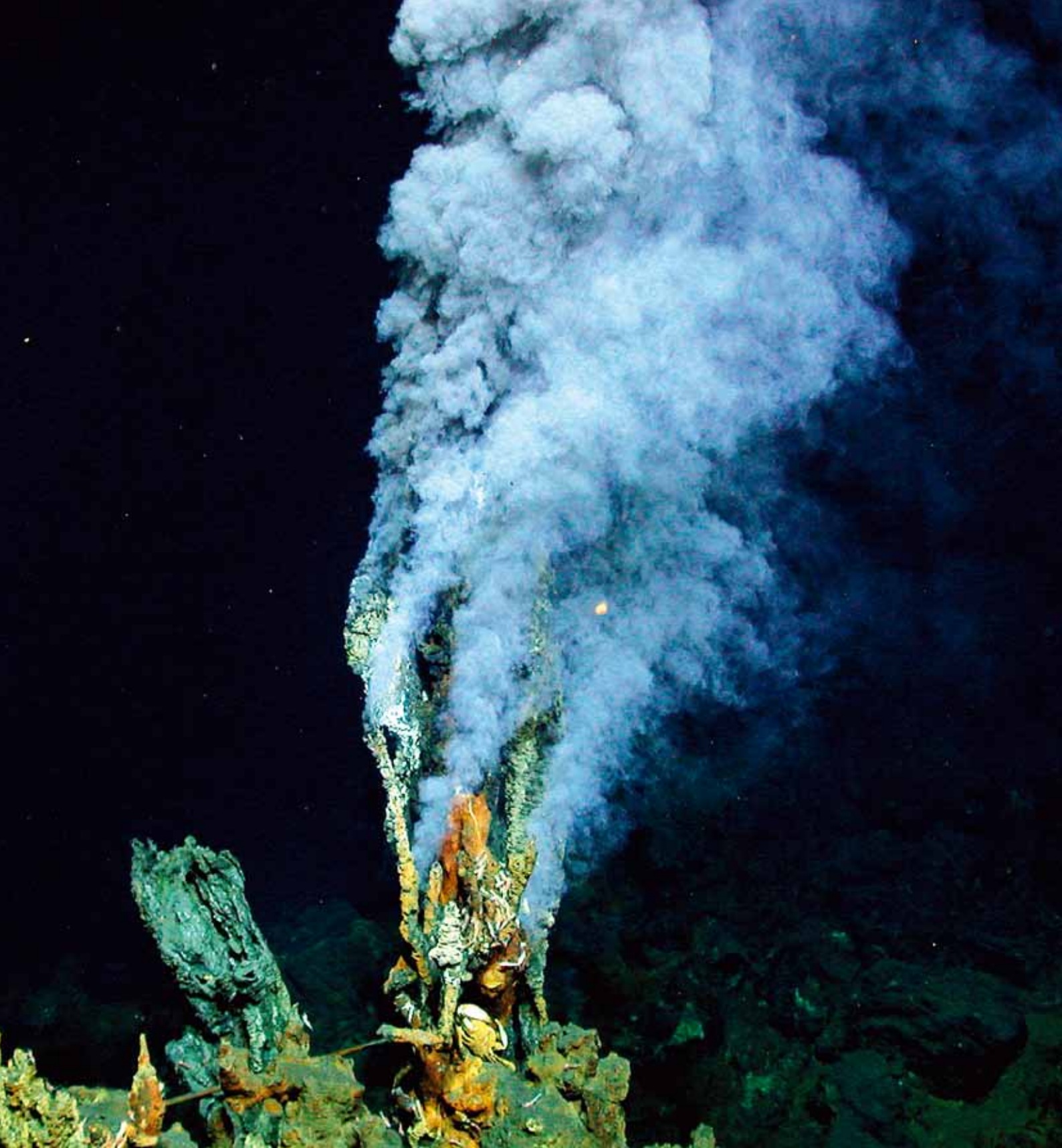
raison des pertes de carbone dans le sol. Étant donné que le carbone dans le sol est indispensable à la productivité agricole, à la stabilisation du climat et à d'autres services écosystémiques vitaux, mettre en place des incitations pour favoriser la gestion durable du carbone dans le sol pourrait avoir de nombreux avantages à court et à long termes. Dans certains emplacements, comme les tourbières et les toundras, il faudra mettre en place des mécanismes à même de protéger ces milieux qui jouent un rôle important dans le stockage du carbone en remplaçant des utilisations comme l'expansion agricole ou forestière. En effet, dans nombre de cas, de multiples avantages économiques, sociétaux et environnementaux peuvent être obtenus grâce à la gestion efficace du carbone contenu dans le sol.

Accorder une priorité accrue à tous les niveaux de gouvernance à la gestion efficace du carbone dans le sol pour en exploiter les multiples avantages constituerait un progrès important vers la préservation des services écosystémiques indispensables au bien-être de la population mondiale en 2030 et au-delà.

Le démantèlement nucléaire désigne le démontage sûr, en fin de vie, des réacteurs et installations nucléaires. Les premières générations de ces réacteurs arrivant au terme de la durée de vie pour laquelle ils ont été initialement conçus et certains pays revoyant leur programme d'énergie nucléaire au lendemain de l'accident de Fukushima, le nombre de réacteurs à démanteler dans les dix prochaines années devrait s'accroître sensiblement. Chaque opération de démantèlement présente des problèmes techniques particuliers ainsi que des risques spécifiques pour la santé humaine et l'environnement. Bien que des activités de démantèlement aient été menées pendant plusieurs années sans problèmes radiologiques majeurs, des différences d'expertise considérables existent au niveau géographique. Le coût du démantèlement varie énormément suivant le type et la taille du réacteur, de son emplacement, de la proximité et de la disponibilité d'installations d'élimination des déchets, de l'utilisation future prévue du site et de l'état à la fois du réacteur et du site au moment du démantèlement. Les opérations de démantèlement représentent une part importante des dépenses totales de fonctionnement du réacteur nucléaire.

Ces opérations génèrent habituellement les deux tiers de l'ensemble des déchets à très faible activité, faible activité et activité intermédiaire générés pendant la durée de vie d'un réacteur. À mesure que le nombre d'installations nucléaires qu'il est prévu de démanteler s'accroît, les pays doivent être prêts à gérer les déchets de ces différents niveaux d'activité. L'ampleur de la tâche à venir exigera des réglementations nationales et internationales, des financements importants, des technologies novatrices et un grand nombre de travailleurs formés. Un des enseignements qui commence à émerger est que les installations nucléaires devraient être conçues dès le départ pour un démantèlement sûr et efficace.





Une année en perspective

Phénomènes et faits nouveaux observés dans le domaine de l'environnement

2011 a été une année des extrêmes en matière d'environnement. Des sécheresses et inondations de grande ampleur ont fait la une de l'actualité et les climatologues de renom ont poursuivi leurs travaux pour déterminer s'il existe une relation claire entre les phénomènes climatiques extrêmes et les changements climatiques. Dans l'océan, seulement 9 % de l'ensemble des espèces ont été identifiées, alors que de nouvelles études montrent que la surpêche, la pollution et les changements climatiques menacent gravement l'avenir de la vie océanique. Malgré la récession économique, les investissements mondiaux dans l'énergie verte se sont accrus de près d'un tiers pour atteindre 211 milliards de dollars en 2010. Des investissements de 2 % du PIB dans dix secteurs clés pourraient sensiblement accélérer la transition vers une économie plus durable et sobre en carbone.

Quelque 13 millions de personnes à Djibouti, en Érythrée, en Éthiopie, au Kenya et en Somalie souffrent de l'une des plus graves crises humanitaires depuis des décennies. La sécheresse la plus grave qu'a connue la région en 60 ans a entraîné une famine généralisée et a rendu extrêmement difficile l'accès à l'eau potable et à l'assainissement (**encadré 1**). Ces conditions non seulement affectent directement les communautés locales aujourd'hui, mais affaiblissent aussi leur capacité de résister à de futures sécheresses, pesant sur les perspectives de sécurité alimentaire et hydrique dans les années à venir (Munang et Nkem 2011). Les températures relevées dans la région devraient continuer d'augmenter, en association avec des modifications du régime des précipitations (Anyah et Qui 2011).

La crise dans la Corne de l'Afrique n'est que l'un des événements de 2011 qui témoignent des enjeux auxquels il faudra répondre face à un climat de plus en plus variable et changeant au niveau mondial. Beaucoup de régions ont besoin de stratégies novatrices pour faire face aux pressions qui s'exercent sur les ressources en terre et en eau et sur la productivité agricole – stratégies qui vont du renforcement de la capacité d'adaptation des petites communautés locales d'agriculteurs à des engagements mondiaux pour atténuer les changements climatiques.

Changements climatiques, phénomènes climatiques extrêmes et gestion des risques de catastrophes

L'année 2011 a été marquée par des événements climatiques de grande ampleur, qui ont entraîné un grand nombre de pertes en vies humaines et des milliards de dollars de dommages (**graphique 1**). Elle a été la dixième année la plus chaude à l'échelle du globe, l'année la plus chaude en relation avec un épisode La Niña et l'année de la deuxième plus faible étendue de la banquise arctique (National Snow and Ice Data

Les cheminées hydrothermales sont des geysers situés au fond des mers où se sont développées d'importantes communautés vivantes. La pêche hauturière et l'extraction minière peuvent causer de graves dommages aux écosystèmes des mers profondes. *Crédit : Charles Fisher*

Encadré 1 : la famine et ses conséquences dans la Corne de l'Afrique



En 2011, le camp de réfugiés de Dadaab au Kenya a accueilli 400 000 personnes fuyant la sécheresse et la famine. *Photo : Linda Ogdell, Oxfam*

La sécheresse, associée à des prix alimentaires élevés, une action humanitaire insuffisante et des restrictions en matière d'acceptation de l'aide, s'est traduite par des migrations massives vers les camps de réfugiés situés dans la Corne de l'Afrique. Des alertes à la famine ont été lancées pour cette région au début de 2011, mais la sécheresse a néanmoins eu un impact extrême. En juillet, le taux de malnutrition aiguë dans le sud de la Somalie avait grimpé à 38-50 % (FEWSNET 2011). Nombre des systèmes d'alerte rapide évaluant les conditions pays par pays, leur aptitude à envisager la situation régionale dans son ensemble est limitée, ce qui peut nuire à l'adéquation des efforts d'intervention (Ververs 2012).



Températures d'une faiblesse inégale enregistrées à Fairbanks en Alaska (États-Unis) du 15 au 19 novembre. Le niveau le plus faible a été atteint le 17 novembre avec -41°C.

Aux États-Unis, une grande partie des plaines du Nord et de la chaîne des Rocheuses connaissent le mois de mai le plus humide jamais enregistré. Des chutes de neige sans précédent dans les Rocheuses ainsi que des pluies de printemps d'une densité quasi inégale entraînent le débordement du fleuve Mississippi.

Des vents puissants faisant suite à la tempête tropicale Lee, ainsi que des températures élevées et la pire sécheresse observée durant une année embrasent le Texas. Près de 21 000 incendies, les plus destructeurs de l'histoire du Texas détruisent plus de 1 500 habitations.

Certaines parties du Mexique souffrent de basses températures sans précédent les 3 et 4 février. La ville de Juarez enregistre -18°C, soit la température la plus basse jamais relevée depuis 1950.

2011 se situe au quatrième rang pour ce qui est du nombre de personnes tuées par des cyclones aux États-Unis. Le 22 mai, un cyclone à Joplin (Missouri) a tué 157 personnes. Il s'agit du cyclone le plus meurtrier enregistré depuis que ce type d'événements a commencé à être relevé par des moyens modernes en 1947.

Une grande partie de l'Amérique du Nord est submergée par une vague d'extrême chaleur en juillet. Plusieurs records sont battus.

Aux États-Unis, le débordement du fleuve Mississippi provoque les pires inondations depuis 1927.

En début d'année, Cuba souffre de la pire sécheresse depuis près d'un demi-siècle. Le niveau des réservoirs tombe à un cinquième de ses niveaux normaux. L'État approvisionne par la route plus de 100 000 personnes.

Le 9 septembre, la couverture de glace dans la mer arctique se situe à un niveau seulement légèrement supérieur au minimum record enregistré précédemment en 2007.

Le Royaume-Uni connaît le mois d'avril le plus chaud jamais recensé depuis que les températures record ont commencé à être relevées en 1910. C'est aussi le mois d'avril le plus chaud jamais recensé en Angleterre, dans le pays de Galles, en Écosse et en Irlande du Nord, considérés individuellement.

En avril, une violente tempête de sable frappe l'Allemagne du Nord, suite à une sécheresse sans précédent. Quatre-vingt véhicules se retrouvent empilés, 20 prenant feu.

Mois de novembre le plus sec que l'Allemagne ait connu depuis que ces données ont commencé à être enregistrées en 1881.

Certaines parties de l'Europe enregistrent des températures estivales record. Cette vague de chaleur entraîne la mort d'au moins dix personnes en Italie les 23 et 24 août.

En août, l'ouragan Irène sème la destruction dans les Caraïbes, ravageant tout sur son passage jusqu'à l'ensemble de la côte Est des États-Unis. Au moins 56 personnes sont tuées, 5,8 millions de personnes sont privées d'électricité et des centaines de millions doivent évacuer leur habitation.

Les inondations et les glissements de terrain survenus dans l'état de Rio de Janeiro début janvier entraînent la mort de plus de 800 personnes. C'est la catastrophe naturelle la plus meurtrière que le Brésil ait jamais connue.

Le 8 août, un nuage de grêle accompagné de vents violents frappe le sud du Paraguay et détruit des habitations et des cultures. Plus de 1 700 familles sont touchées.

Les vastes inondations touchant le Nord de la Namibie au début de l'année affectent des milliers de personnes. Jamais le pays n'en avait connues d'une telle ampleur.

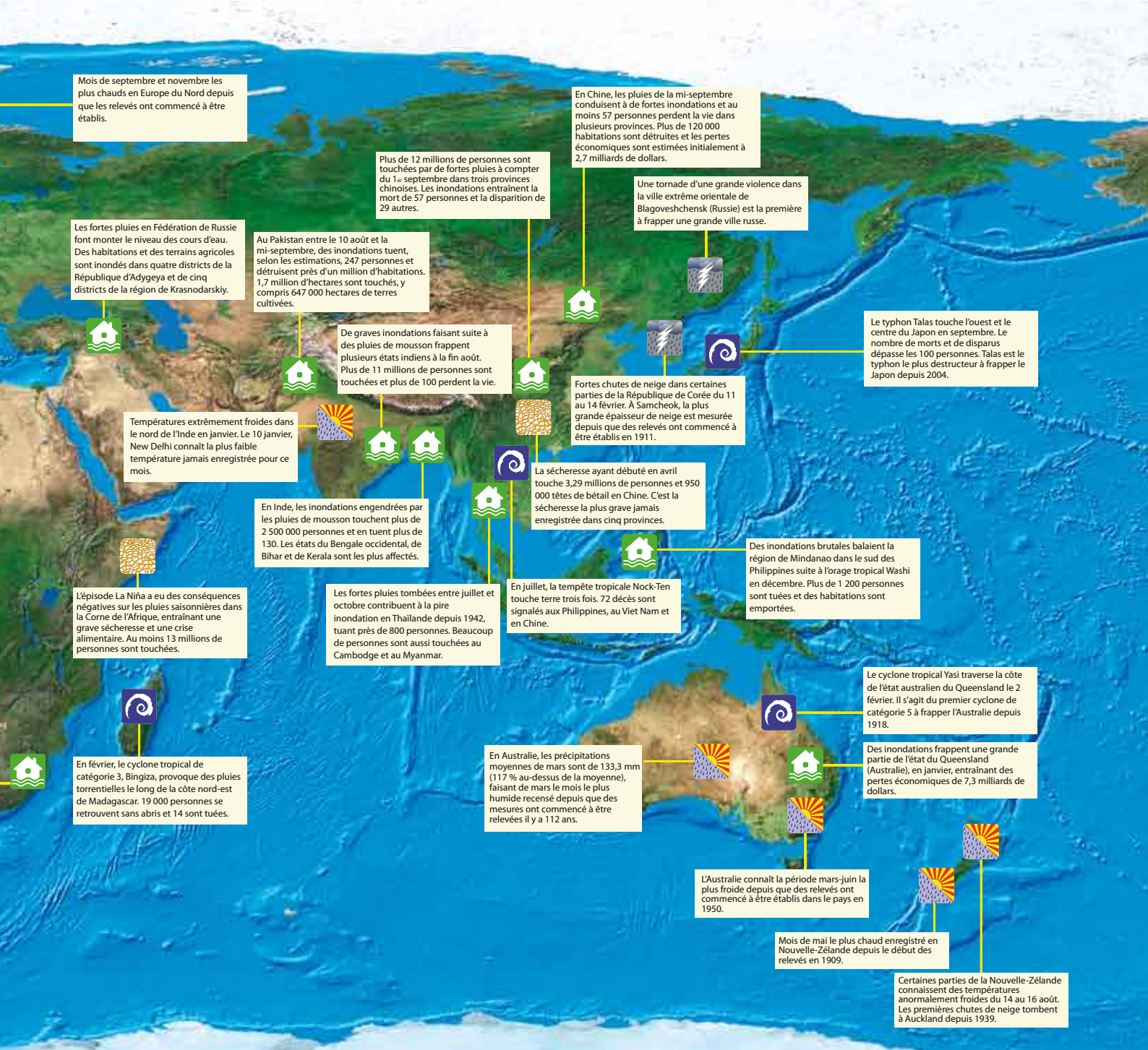
Des pluies inhabituelles pour la saison frappent certaines parties de l'Afrique du Sud début juin. Dans certaines zones, les précipitations sont dix fois supérieures à la moyenne mensuelle.

Buenos Aires (Argentine) reçoit 83 mm de pluie le 18 juillet, soit le jour le plus pluvieux jamais enregistré pour un mois de juillet.

Plusieurs parties de l'Argentine connaissent le mois d'octobre le plus froid depuis des décennies.

Plusieurs zones de l'Argentine enregistrent en mai leur plus faible pluviosité depuis 1961.





Graphique 1 : les phénomènes climatiques extrêmes majeurs qui ont marqué 2011 ont fait un grand nombre de victimes et entraîné des milliards de dollars de dommages partout dans le monde. Des températures et des précipitations record, ainsi que des orages, des cyclones tropicaux, des inondations, des sécheresses et des incendies de grande ampleur ont provoqué beaucoup de pertes en vies humaines et des destructions généralisées. D'après le GIEC, les changements climatiques contribuent à la modification de la fréquence et de l'intensité de ces phénomènes (GIEC 2011a). Aucun lien n'a été établi entre les changements climatiques et les phénomènes géophysiques, comme les séismes.

Center — NSIDC 2011, OMM 2011a). Les scientifiques ont établi un nouveau partenariat international pour déterminer, au cas par cas, la probabilité selon laquelle les événements climatiques extrêmes sont induits ou exacerbés par la hausse des températures mondiales observée au cours du siècle passé (Stott et al. 2011). En outre, en étudiant la variabilité pluviométrique, ils ont déjà mis en évidence des éléments d'information montrant que les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique augmentent sensiblement le risque de phénomènes extrêmes (Pall et al. 2011).

Un phénomène climatique extrême est un phénomène qui est rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique (GIEC 2011a). S'il est très difficile, en raison de la variabilité naturelle, d'attribuer les différents phénomènes aux changements climatiques, les analyses statistiques montrent que les tendances globales de nombre de ces phénomènes se modifient. Un nouveau rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) conclut que les changements climatiques conduisent à des modifications de la fréquence, de l'intensité, de la longueur, du calendrier et de la portée géographique des phénomènes extrêmes (GIEC 2011a). D'après ce rapport, il est à peu près certain (probabilité de 99 à 100 %) que la fréquence et l'ampleur des températures journalières élevées s'accroîtront au XXI^e siècle alors qu'elles diminueront pour les températures extrêmement froides. Le GIEC affirme avec une quasi certitude que l'on observera un plus grand nombre de phénomènes liés à de fortes précipitations et au niveau élevé des eaux côtières imputable à l'élévation des eaux océaniques. Cependant, malgré plusieurs inondations dévastatrices en 2011, telles celles qui ont touché l'Australie, le Pakistan et la Thaïlande, on ne dispose pas de beaucoup d'éléments d'information démontrant l'existence de variations régionales en longue période de l'ampleur et de la fréquence des inondations, pour partie en raison de l'absence de données d'observation aux échelles temporelles et spatiales appropriées (GIEC 2011a).

La National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) des États-Unis a signalé que les catastrophes climatiques qui ont frappé le pays durant les six premiers mois de 2011 ont entraîné des dégâts d'un coût inégalé en l'espace d'une année (NOAA 2011). A la fin de 2011, les États-Unis avaient dû faire face à 14 catastrophes représentant au moins 1 milliard de dollars de dommages (NOAA 2012). Au niveau mondial, pour le seul premier semestre de 2011, les coûts découlant de graves phénomènes naturels ont dépassé ceux enregistrés lors de la précédente année la plus coûteuse 2005 (Stratégie internationale des Nations unies pour la prévention des catastrophes 2011). Munich Re, la plus grande compagnie mondiale de réassurance, a fait état de 380 milliards de dollars de pertes en 2011 dues à des catastrophes naturelles, notamment des phénomènes liés au climat, ainsi qu'à des phénomènes géophysiques, comme des tremblements de terre (Munich Re 2012). Ces chiffres stupéfiants illustrent l'incidence économique potentielle d'une augmentation de la fréquence et de la gravité des phénomènes climatiques extrêmes. Ils mettent aussi en évidence l'importance des souffrances humaines associées et la nécessité d'améliorations des stratégies de prévention et de réduction des risques afin de renforcer la

capacité de résistance face à ces événements des pays développés comme des pays en développement.

Les pertes économiques dues aux catastrophes sont plus élevées globalement dans les pays développés que dans les pays en développement. En pourcentage du PIB, toutefois, elles sont beaucoup plus importantes dans les pays en développement. Plus de 95 % des décès dus à des phénomènes extrêmes au cours des quelques dernières décennies sont intervenus dans les pays en développement. Les pays développés peuvent souvent s'appuyer sur des mécanismes financiers et institutionnels plus solides pour affronter ces phénomènes et leurs incidences. Pour réduire l'exposition et la vulnérabilité à l'avenir, il faudrait intégrer les activités de prévention des risques de catastrophe dans la planification du développement économique et des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Des plans et stratégies d'alerte rapide et de prévention des risques de catastrophes sont indispensables, alors que la documentation des différents événements alimente le pool de connaissances et d'enseignements (GIEC 2011a). Nombre de régions mènent déjà des activités de prévention et de réduction des risques de catastrophes, notamment des initiatives de sensibilisation du public et des améliorations des systèmes d'alerte rapide et des infrastructures.

Dynamique démographique et rareté des ressources

Les phénomènes extrêmes peuvent entraîner des déplacements de population internes et externes. Compte tenu de l'évolution permanente du climat et de la multiplication probable de certains types de ces phénomènes, leur incidence sur les migrations doit être prise en compte. Plus généralement, se pose la question des conséquences des changements climatiques pour la sécurité internationale. En juillet 2011, le Conseil de sécurité de l'Organisation des Nations unies a formellement débattu de cette question, examinant comment les changements climatiques pouvaient devenir un « multiplicateur de menaces » dans l'optique du maintien de la paix et de la stabilité mondiales. Les réfugiés



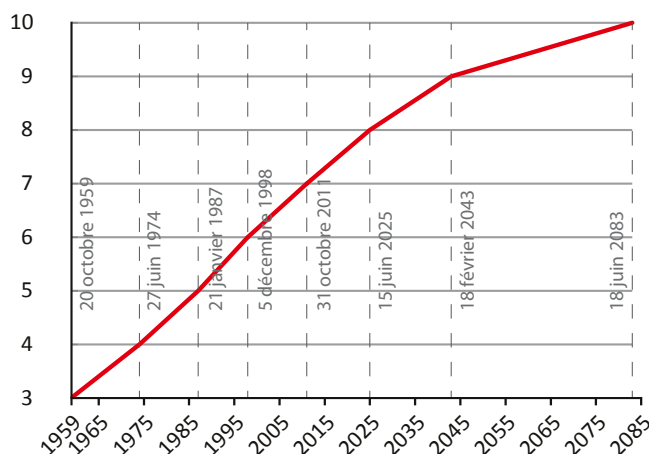
Le Secrétaire général, M. Ban Ki-moon (centre), avec des étudiants de la New Explorations into Science, Mathematics and Technology School, tenant des pancartes formant le chiffre « 7 000 000 000 » lors de la semaine au cours de laquelle la population mondiale a passé le cap des 7 milliards. Photo : Eskinder Debebe

environnementaux déplacés par les pénuries d'eau et les crises alimentaires reconfigurent la géographie humaine mondiale. Si les 15 membres du Conseil de sécurité ont débattu du degré de priorité à accorder aux changements climatiques, ils se sont, dans une déclaration, accordés à reconnaître que les effets négatifs éventuels des changements climatiques peuvent, à long terme, aggraver certaines menaces pesant sur la paix et la sécurité internationales (Conseil de sécurité de l'ONU, 2011).

D'après une étude publiée en décembre par quatre organismes des Nations Unies sur les changements climatiques, les migrations et les conflits dans la région du Sahel en Afrique de l'Ouest, les tendances climatiques dans cette région connaissent déjà des modifications (PNUE 2011a). Celles-ci ont une incidence sur la disponibilité des ressources naturelles et sur la sécurité alimentaire et conduisent à une évolution des profils migratoires. Cette étude a abordé la question du renforcement de la concurrence pour l'accès aux ressources naturelles, essentiellement les terres et l'eau, qui conduit à des conflits entre les différents groupes d'autosuffisance et communautés. Dans la région du Darfour, en Afrique de l'Est, les structures migratoires exercent aussi de fortes pressions sur les ressources naturelles, y compris l'eau. La moitié de la population de cette région vit aujourd'hui dans des zones urbaines ou autour des zones urbaines. Avant le conflit civil, 20 % seulement de la population était une population urbaine (HCR 2010). Cette urbanisation non prévue a conduit à la mise en place d'établissements informels mal équipés en installations d'assainissement et d'alimentation en eau.

La population mondiale, de 7 milliards en 2011, devrait passer à 9 milliards d'ici à 2043, mettant à rude épreuve les ressources de la planète (Département des affaires économiques et sociales de l'ONU 2011) (**graphique 2**). Les changements climatiques rendent d'autant plus urgente la nécessité de répondre aux besoins en denrées alimentaires d'une population de plus en plus nombreuse et plus riche. La production agricole mondiale pourrait devoir s'accroître de 70 % d'ici à 2050 pour faire face à ces besoins (FAO 2011a). Une analyse récente des données historiques montre que les tendances climatiques observées ont eu des incidences négatives sur les rendements de blé et de maïs ces 30 dernières années (Lobell et al. 2011). La consommation de ressources pourrait tripler d'ici à 2050, alors que les tendances actuelles en matière de consommation diffèrent beaucoup suivant les pays développés et les pays en développement (PNUE 2011b). Pour un grand nombre de systèmes agricoles, on peut craindre un effondrement progressif de la capacité de production face à la conjugaison de pressions démographiques excessives et d'une utilisation et de pratiques agricoles peu durables (FAO 2011b).

Les changements climatiques, qui auront une incidence sur la pluviométrie dans nombre de régions, devrait exacerber la rareté de l'eau. Cet aspect est particulièrement inquiétant dans les régions à forte intensité de production alimentaire. Des pratiques agricoles plus rationnelles du point de vue environnemental doivent être utilisées, notamment des techniques d'irrigation améliorées et la plantation d'un couvert végétal avec des arbres et des buissons pour réduire les ruissellements d'eau et accroître la protection contre la sécheresse

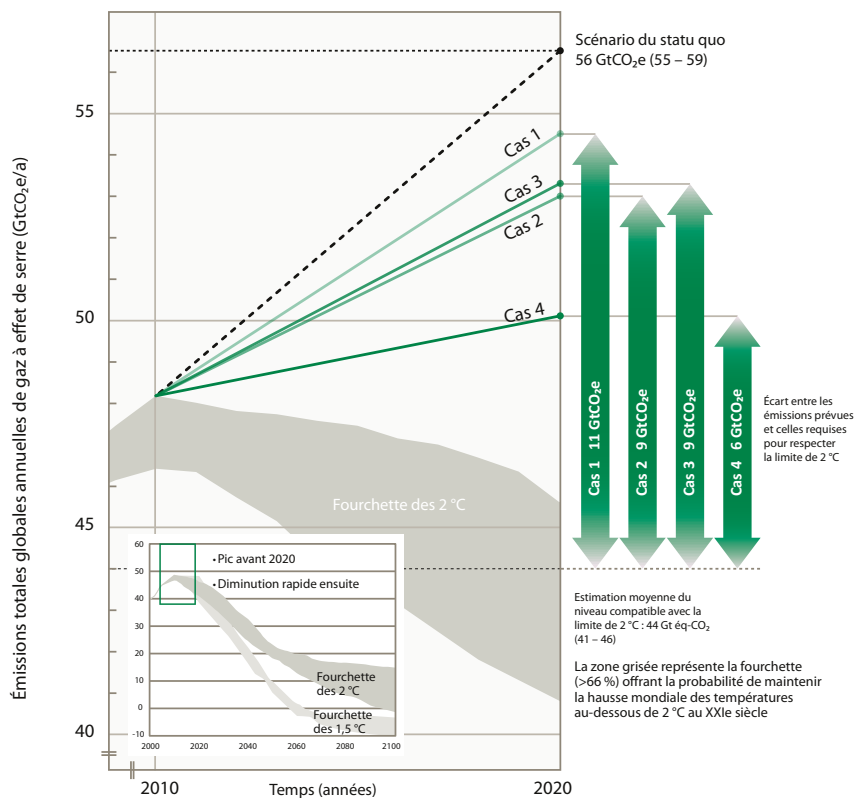


Graphique 2 : évolution prévue de la population mondiale en milliards, 1959-2085.
Source : Département des affaires économiques et sociales de l'ONU (2011)

(PNUE et International Water Management Institute – IWMI 2011). La production de bioénergie peut accroître les pressions s'exerçant sur la terre et l'eau, entrant en concurrence avec la nécessité d'alimenter une population mondiale en augmentation. Toutefois, l'utilisation de biocarburants au lieu de combustibles fossiles peut aussi contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Des normes de durabilité doivent donc être soigneusement définies et appliquées pour faire en sorte que l'augmentation de la demande de bioénergie n'accroisse pas les contraintes pesant sur les terres, l'eau et la production alimentaire (PNUE 2011c). Des politiques qui protègent à la fois les terres utilisées pour la production bioénergétique et les écosystèmes environnant sont indispensables pour préserver la sécurité hydrique et alimentaire. Une planification et une gestion intégrées peuvent réduire les risques associés à l'utilisation des biocarburants, tout en contribuant à la transition vers une économie verte (PNUE 2011c, PNUE et al. 2011).

En juin 2011, les gouvernements participant au Congrès de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) ont approuvé le Cadre mondial pour les services climatologiques, effort coordonné de nombre de parties prenantes pour rendre plus accessibles les informations nécessaires à la prise de décisions et aux mesures d'adaptation. L'objectif de ce cadre mondial est d'intégrer les informations sur le climat pour faciliter leur utilisation par tous les pays et les secteurs sensibles. Une bonne coordination avec les activités de financement des activités relatives au climat et plusieurs dizaines de milliards de dollars seront indispensables pour lancer la mise en œuvre du Cadre mondial afin de mieux venir en aide aux pays en développement (OMC 2011b). Une initiative soutenant le Cadre mondial pour les services climatologiques est le Programme de recherche sur les changements climatiques : vulnérabilité, impacts et adaptation, lancé en 2011 (PROVIA 2011). Les pays en développement ont appelé à plusieurs reprises de leurs vœux un développement scientifique concerté, afin de faciliter les stratégies, plans et programmes d'adaptation nationaux et sectoriels. Cette initiative pourrait répondre en partie à cette exigence.





● **Cas 1 – Engagements inconditionnels, règles souples**
Si les pays appliquent leurs engagements inconditionnels et sont soumis à des règles comptables « souples », les émissions mondiales moyennes devraient atteindre en 2020 un total de 55 Gt éq-CO₂ (fourchette de 53 à 57 Gt éq-CO₂).

● **Cas 2 – Engagements inconditionnels, règles strictes**
Si les pays appliquent leurs engagements inconditionnels et sont soumis à des règles comptables « strictes », les émissions mondiales moyennes devraient atteindre en 2020 un total de 53 Gt éq-CO₂ (fourchette de 52 à 55 Gt éq-CO₂).

● **Cas 3 – Engagements conditionnels, règles souples**
Certains pays ont des engagements plus ambitieux. Dans leur cas, mais avec des règles comptables « souples », les émissions mondiales moyennes devraient atteindre en 2020 un total de 53 Gt éq-CO₂ (fourchette de 52 à 55 Gt éq-CO₂), soit comme dans le cas 2.

● **Cas 4 – Engagements conditionnels, règles strictes**
Si les pays appliquent leurs engagements conditionnels et sont soumis à des règles comptables « strictes », les émissions mondiales moyennes devraient atteindre en 2020 un total de 51 Gt éq-CO₂ (fourchette de 49 à 52 Gt éq-CO₂).

Toutes les valeurs des émissions indiquées dans le texte sont arrondies à la gigatonne immédiatement inférieure ou supérieure.

Graphique 3 : les engagements de réduction des émissions d'ici à 2020 pris par les pays ne sont actuellement pas suffisants pour réaliser l'objectif du maintien de la hausse mondiale des températures au-dessous de 2 °C d'ici à la fin du XXI^e siècle, d'où des écarts. L'ampleur de ces écarts dépend de l'ampleur des engagements et de la façon dont ceux-ci sont appliqués. Quatre cas sont distingués dans le graphique. Le cas 1 reflète des engagements de réduction des émissions moins ambitieux assortis de règles comptables « souples » ; le cas 2 correspond à des engagements de réduction des émissions moins ambitieux assortis de règles comptables « strictes » ; le cas 3 représente des engagements de réduction plus ambitieux et des règles comptables « souples » ; et le cas 4 reflète des engagements de réduction plus ambitieux et des règles comptables « strictes ». Selon les règles comptables « souples », les pays peuvent prendre en compte pour évaluer le respect de leurs engagements les crédits LULUCF (utilisation des terres, changement d'affectation des terres et foresterie) et les surplus d'unités d'émissions. Ils ne le peuvent pas en vertu des règles « strictes ». Source : PNUE (2011d)

Énergie et atténuation des changements climatiques

Si un grand nombre de pays prennent des mesures pour s'adapter aux changements climatiques, la réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre reste indispensable pour éviter les incidences les plus graves et irréversibles de ce changement. En 2010, les niveaux des gaz à effet de serre ont été les plus élevés enregistrés depuis l'époque préindustrielle (OMM 2011c). Beaucoup de pays se sont engagés en 2009 à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2020, afin de maintenir le réchauffement planétaire au-dessous de 2 °C d'ici à la fin du XXI^e siècle. Toutefois, un écart important de 6 à 11 Gt éq-CO₂ demeure entre les niveaux attendus des émissions en 2020 (sur la base des tendances actuelles) et les niveaux compatibles avec le maintien au-dessous de 2 °C de la hausse de la température moyenne mondiale d'ici à la fin du siècle (**graphique 3**).

Une réduction des émissions d'ici à 2020 qui limiterait la température à 2 °C ou moins est économiquement et technologiquement possible (PNUE 2011d). Pour diminuer les émissions, les pays doivent modifier leurs systèmes énergétiques en augmentant l'utilisation des sources d'énergies renouvelables sobres en carbone existantes et en améliorant l'efficacité énergétique. Des politiques sectorielles de réduction des émissions peuvent être mises en œuvre, surtout dans la production d'électricité, l'industrie, les transports, la sylviculture et l'agriculture. Elles pourraient contribuer à combler l'écart entre les niveaux actuels des émissions et les niveaux cibles, si elles sont associées à des engagements de réduction plus ambitieux et à des règles de comptabilité plus strictes. Les « marchés publics verts » peuvent aussi contribuer à des réductions des émissions par les secteurs public et privé. Ils peuvent être mis en pratique par les entreprises et les organisations à titre individuel. Les marchés publics verts consistent à

Encadré 2 : les négociations de Durban sur les changements climatiques

La dix-septième session de la Conférence des Parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et la septième session de la Conférence des Parties servant de réunion des Parties au Protocole de Kyoto se sont tenues à Durban (Afrique du Sud) du 28 novembre au 9 décembre 2011. La première période d'engagement du Protocole de Kyoto (adopté en 1997) devant se terminer à la fin de 2012, l'enjeu était d'arriver à une décision sur un accord pouvant succéder au Protocole, en vertu duquel les pays développés se sont engagés à des réductions quantifiées des émissions.

Après un long débat, le Protocole de Kyoto a été prolongé pour une deuxième période d'engagement. Les dispositions doivent être finalisées d'ici à la fin de 2012 pour une entrée en vigueur à compter du 1^{er} janvier 2013. Sans la participation de plusieurs gros émetteurs et avec une approche ascendante de la fixation des engagements de réduction des émissions, la deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto ne peut être qu'une transition vers un accord universel et global. Peu après les discussions de Durban sur le climat, le Canada a annoncé son retrait du Protocole de Kyoto.

Outre la prolongation du Protocole, la décision importante a été prise de commencer à négocier un protocole, un autre instrument juridique ou une solution concertée ayant une force légale qui serait appliqué par toutes les Parties à la Convention dans le nouveau cadre de la Plateforme de Durban, couvrant à la fois les pays développés et les pays en développement. Les réductions des émissions au titre du nouvel accord mondial devraient commencer en 2020. Un autre aspect essentiel des résultats de Durban a concerné le Fonds vert pour le climat. Un large accord s'est dégagé sur la structure de ce fonds. L'objectif antérieur de mobiliser conjointement 100 milliards de dollars par an d'ici à 2020 pour faire face aux besoins des pays en développement a été réaffirmé. Grâce à la mise en place opérationnelle

du Fonds vert pour le climat, les financements climatiques pourraient devenir plus centralisés et cohérents.

Si certaines avancées ont été obtenues à Durban pour maintenir les négociations climatiques sur les rails, d'autres sont préoccupés par le fait que trop peu de progrès ont été réalisés pour combler l'écart entre les émissions prévues et les émissions requises pour parvenir à l'objectif. Les engagements volontaires actuels de réduction des émissions ne se sont pas traduits jusqu'ici par une diminution des émissions de gaz à effet de serre. En fait, ces émissions se sont plutôt accrues. La dix-huitième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC et la huitième session de la Conférence des Parties servant de réunion aux Parties au Protocole de Kyoto se tiendront du 26 novembre au 7 décembre 2012 à Doha (Qatar).



Photo : Siemens AG

sélectionner des services et des produits qui minimisent les incidences sur l'environnement, notamment grâce à des réductions des émissions de gaz à effet de serre. Ils contribuent à la responsabilité écologique des organisations et permettent souvent à celles-ci de réaliser également des économies (IISD 2011).

Les négociations internationales se tenant en vertu de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) jouent un rôle important dans la fixation des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre des pays. Les débats sur le climat qui ont eu lieu à Durban ont débouché sur des décisions concernant une deuxième période d'engagement pour le Protocole de Kyoto ainsi que sur un processus visant à lancer les négociations d'un instrument juridique ou d'une solution concertée ayant une force légale qui serait appliqué par toutes les Parties à la Convention (**encadré 2**). À de nombreux égards, ces deux accords constituent une percée. En outre, les décisions prises à Durban ont permis la mise en place opérationnelle du Fonds vert pour le climat et un renforcement de l'architecture établie à Cancun pour faire face aux changements climatiques, notamment grâce à un processus visant à déterminer les aspects détaillés du Centre

de technologie climatique et de ses réseaux. Cependant, ces décisions n'ont pas contribué à enclencher une dynamique de réduction des émissions à la hauteur de celle jugée nécessaire par les scientifiques pour maintenir la hausse des températures au-dessous 2 °C. Il reste toujours un écart important entre le niveau prévu des émissions et le niveau requis.

La limitation des émissions d'hydrofluorocarbones (HFC) peut beaucoup contribuer à la réduction des émissions totales de gaz à effet de serre pour empêcher une évolution dangereuse du climat (PNUE 2011e). Bien que les hydrofluorocarbones soient de puissants gaz à effet de serre, ils sont utilisés de plus en plus pour remplacer des substances appauvrissant la couche d'ozone, comme les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydrochlorofluorocarbones (HCFC). La contribution des HFC au forçage climatique total représente moins de 1 % de celle de l'ensemble des autres gaz à effet de serre combinés, mais entre 2004 et 2008, leur utilisation s'est accrue de 8 % environ par an. L'augmentation des émissions de HFC pourrait donc avoir une incidence notable sur le système climatique. L'utilisation des HFC peut être réduite grâce à une mise en œuvre d'options techniques, comme le choix de concepts



architecturaux qui évitent la nécessité d'un conditionnement de l'air et le recours à des HFC ayant un faible potentiel de réchauffement global, que les scientifiques sont en train de mettre au point et d'introduire (PNUE 2011e).

De multiples avantages immédiats peuvent être obtenus de la réduction des émissions de carbone noir et de produits chimiques qui sont des précurseurs de la formation d'ozone au niveau du sol (Shindell et al. 2012). Le carbone noir est une matière particulaire constituée par la combustion incomplète de la biomasse et des combustibles fossiles. L'ozone troposphérique est un polluant secondaire, produit par des réactions chimiques de certains composés en présence de la lumière solaire. L'un des principaux précurseurs de l'ozone troposphérique est le méthane, qui est aussi un puissant gaz à effet de serre. Aussi bien l'ozone troposphérique que le carbone noir influent sur le système climatique et ont des incidences importantes sur la santé humaine et celle des écosystèmes (PNUE et OMM 2011). Ils ont aussi une incidence sur la pluviométrie et les régimes de circulation régionaux, comme la mousson asiatique. Le carbone noir assombrit la neige et la glace, réduisant le volume de la lumière solaire se réfléchissant vers l'espace. Cela entraîne un réchauffement et une fonte des neiges accrue et, par conséquent, des inondations. L'établissement de cibles pour les émissions de carbone noir et de précurseurs de l'ozone a des avantages immédiats pour la santé et pourrait contribuer à atténuer les changements climatiques à court terme (Shindell et al. 2012). Des actions efficaces de réduction des émissions de CO₂ sont toutefois encore requises pour maintenir dans la limite de 2 °C la hausse des températures.

Plusieurs approches, comme l'amélioration de la conservation et de l'efficacité énergétiques, peuvent être utilisées de façon utile, conjointement avec les technologies des énergies renouvelables,

pour réduire les émissions totales de gaz à effet de serre. Des investissements sont requis pour tirer le maximum parti de ces approches. D'après de nouvelles études, des investissements de 2 % du PIB mondial dans dix secteurs clés sont nécessaires pour faciliter la transition vers une économie verte sobre en carbone, économe en ressources et socialement inclusive (**encadré 3**). Si des pertes d'emploi dans certains secteurs sont inévitables, la création d'emplois à long terme devrait compenser ces pertes à court terme. En 2011, plusieurs organismes des Nations Unies et d'autres organismes ont publié conjointement des lignes directrices pour le passage à une économie verte (ONU 2011a, PNUE 2011f).

Encadré 3 : les dix principaux secteurs d'une économie verte

Des investissements de 2 % du PIB mondial dans dix secteurs clés sont nécessaires pour encourager le passage à une économie verte sobre en carbone, économe en ressources et socialement inclusive. Ces secteurs sont les suivants :

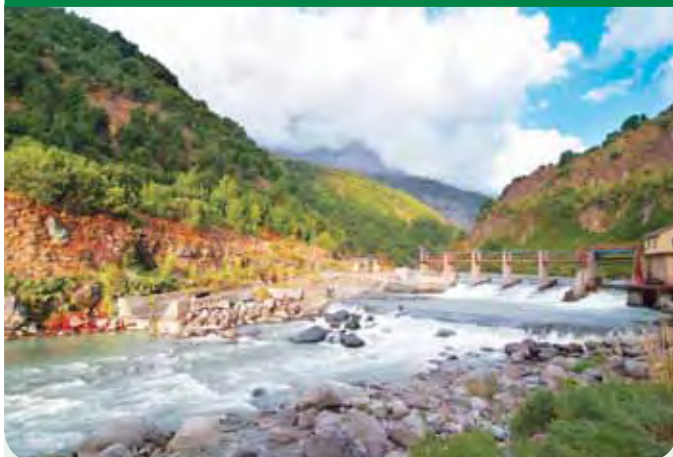
- | | |
|------------------------|-------------------------|
| • Agriculture | • Secteur manufacturier |
| • Pêche | • Déchets |
| • Eau | • Construction |
| • Forêts | • Transport |
| • Énergie renouvelable | • Tourisme |

Un ensemble de solutions fondées sur les énergies renouvelables existent ou ont été proposées et sont à divers stades de développement. Six catégories de technologies des énergies renouvelables, en particulier, pourraient contribuer à atténuer les changements climatiques à l'heure actuelle ou dans le proche avenir (GIEC 2011b) (**encadré 4**). En 2008, les énergies renouvelables ont représenté 12,9 % de l'offre totale d'énergie primaire. Les investissements dans ces énergies se sont accrus de 32 % entre 2004 et 2008 pour atteindre 211 millions de dollars, la Chine jouant un rôle de chef de file dans le développement des technologies des énergies renouvelables (REN21 2011, PNUE 2011f). Les investissements dans ces énergies devraient doubler pour atteindre 395 milliards de dollars d'ici à 2020 (Bloomberg 2011). Les énergies renouvelables pourraient représenter 77 % de l'offre totale d'énergie primaire d'ici à 2050 (GIEC 2011b).

En avril 2011 s'est tenue la première session de l'assemblée de l'Agence internationale des énergies renouvelables (IRENA). Les activités de cette organisation visent à favoriser l'utilisation des énergies renouvelables en tant qu'instrument de développement, ainsi qu'à faciliter le transfert de connaissances et de technologies et l'adoption de politiques qui encouragent les énergies renouvelables et à créer des partenariats avec les parties concernées pour promouvoir le financement de projets relatifs aux énergies renouvelables. Dans le cadre de l'initiative du Secrétaire général des Nations Unies visant à encourager les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et l'accès universel à des sources modernes d'énergie d'ici à 2030, l'année 2012 a été déclarée Année internationale de l'énergie durable pour tous (ONU 2012)



Encadré 4 : les technologies des énergies renouvelables pour lutter contre le changement climatique



Les projets hydroélectriques doivent être solidement planifiés et gérés pour éviter des incidences environnementales et sociales non souhaitées. Photo : Hydro Pacific

- La **bioénergie** peut être produite à partir des résidus agricoles et forestiers, des déchets d'élevage, des cultures énergétiques et d'autres flux de déchets organiques. Il existe un large éventail de ces technologies, mais leur degré de maturité technique varie dans une large mesure.
- Les technologies liées à l'**énergie solaire directe** captent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité et de la chaleur. L'énergie solaire est variable et intermittente, produisant des quantités différentes d'électricité suivant les jours et les moments de la journée. Plusieurs technologies utilisant l'énergie solaire sont relativement matures.
- L'**énergie géothermique** est produite à partir de l'énergie thermique existant à l'intérieur de la terre. Les centrales géothermiques, qui extraient de l'énergie de réservoirs qui sont suffisamment perméables et chauds, reposent sur des technologies assez matures. L'énergie géothermique peut aussi être utilisée directement pour le chauffage.
- L'**hydroélectricité** est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie des différents flux d'eau naturels en électricité. Les technologies hydrauliques sont très matures. Les réservoirs ont souvent des utilisations multiples en plus de la production d'électricité, comme l'approvisionnement en eau potable, la lutte contre les sécheresses et les inondations, et l'irrigation.
- L'**énergie des courants océaniques** exploite l'énergie thermique, cinétique et chimique de l'eau de mer. La plupart de ces technologies sont encore en phase de recherche-développement ou en phase pilote.
- L'**énergie éolienne** est produite à partir de l'énergie cinétique du vent, en utilisant de grosses éoliennes installées sur terre et sur mer. Les éoliennes terrestres sont fabriquées et utilisées en grand nombre, alors le développement des technologies offshore est prometteur. L'énergie du vent est intermittente et, dans certains emplacements, peu prévisible, mais les recherches indiquent que nombre d'obstacles techniques peuvent être surmontés.

Étant donné que la production d'énergie nucléaire n'est pas source d'émissions de gaz à effet de serre, contrairement à la combustion des combustibles fossiles, ce type d'énergie fait l'objet d'un intérêt accru depuis dix ans. L'accident de la centrale nucléaire de Fukushima en mars 2011, dû à une série de dysfonctionnements des équipements suite à un séisme d'ampleur dévastatrice de 8,9 sur l'échelle de Richter ainsi qu'à un tsunami, a encore alimenté le débat sur le rôle de l'énergie nucléaire pour un avenir énergétique sûr et durable. En 2010, 13,5 % de la production totale d'énergie au niveau mondial provenaient de centrales nucléaires. La France est le pays où, à 74,1 %, le pourcentage de la production d'électricité à partir de sources nucléaires est le plus important (NEI 2011).

L'Allemagne a annoncé des plans de fermeture de l'ensemble de ses centrales nucléaires d'ici à 2022. L'énergie nucléaire représentait jusqu'à 27,3 % de la production totale de sa production d'électricité totale en 2010 (NEI 2011). Ce pays prévoit d'investir beaucoup plus dans les énergies renouvelables. La France, en revanche, a annoncé qu'elle investira 1,4 milliard de dollars dans le développement de l'énergie nucléaire. Il s'agira notamment d'investir dans la recherche sur la sécurité. La fermeture et le démantèlement des réacteurs nucléaires – un problème international émergent – est le thème du chapitre 3 du présent *Annuaire*.

La plupart des émissions de gaz à effet de serre induites par l'activité humaine découlent des combustibles fossiles, qui sont encore la principale source énergétique au monde. L'expansion des activités d'exploration de pétrole se poursuit, notamment dans la région arctique. En 2011, par exemple, le Gouvernement américain a annoncé qu'il irait de l'avant dans l'attribution de concessions pour l'exploitation pétrolière au large de la côte de l'Alaska. Il a publié un plan quinquennal en vertu duquel 75 % des ressources estimées en pétrole et en gaz pourraient être exploitées au large de la côte de l'Alaska et dans des zones du golfe du Mexique (Département de l'Intérieur des États-Unis 2011). L'exploration de pétrole dans l'Arctique s'accroît en partie car la fonte de la calotte glaciaire permet à des pétroliers d'élargir leur accès à des zones jusque-là inaccessibles. L'activité humaine devrait continuer de s'intensifier dans les régions polaires. Les environnementalistes ont fait part de leurs préoccupations face à cette situation, craignant surtout d'éventuels déversements de pétrole (**encadré 5**).

Grâce aux améliorations apportées aux techniques de forage horizontal et de fracturation hydraulique, il est économiquement possible de produire de grands volumes de gaz naturel, en particulier de schiste, à partir de formations géologiques peu perméables (processus connu sous le nom de « fracking »). Le fracking implique généralement l'injection sous haute pression de produits chimiques à de très grandes profondeurs, entraînant des fractures dans les formations géologiques pour libérer du gaz (**figure 4**). C'est en Amérique du Nord qu'ont lieu les principales activités de développement et d'exploitation de gaz de schiste et d'autres formes non classiques de gaz naturel.

Malgré les avantages économiques considérables de la production et de l'utilisation de gaz de schiste et des autres types de gaz non



Encadré 5 : incidence des déversements de pétrole

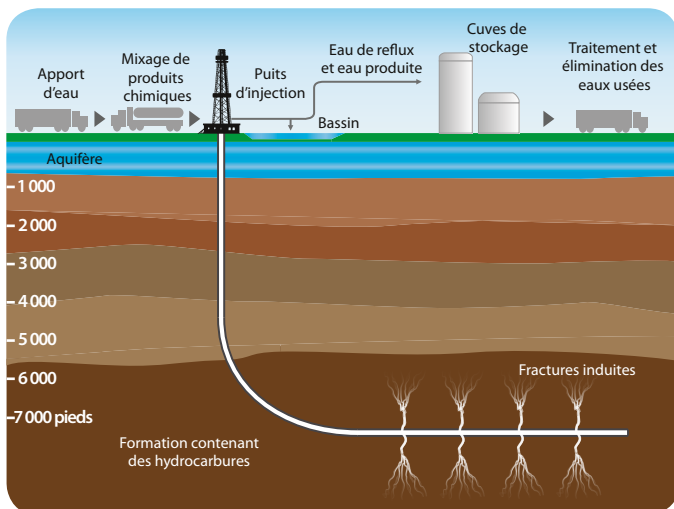


Contamination par le pétrole à la station d'évacuation de Bomu, à K-Dere, Ogoniland (Nigéria). Photo : PNUE

L'expansion des activités de forage de pétrole dans l'Arctique n'est pas sans risque. Une explosion majeure d'un puits est plus vraisemblable durant le forage du premier puits exploratoire dans une structure géologique qu'à tout autre moment. Aucune mesure visant à prévenir les effets des déversements de pétrole offshore n'a encore été mise en place pour faire face à un tel risque (Porta et Banks 2011). Il importe d'élaborer des normes spécifiques pour éviter les incidences les plus

négatives de ces déversements. La marée noire qui a eu lieu en 2010 dans le golfe du Mexique a fait l'objet d'une large attention dans les médias et a suscité de vives critiques publiques. Les déversements de pétrole au Nigéria ont fait l'objet de beaucoup moins d'attention internationale, encore qu'ils soient au cœur de désordres sociaux depuis des décennies. Une étude menée à l'invitation du Gouvernement nigérian a évalué les incidences sur l'environnement et la santé de la contamination par le pétrole de la région d'Ogoniland dans le pays (PNUE 2011g). Elle conclut que la large pollution par le pétrole dans cette région a un grave impact sur l'environnement et pose de graves risques pour la santé dans certaines communautés

La pollution par les hydrocarbures atteint un niveau très élevé dans le sol et les eaux souterraines dans la majorité des sites examinés. Les résidents d'Ogoniland sont exposés à une pollution chronique du fait des déversements de pétrole et également des puits de pétrole en feu, ce qui a accru les risques de cancer. Les cultures ont été endommagées et le secteur de la pêche a souffert en raison de la contamination persistante aux hydrocarbures de nombre de criques de la région. L'étude estime que le nettoyage de la pollution et la restauration durable de l'Ogoniland pourraient prendre 25 à 30 ans. Elle souligne donc la nécessité de mesures d'urgence pour minimiser les risques pour la santé publique ainsi que d'une action concertée à long terme pour restaurer l'environnement.



Graphique 4 : dans les opérations habituelles de fracturation hydraulique, des millions de litres d'eau, de produits chimiques et de sable sont injectés sous haute pression dans un puits. Le mélange de fluides sous pression entraîne des craquements dans la formation rocheuse, laissant le gaz naturel ou le pétrole remonter dans le puits. Source : adaptée de l'EPA des États-Unis (2011)

conventionnels (par exemple création d'emplois, plus grande indépendante énergétique), la fracturation hydraulique est controversée en raison des préoccupations généralisées qu'elle suscite quant à ses effets sur la santé et l'environnement (Osborn et al. 2011, US EPA 2011, Cathles 2012). Ces préoccupations sont notamment les suivantes :

- La contamination de l'eau potable, qui peut résulter de l'injection de produits chimiques à de grandes profondeurs durant le processus de fracturation hydraulique;
- L'empreinte écologique des opérations de fracturation, notamment les émissions fugitives de méthane;
- L'activité sismique, qui peut intervenir lorsque l'eau ou d'autres fluides sont injectés à de très grandes profondeurs durant ce processus.

L'Energy Information Agency des États-Unis a publié des évaluations de 48 bassins de gaz de schiste dans 32 pays, où se trouvent environ 70 formations de gaz de schiste (Energy Information Agency des États-Unis 2011). Si ces évaluations sont vraisemblablement appelées à être modifiées à mesure que de nouvelles informations deviennent disponibles, elles montrent que la base de ressources internationales de gaz de schiste est potentiellement vaste. À mesure que les opérations de fracturation se développent dans de nouvelles parties du monde, il faudrait étudier leurs incidences sur la santé et l'environnement dans les pays où, entre autres différences, l'expérience de ces opérations est limitée.

Conservation de la biodiversité mondiale

En 2011, Année internationale des forêts, plusieurs événements ont été consacrés à la protection et au développement durable des zones forestières. Les forêts revêtent une importance vitale pour la biodiversité et l'économie mondiale. Les moyens d'existence de 1,6 milliard de personnes en dépendent (ONU 2011b). La déforestation et la dégradation des forêts contribuent pour 15 à 17 % aux émissions mondiales de gaz à effet de serre (ONU-REDD 2011). En 2010, l'Accord de Cancún au titre de la CCNUCC a apporté son soutien au programme de Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD+) dans les pays en développement, afin qu'une valeur financière soit attribuée au carbone stocké dans les forêts. Lors de la réunion sur le climat de Durban, de nouvelles avancées ont été réalisées concernant l'ensemble de ce mécanisme, avec la mise en place de mesures de sauvegarde et d'options pour des financements axés sur les résultats, pour lesquels des approches fondées sur le marché pourraient être élaborées.

Non seulement la végétation terrestre, et surtout la végétation forestière, absorbe du CO₂ mais les lits d'herbes marines, les mangroves, les bancs de boue et d'autres terres humides côtières séquestrent aussi du carbone. Or, les incidences grandissantes des activités humaines sur les zones côtières, par exemple les établissements humains et l'aquaculture, ont détruit, selon les estimations, 65 % des habitats des prairies marines et des terres humides (Lotze et al. 2006). Les récifs coralliens sont l'un des écosystèmes du monde offrant la plus grande diversité biologique, représentant beaucoup d'avantages pour la société. Ils fournissent des ressources pour le développement de nouveaux produits par l'industrie pharmaceutique internationale, servent d'habitat à un quart de la biodiversité marine mondiale et soutiennent le développement économique local. Les scientifiques mettent en garde contre les graves menaces que font peser sur la vie dans l'océan la surpêche, la pollution et les changements climatiques (Rogers et Laffoley 2011). Par exemple, un tiers des poissons de l'océan Indien risquent de disparaître localement (Graham 2011). Les incidences conjuguées de facteurs comme la hausse des températures océaniques, l'acidification de l'eau de mer et l'absence d'oxygène pourraient conduire à l'effondrement des récifs coralliens et à la propagation des zones océaniques mortes. (Rogers et Laffoley 2011). En août 2011, des scientifiques de renom associés au projet de Recensement de la vie marine, évaluation sur une décennie des océans du monde achevée en 2010, ont présenté leurs résultats concernant les incidences des activités humaines sur les mers profondes (Ramirez-Llodra et al. 2011) **(encadré 6)**

Il ressort des recherches mondiales récentes que seulement 14 % des espèces mondiales sont connues (Mora et al. 2011). Dans l'océan, à peine 9 % de l'ensemble des espèces ont sans doute été identifiées. Cette absence de connaissances amène à se poser des questions critiques sur notre aptitude à conserver adéquatement la biodiversité mondiale, notamment face aux changements climatiques. Du fait des lacunes dans les connaissances scientifiques, il est difficile de protéger l'environnement des mers profondes. En outre, il n'existe pas de cadre

Encadré 6 : incidences des activités humaines sur les mers profondes



Les créatures bioluminescentes créent leur propre lumière dans les grandes profondeurs marines. Photo : Monterey Bay Aquarium Research Institute

- Tous les ans, environ 6,4 millions de tonnes de déchets sont déversés dans l'océan. Les résidus de plastiques se trouvant dans l'océan sont une préoccupation majeure car ils persistent et on ne connaît pas suffisamment les effets des micro-plastiques sur le milieu océanique. On craint que les produits chimiques transportés par ces particules n'entrent dans la chaîne alimentaire (PNUE 2011h).
- La pêche au chalut en mers profondes et les pratiques d'extraction minière endommagent les espèces qui ont souvent une longue durée de vie et se reproduisent lentement et qui, par conséquent, ne sont pas bien armées pour faire face à ces pressions croissantes.
- La principale question pour l'avenir est le changement climatique, car l'acidité croissante des océans influe sur l'aptitude des coraux et des coquillages à fabriquer squelettes et coquilles.

juridique général pour la protection des océans, lacune qui est considérée comme un nouveau défi à surmonter au XXI^e siècle dans le cadre du processus d'évaluation prospective du PNUE (Foresight Process) (PNUE 2012).

Un moyen de mettre fin aux dommages causés aux écosystèmes est la création de zones protégées. À la réunion de la Conférence des Parties à la Convention sur la diversité biologique (CDB), tenue en octobre 2010, les gouvernements ont fixé pour objectif de décupler la couverture des zones marines protégées, pour la faire passer de 1 % à 10 % d'ici à 2020 (CDB 2010). L'objectif pour les zones protégées terrestres est d'accroître leur étendue de 17 %. Cependant, l'efficacité et le rythme actuel d'établissement de nouvelles zones protégées pourraient ne pas suffire pour enrayer les tendances actuelles à la dégradation de la biodiversité (Mora et Sale 2011). Des problèmes se posent en raison de lacunes dans la couverture de zones critiques et d'un manque d'efficacité dans la gestion lorsqu'un développement s'impose d'urgence.

À terre, le braconnage a fait payer un lourd tribut aux populations de grands mammifères en 2011. L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) a déclaré officiellement l'extinction du rhinocéros

noir occidental après des décennies de braconnages (UICN 2011). En Afrique du Sud, 448 rhinocéros ont été tués en 2011, contre 13 en 2007. Au moment de l'établissement du présent rapport, le nombre de rhinocéros braconnés en 2012 en Afrique du Sud était déjà de 28 (Département sud-africain des affaires environnementales 2012). Globalement, 2010 a été l'année où le plus grand nombre d'éléphants ont été braconnés depuis 2002, la situation en Afrique centrale étant la plus problématique (CITES 2011a). La pauvreté, la médiocrité de la gouvernance et la demande croissante d'ivoire continuent à favoriser les activités de braconnage. La valeur de l'ivoire d'un grand éléphant mâle équivaut à 15 années de salaire d'un travailleur non qualifié (Wittemyer et al. 2011).

Malgré les accords internationaux sur le commerce de l'ivoire et les progrès réalisés dans certains pays, les interdictions nationales et internationales ne sont pas respectées dans la mesure nécessaire pour protéger les espèces. 2011 a été la pire année depuis des décennies, avec plusieurs importantes saisies d'ivoire. D'après les estimations, 23 tonnes d'ivoire, représentant le massacre de 2 500 éléphants, ont été récupérées grâce aux 13 plus grandes saisies d'ivoire de l'année. (TRAFFIC 2011). La plus grande partie de l'ivoire en question aurait été destinée à l'Asie.

Le commerce illicite implique l'utilisation frauduleuse de documents de la CITES, la pratique abusive de la chasse autorisée pour les trophées et le recours à des passeurs pour la contrebande de cornes. Le Plan d'action pour l'éléphant d'Afrique, lancé en 2011, devrait renforcer la capacité de mise en application des lois pour éviter le braconnage des éléphants et le commerce illicite d'ivoire. Le Consortium international de la lutte contre la criminalité liée aux espèces sauvages a mis en place en 2011 un programme en vertu duquel ceux qui s'adonnent à ces pratiques devront faire face à une réponse concertée, contrairement à la situation actuelle où le risque de détection et de punition est faible (CITES 2011b).



En Malaisie, plus de 3 000 cornes d'éléphants ont été saisies en l'espace de trois mois en 2011, témoignant d'une amélioration majeure des actions de mise en application de la loi dans ce pays. L'augmentation du taux de braconnage est liée à celle des prix de l'ivoire. Photo : ©TRAFFIC Asia

Le nombre en chute libre d'animaux au sommet de la chaîne alimentaire, comme les loups, les lions et les requins, est l'une des conséquences les plus généralisées de l'activité humaine sur le monde naturel (Estes et al. 2011). La perte de ces consommateurs dominants, due dans une large mesure à la chasse et à la fragmentation de l'habitat, déclenche une cascade complexe de modifications dans les écosystèmes. La mesure dans laquelle cette évolution restructure les écosystèmes est sous-évaluée, car les scientifiques ont du mal à démontrer ses effets de bout en bout. Cependant, les mutations de l'environnement s'accroissent, la nécessité de renforcer les interactions entre la science et la politique, afin que la prise de décisions soit fondée sur des données scientifiques rationnelles, devient encore plus urgente.

Les changements climatiques, considérés comme un multiplicateur des menaces pesant sur la biodiversité, pourraient entraîner la migration en masse de nombreuses espèces animales et végétales dans les années à venir. Ces modifications pourraient en outre menacer la survie des espèces, avec un impact significatif sur les cycles de l'énergie, du carbone et de l'eau et les cycles biogéochimiques de la terre. D'ici à 2100, 40 % des zones terrestres, comme les pâturages ou la toundra, pourraient changer d'état (Bergengren et al. 2011). Pour la première fois, les scientifiques ont mis au point un modèle qui permet d'évaluer la façon dont les animaux réagissent aux changements climatiques à la fois dans leurs comportements et leurs caractéristiques génétiques (Coulson et al. 2011). Ce modèle a été élaboré sur la base de données longitudinales tirées d'études des loups gris dans le parc national du Yellowstone aux États-Unis. Il devrait aider à prévoir les réactions aux changements climatiques d'un grand nombre de groupes d'animaux.

La période à venir

Les scientifiques considèrent que l'environnement s'est modifié rapidement pour passer d'un état stable pendant les 12 000 dernières années au cours desquelles la civilisation s'est développée (holocène) à un état futur inconnu comportant d'importantes caractéristiques différentes (désigné par certains par le terme anthropocène) (Steffen et al. 2011). Du fait de l'accroissement démographique, certaines des solutions à court terme du passé, comme la migration lorsque l'environnement est très endommagé ou devient moins productif, ne sont plus viables. Comme on peut le voir dans l'Arctique et sur le sol océanique, les incidences des activités humaines sont ressenties aujourd'hui bien au-delà de leur voisinage immédiat.

La terre est un système complexe avec des composantes fortement interdépendantes, dont certaines, comme les sols, sont très sous-évaluées. Par exemple, les avantages multiples du carbone dans le sol, décrits dans le chapitre 2 du présent *Annuaire*, commencent juste à susciter de l'intérêt en dehors des milieux scientifiques concernés. La science des systèmes terrestres en est encore à ses balbutiements, mais certains scientifiques avancent que l'humanité a déjà dépassé les limites en termes de changements climatiques, de dégradation de la biodiversité et de production excessive de nutriments, notamment l'azote et le phosphore (Rockström et al. 2009). Les autres domaines où

une action s'impose avec le plus d'urgence pour éviter que les dommages ne s'aggravent sont l'épuisement de l'ozone stratosphérique, l'acidification des océans, la consommation mondiale d'eau douce, les changements d'affectation des terres pour l'agriculture, la pollution de l'air et la pollution chimique.

Grâce aux nouvelles méthodes de communication et d'observation, notre compréhension de la complexité des problèmes environnementaux s'améliore. Nombre de décisions que nous prenons influent sur les écosystèmes qui constituent le système de soutien de la vie sur terre dont nous dépendons. Des scénarios des évolutions à venir peuvent nous aider à prévoir et à peser l'incidence de nos choix. Par exemple, des scénarios des modes de croissance urbaine ont été examinés dans une étude du Royaume-Uni (Eigenbrod et al. 2011). Dans un scénario de densification démographique, les zones urbaines connaissent une diminution de leur aptitude à faire face aux inondations – service considéré comme important eu égard aux phénomènes extrêmes plus fréquents et plus intenses qui devraient résulter des changements climatiques. Cette incidence est absente d'un scénario de faible densification, dans lequel on observe néanmoins une réduction de la superficie des terres disponibles pour l'alimentation et pour le stockage du carbone dans le sol, autant de services importants pour nourrir une population croissante et atténuer les changements climatiques. Avec une planification intelligente et une prise de décision en connaissance de cause sur la base de données scientifiques, des possibilités existent

de maximiser les aspects positifs des deux scénarios.

Ces arbitrages et le coût des mesures à prendre par rapport au coût de l'inaction doivent aussi être envisagés du point de vue international. Au niveau mondial, une place centrale sera accordée à plusieurs des actions à engager lors de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable (Rio+20) qui se tiendra en juin 2012. Une attention particulière sera accordée au cadre institutionnel du développement durable et à l'économie verte dans le contexte du développement durable et de l'éradication de la pauvreté.

Eu égard aux nouvelles avancées scientifiques et aux évolutions intervenues durant l'année écoulée, les préoccupations suscitées par la croissance démographique, l'utilisation des ressources, les changements climatiques, la pollution généralisée et la dégradation de la biodiversité appellent des mesures à tous les niveaux, depuis le niveau local jusqu'au niveau mondial pour répondre aux enjeux du développement durable. L'une des principales instigatrices mondiales des actions sur le terrain, le Professeur Wangari Maathai, Prix Nobel de la paix et fondatrice du mouvement de la Ceinture verte au Kenya, nous a malheureusement quittés en septembre 2011. Il faut poursuivre son œuvre en faveur de l'environnement. Les responsables locaux, la société civile, les entreprises et les décideurs partout dans le monde ont un rôle important à jouer pour surmonter certains des obstacles les plus importants à la préservation de l'environnement.

Marché grouillant de monde à Dhaka (Bangladesh). Alors que la population mondiale s'accroît rapidement, des mesures sont indispensables pour faire face aux enjeux environnementaux et répondre ainsi à la demande croissante de denrées alimentaires, tout en assurant un développement durable. Photo : IFPRI



Regards sur 2011



Les prix alimentaires mondiaux atteignent un sommet historique pour le septième mois consécutif.

L'Année internationale des forêts proclamée par l'ONU commence avec le lancement du rapport de 2011 de la FAO sur la Situation des forêts du monde, qui souligne le rôle important que l'industrie forestière peut jouer dans une économie verte.

La Table ronde sur les biocarburants durables lance un système de certification mondial lors du Congrès mondial des marchés des biocarburants, tenu à Rotterdam (Pays-Bas). Ce système devrait améliorer la durabilité de l'industrie mondiale des biocarburants.



L'Organisation des Nations Unies soutient la Journée mondiale des oiseaux migrateurs, axée cette année sur l'utilisation des sols et l'utilisation durable des sites naturels.

Le Congrès mondial de l'OMM, organe suprême de l'Organisation, se réunit à Genève pour examiner l'orientation stratégique de l'OMM pour 2012-2015.

Pour la première fois en presque 30 ans, l'Organisation des Nations Unies déclare officiellement que des populations sont touchées par la famine : deux régions de la Somalie sont concernées.

Une nouvelle interdiction visant à éviter la pollution par les produits pétroliers lourds entre en vigueur dans la région de l'Antarctique, suite à une modification de la Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires (MARPOL).



Le Professeur Wangari Maathai, Prix Nobel de la Paix et fondatrice du Mouvement de la Ceinture verte au Kenya décède à Nairobi à l'âge de 71 ans.

La Conférence internationale Tunza pour les jeunes et les enfants organisée par le PNUE adopte la Déclaration de Bandung, qui demande aux participants à la réunion

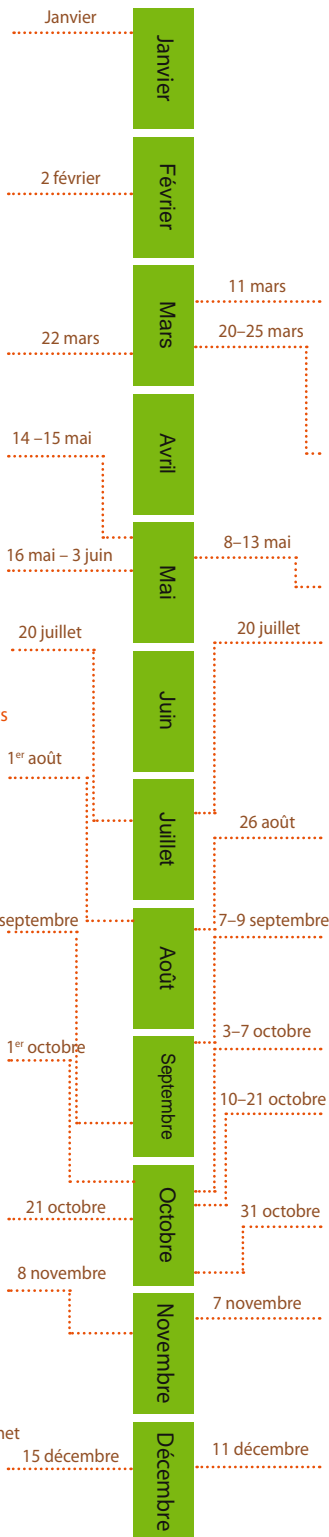
Rio+20 de prendre en compte les besoins des enfants et des jeunes.

Les représentants des 118 membres de la Convention de Bâle s'entendent pour débloquent un amendement interdisant l'exportation de déchets dangereux des pays membres de l'OCDE vers les pays non membres.

Le PNUE annonce que la Campagne pour un milliard d'arbres a atteint le chiffre symbolique de 12 milliards d'arbres plantés. Cette campagne vise à améliorer la qualité de vie des communautés grâce à ses multiples avantages.



Le Ministère de l'environnement et de l'eau des Émirats arabes unis et l'Agence de l'environnement d'Abu Dhabi signent avec le PNUE la Déclaration un œil sur la planète, qui met l'accent sur l'importance du partage de données environnementales et de leur utilisation pour la prise de décisions.



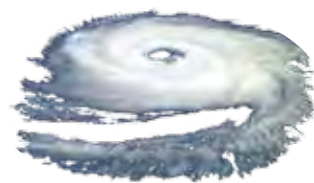
Les équipements de la centrale nucléaire de Fukushima au Japon souffrent d'une série de défaillances à la suite d'un séisme et d'un tsunami de grande ampleur



Les participants à la cinquième Conférence internationale sur les déchets marins approuvent l'Engagement d'Honolulu, qui expose plusieurs approches pour la réduction de ces déchets et prévoit des campagnes de sensibilisation du public.

La troisième session de la Plateforme mondiale pour la réduction des risques de catastrophes débouche sur des engagements pour améliorer la préparation aux catastrophes.

Le Conseil de sécurité de l'ONU tient une session extraordinaire pour examiner son rôle dans la lutte contre les changements climatiques. Le Secrétaire général met en garde contre les menaces que les changements climatiques font peser sur la paix et la sécurité internationales.



Les participants à la Semaine mondiale de l'eau publient la Déclaration de Stockholm, appelant de leurs vœux une amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau et l'accès à l'eau pour tous.

Le Partenariat mondial sur les sols est lancé par la FAO. Il vise à renforcer les politiques propres à assurer l'expertise technique nécessaire à la protection et à la gestion des sols.

La Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques, nouveau forum des Nations Unies sur la biodiversité, tient sa première session à Nairobi (Kenya).

La dixième session de la Conférence des Parties à la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, qui a eu lieu en République de Corée, passe en revue les possibilités de progresser dans la lutte contre la désertification, la dégradation des terres et la sécheresse.

La population mondiale ayant passé le cap des 7 milliards, de plus en plus de préoccupations se font jour quant aux possibilités d'assurer à l'avenir un approvisionnement suffisant en produits alimentaires et en eau à une population croissante.

Le secrétariat de l'UICN et de la Convention sur la diversité biologique signent un accord sur les espèces envahissantes, qui permettra d'identifier les espèces envahissantes et leurs voies d'entrée.

La Plateforme de Durban est adoptée lors de la dix-septième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC et la septième session de la Conférence des Parties servant de réunion des Parties au Protocole de Kyoto, tenues à Durban (Afrique du Sud). Cette Plateforme prolonge la durée de vie du Protocole de Kyoto et établit la structure d'un Fond vert pour le climat



Deuxième session de l'assemblée de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), à Abu Dhabi (Émirats arabes unis)	12-13 janvier	Janvier	16-19 janvier 22-27 janvier	Cinquième Sommet mondial sur les énergies du futur, Abu Dhabi (Émirats arabes unis)
Conférence mondiale sur les connexions terre-océan/troisième session de la Réunion intergouvernementale chargée d'examiner la mise en œuvre du Programme mondial d'action pour la protection du milieu marin, Manille (Philippines)	23-27 janvier	Janvier	31 janvier-3 février	Conférence sur les frontières de l'Arctique : énergies du Grand Nord, Tromsø (Norvège)
Douzième session extraordinaire du Conseil d'administration/Forum ministériel mondial sur l'environnement, Nairobi (Kenya)	20-22 février 27 février	Février	5-6 février	Forum des Ministres de l'environnement d'Amérique latine et des Caraïbes, Quito (Équateur)
Forum de l'OCDE sur les compétences vertes, Paris (France)		Février		Deuxième Sommet de l'eau Asie-Pacifique, Bangkok (Thaïlande)
Sixième Forum mondial de l'eau, Marseille (France)	12-17 mars	Mars		
Réunion internationale d'experts de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) sur la sécurité nucléaire et les combustibles usés, suite à l'accident survenu à la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, Vienne (Autriche)	19-22 mars	Mars	26-27 mars 26-29 mars	Troisième réunion intersessions de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable, New York (États-Unis)
B4E Business for the Environment – Sommet mondial, Berlin (Allemagne)	22-25 avril	Avril	16-21 avril	Conférence « La Planète sous pression », Londres (Royaume-Uni)
Conférence de l'Année polaire internationale 2012 : De la connaissance à l'action, Montréal (Canada)	22-27 avril	Avril		Deuxième session de la réunion plénière de la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques, Panama (Panama)
Vingt-sixième session de la Commission des forêts de l'Amérique du Nord, Québec (Canada)	8-9 mai 21-23 mai	Mai	12 mai-27 août 29-31 mars	Foire mondiale Expo 2012, sur le thème « Pour des océans et des côtes vivants », Yeosu (République de Corée)
Conférence mondiale sur les océans, le climat et la sécurité, Boston (États-Unis)		Mai		Deuxième Conférence sur l'adaptation au changement climatique international, Tucson (États-Unis)
Troisième réunion préparatoire de la Conférence des Nations Unies sur le développement durable, Rio de Janeiro (Brésil)	13-15 juin	Juin	5 juin	Journée mondiale de l'environnement - « Économie verte : en faites-vous partie? »
Conférence des Nations Unies sur le développement durable (Rio +20), Rio de Janeiro (Brésil)	20-22 juin	Juin		
Trentième session du Comité des pêches de la FAO, Rome (Italie)	9-13 juillet	Juillet	6-13 juillet	Onzième session de la Conférence des Parties à la Convention de Ramsar sur les zones humides d'importance internationale, Bucarest (Roumanie)
Conférence sur le thème de la science à la politique marquant le quarantième anniversaire de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués, Vienne (Autriche)	27-29 juillet	Juillet	23-27 juillet	Soixante-deuxième réunion du Comité permanent de la CITES, Genève (Suisse)
Congrès sur l'énergie et la durabilité- Bordure du Pacifique, Hiroshima (Japon)	6-9 août	Août	29-31 août	Conférence internationale sur la durabilité, Bâle (Suisse)
Congrès de 2012 de l'Union internationale pour la conservation de la nature, Jeju (République de Corée)	6-15 septembre	Septembre	17-21 septembre	Quatorzième session de la Conférence des Ministres africains de l'environnement, Dar es Salaam (Tanzanie)
Réunion conjointe FAO/OMS sur les résidus de pesticides, Rome (Italie)	6-20 septembre	Septembre	17-21 septembre	Troisième session de la Conférence internationale sur la gestion des produits chimiques, Nairobi (Kenya)
Troisième Colloque international sur les océans dans un monde à forte teneur en CO ₂ , Monterey (États-Unis)	24-27 septembre	Septembre	24-26 septembre	Conférence internationale PNUE/FEM sur la science de l'eau, Bangkok (Thaïlande)
Onzième réunion de la Conférence des Parties à la Convention des Nations Unies sur la diversité biologique, Hyderabad (Inde)	8-19 octobre	Octobre		
Dix-huitième session de la Conférence des Parties à la CCNUCC et huitième session de la Réunion des Parties au Protocole de Kyoto, Doha (Qatar).	26 novembre-7 décembre	Novembre		
Quatrième Conférence internationale sur l'irrigation et le drainage durables : gestion, technologies et politiques, Adelaïde (Australie)	11-13 décembre	Décembre		



2012

Calendrier des événements



Références

- Anyah, R. et Qui, W. (2011). Characteristic 20th and 21st century precipitation and temperature patterns and changes over the Greater Horn of Africa. *International Journal of Climatology*. Publié en ligne le 4 janvier. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.2270/abstract>
- Bergengren, J.C., Walier, D.E. et Yung, Y.L. (2011). Ecological sensitivity: a biospheric view of climate change. *Climatic Change*, 107(3-4): 433-457
- Bloomberg (Bloomberg New Energy Finance) (2011). Global Renewable Energy Market Outlook: Executive Summary. <http://www.bnef.com/WhitePapers/download/53>
- Cathles, III, L.M., Brown, L., Taam, M. et Hunter, A. (2012). A commentary on "The greenhouse-gas footprint of natural gas in shale formations" par R.W. Howarth, R. Santoro et Anthony Ingraffea. *Climatic Change*. Publié en ligne le 3 janvier. <http://www.springerlink.com/content/x001g12t2332462p/>
- CITES (2011a). Status of elephant populations, levels of illegal killing and the trade in ivory: a report to the standing committee of CITES. SC61 Doc. 44.2 (Rev.1) annexe 1. <http://www.cites.org/eng/com/sc/61/E61-44-02-A1.pdf>
- CITES (2011b). The International Consortium on Combatting Wildlife Crime. <http://www.cites.org/eng/prog/iccwc.shtml>
- Conseil de sécurité de l'ONU (2011). Le Conseil de sécurité déclare que « pour les questions relatives au maintien de la paix et de la sécurité internationales dont il est saisi, l'analyse des conflits et l'information contextualisée concernant, entre autres, les répercussions des changements climatiques sur la sécurité sont importantes lorsque de tels vecteurs de conflit rendent difficile la mise en œuvre du mandat du Conseil ou compromettent la consolidation de la paix. » Division de l'information et des médias, 20 juillet. <http://www.un.org/News/Press/docs/2011/sc10332.doc.htm>
- Convention sur la diversité biologique (2010). A new era of living in harmony with nature is born at the Nagoya Biodiversity Summit. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, Montréal
- Coulson, T., MacNulty, D.R., Stahler, D.R., von Holdt, B., Wayne, R.K. et Smith, D.W. (2011). Modeling Effects of Environmental Change on Wolf Population Dynamics, Trait Evolution, and Life History. *Science*, 334(6060), 1275-1278
- Département de l'intérieur des États-Unis (2011). Proposed Outer Continental Shelf Oil and Gas Leasing Program 2012-2017. http://www.boem.gov/uploadedFiles/Proposed_OCS_Oil_Gas_Lease_Program_2012-2017.pdf
- Département des affaires économiques et sociales de l'ONU (2011). Perspectives de la population mondiale, Révision de 2010 : questions fréquemment posées (mis à jour le 31 octobre 2011). <http://esa.un.org/wpp/Other-Information/faq.htm#q3>
- Département sud-africain des affaires environnementales (2012). <http://www.environment.gov.za/>
- Eigenbrod, F., Bell, V.A., Davies, H.N., Heinemeyer, A., Armstrong, P.R. et Gaston, K.J. (2011). The impact of projected increases in urbanization on ecosystem services. *Proceedings of the Royal Society*, 278(1722), 3201-3208
- Energy Information Agency des États-Unis (EIA) (2011). World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States, 5 avril <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshale-gas/>
- Environmental Protection Agency des États-Unis (EPA) (2011). *Plan to study the potential impacts of hydraulic fracturing on drinking water resources*. http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/class2/hydraulicfracturing/upload/FINAL-STUDY-PLAN-HF_Web_2.pdf
- Estes, J.A., Terborgh, J., Brashares, J.S., Power, M.E., Berger, J., Bond, W.J., Carpenter, S.R., Essington, T.E., Holt, R.D., Jackson, J.B.C., Marquis, R.J., Oksanen, L., Oksanen, T., Paine, R.T., Pickett, E.K., Ripple, W.J., Sandin, S.A., Marten, S., Schoener, T.W., Shurin, J.B., Sinclair, A.R.E., Soulé, M.E., Virtanen, R. et Wardle, D.A. (2011). Trophic downgrading of planet earth. *Science*, 333(6040), 301-306
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2011a). *Climate change, water and food security*. <http://www.fao.org/docrep/014/i2096e/i2096e00.pdf>
- FAO (2011b). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk, Summary Report*. http://www.fao.org/nr/water/docs/SOLAW_EX_SUMM_WEB_EN.pdf
- FEWSNET (Réseau de systèmes d'alerte rapide sur les risques de famine) (2011). Famine thresholds surpassed in three new areas of Southern Somalia, 3 août. http://www.fews.net/docs/Publications/F3NAU_FEWSNET_030811press%20release_final.pdf
- GIEC (Groupe d'experts international sur l'évolution du climat) (2011a). Résumé à l'intention des décideurs. Dans *Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M. et Midgley, P.M. (eds.). http://www.ipcc-wg2.gov/SREX/images/uploads/SREX-SPM_Approved-HiRes_opt.pdf
- GIEC (2011b). *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Etable par le Groupe de travail III. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlömer, S. et von Stechow, C. (eds.). http://srren.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Full_Report.pdf
- Graham, N.A.J., Chabanet, P., Evans, R.D., Jennings, S., Letourneur, Y., MacNeil, M.A., McClanahan, T.R., Ohman, M.C., Polunin, N.V.C. et Wilson, S.K. (2011). Extinction vulnerability of coral reef fishes. *Ecology Letters*, 14(4), 341-348
- Haut-Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (2010). *Beyond Emergency Relief: Longer-term trends and priorities for UN agencies in Darfur*. http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/6AAEE62B2DC5EE-8D852577AE0071F8E7-Full_Report.pdf
- Institut international pour le développement durable (IISD) (2011). Green Procurement. http://www.iisd.org/business/tools/bt_green_pro.aspx
- Lobell, D., Schlenker, W. et Costa-Roberts, J. (2011). Climate Trends and Global Crop Production since 1980. *Science*, 333(6042), 616-620
- Lotze, H.K., Lenihan, H.S., Bourque, B.J., Bradbury, R.H., Cooke, R.G., Kay, M.C., Kidwell, S.M., Kirby, M.X., Peterson, C.H. et Jackson, J.B.C. (2006). Depletion, Degradation, and Recovery Potential of Estuaries and Coastal Seas. *Science*, 312(5781), 1806-1809
- Mora, C. et Sale, P.F. (2011). Ongoing global biodiversity loss and the need to move beyond protected areas: a review of the technical and practical shortcomings of protected areas on land and sea. *Marine Ecology Progress Series*, 434, 251-266
- Mora, C., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B. et Worm, B. (2011). How Many Species Are There on Earth and in the Ocean? *PLoS Biology*, 9(8): e1001127. <http://www.plosbiology.org/article/info:doi/10.1371/journal.pbio.1001127>
- Munang, R. et Nkem, J.N. (2011). Using small-scale adaptation actions to address the food crisis in the Horn of Africa: Going beyond food aid and cash transfers. *Sustainability*, 3(9), 1510-1516
- Munich Re (2012). Global natural catastrophe update. 2011 natural catastrophe year in review. http://www.munichreamerica.com/webinars/2012_01_natcatreview/munichre_iii_2011natcatreview.pdf
- NASA (2010). Global Transport of Black Carbon, Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio. <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a000000/a003600/a003665/index.html>
- NEI (Institut de l'énergie nucléaire) (2011). Nuclear Energy Around the World. http://www.nei.org/resourcesandstats/nuclear_statistics/worldstatistics/
- NOAA (2012). Extreme Weather 2011. <http://www.noaa.gov/extreme2011/>
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis) (2011). Billion Dollar U.S. Weather/Climate Disasters. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/reports/billionz.html>
- NSIDC (National Sea and Ice Data Center des États-Unis) (2011). Arctic sea ice near record lows. <http://nsidc.org/arcticseaicenews/2011/09/arctic-sea-ice-near-record-lows/>
- OMM (Organisation météorologique mondiale) (2011a). Provisional Statement on the Status of the Global Climate. http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/gcs_2011_en.html
- OMM (2011b). The Global Framework for Climate Services. http://www.wmo.int/pages/gfcs/gfcs_en.html
- OMM (2011c). *WMO Greenhouse Gas Bulletin*, 7. http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/documents/GHGBulletin.pdf
- ONU (2011a). *Working towards a Balanced and Inclusive Green Economy: A United Nations System-wide Perspective. Prepared by the Environment Management Group*. <http://www.unemg.org/Portals/27/Documents/IMG/GreenEconomy/report/GreenEconomy-Full.pdf>

ONU (2011b). Forests for People: Fact Sheet. http://www.un.org/esa/forests/pdf/session_documents/unff9/Fact_Sheet_ForestsandPeople.pdf

ONU (2012). UN urges achieving sustainable energy for all as International Year kicks off. News Centre, 16 janvier. <http://www.un.org/apps/news/story.asp?Cr=energy&NewsID=40951>

ONU-REDD (Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts dans les pays en développement) (2011). *REDD+ and a Green Economy: Opportunities for a mutually supportive relationship*. Sukhdev, P., Prabhu, R., Kumar, P., Bassi, A., Patwa-Shah, W., Enters, T., Labbate, G. et Greenwalt, J. (eds.) Synthèse No. 1 d'ONU-REDD. http://www.unredd.net/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=6345&Itemid=53

Osborn, S.G., Avner, V., Warner, N.R. et Jackson, R.B. (2011). Methane contamination of drinking water accompanying gas-well drilling and hydraulic fracturing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States*, 108(20), 8172-8176. <http://www.pnas.org/content/108/20/8172.full>

Pall, P., Aina, T., Stone, D., Stott, P., Nozawa, T., Hilberts, A., Lohann, D. et Allen, M. (2011). Anthropogenic greenhouse gas contribution to flood risk in England and Wales in autumn 2000. *Nature*, 470, 382-385

PNUE (Programme des Nations Unies sur l'environnement) (2010). Une évaluation préliminaire. http://www.unep.org/publications/ebooks/emissionsgapreport/pdfs/GAP_REPORT_SUNDAY_SINGLES_LOWRES.pdf

PNUE (2011a). Livelihood Security: Climate Change, Migration and Conflict in the Sahel. Établi grâce à un partenariat technique entre le PNUE, l'Organisation internationale des migrations (OIM), le Bureau de la coordination des affaires humanitaires et l'Université des Nations Unies http://postconflict.unep.ch/publications/UNEP_Sahel_EN.pdf

PNUE (2011b). Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth. Rapport du Groupe de travail sur le découplage à l'International Resource Panel. Fischer-Kowalski, M., Swilling, M., von Weizsäcker, E.U., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Hennicke, P., Romero Lankao, P., Siriban Manalang, A. et Sewerin, S. (auteurs). http://www.unep.org/resourcepanel/decoupling/files/pdf/decoupling_report_english.pdf

PNUE (2011c). Biofuels Vital Graphics: Powering a Green Economy. <http://www.grida.no/publications/vg/biofuels/>

PNUE (2011d). Bridging the Emissions Gap. http://www.unep.org/pdf/UNEP_bridging_gap.pdf

PNUE (2011e). HFCs: A Critical Link in Protecting the Climate and the Ozone Layer. http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/HFC_report.pdf

PNUE (2011f). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication. http://www.unep.org/greeneconomy/Portals/88/documents/ger/ger_final_dec_2011/Green%20EconomyReport_Final_Dec2011.pdf

PNUE (2011g). Environmental Assessment of Ogoniland. http://postconflict.unep.ch/publications/OEA/UNEP_OEA.pdf

PNUE (2011h). *Annuaire du PNUE 2011 - Notre environnement mondial : les problèmes émergents*. <http://www.unep.org/yearbook/2011h/>

PNUE (2012). 21 Issues for the 21st Century: Result of the UNEP Foresight Process on Emerging Environmental Issues. Alcamo, J. et Leonard, S.A. (eds.).

PNUE et IWMI (Institut international de l'eau) (2011). *An Ecosystem Services Approach to Water and Food Security*. http://www.iwmi.cgiar.org/topics/ecosystems/PDF/Synthesis_Report-An_Ecosystem_Services_Approach_to_Water_and_Food_Security_2011_UNEP-IWMI.pdf

PNUE et OMM (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone : Summary for Decision Makers*. http://www.unep.org/dewa/Portals/67/pdf/Black_Carbon.pdf

PNUE, AIE et Oeko-Institut (2011). *The Bioenergy and Water Nexus*. http://www.unep.org/pdf/Water_Nexus.pdf

Porta, L. et Bankes, N. (2011). Becoming Arctic Ready: Policy Recommendations for Reforming Canada's Approach to Licensing and Regulating Offshore Oil and Gas in the Arctic. The Pew Environment Group. http://www.pewenvironment.org/uploadedFiles/PEG/Publications/Report/PewOilGasReport_web.pdf

PROVIA (Programme de recherches sur le changement climatique : vulnérabilité, impacts et adaptation) (2011). What is Provia? <http://www.provia-climatechange.org/ABOUT/WhatisPROVIA/tabid/55216/Default.aspx>

Ramirez-Llodra, E., Tyler, P.A., Baker, M.C., Bergstad, O.A., Clark, M.R., Escobar, E., Levin, L.A., Menot, L., Rowden, A.A., Smith, C.R. et Van Dover, C.L. (2011). Man and the Last Great Wilderness: Human Impact on the Deep Sea. *PLOS ONE*, 6(8). <http://www.plosone.org/article/info%3Adoi%2F10.1371%2Fjournal.pone.0022588>

REN21 (Réseau d'action pour les énergies renouvelables au XXI^{ème} siècle) (2011). *Renewables 2011 Global Status Report*. http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR2011.pdf

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, III, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H.J., Nykvist, B., de Wit, C.A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sverker Sörlin, S., Snyder, P.K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R.W., Fabry, V.J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P. et Foley, J.A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475

Rogers, A.D. et Laffoley, D.d'A. (2011). *International Earth system expert workshop on ocean stresses and impacts. Summary workshop report*. IPSO (Programme international sur l'état des océans), Oxford, Royaume-Uni. http://www.stateoftheocean.org/pdfs/1906_IPSO-LONG.pdf

Shindell, D., Kuylenstierna, J.C.I., Vignati, E., van Dingenen, R., Amann, M., Klimont, Z., Anenberg, S.C., Müller, N., Janssens-Maenhout, G., Raes, F., Schwartz, J., Faluvegi, G., Pozzoli, L., Kupiainen, K., Höglund-Isaksson, L., Emberson, L., Streets, D., Ramanathan, V., Hicks, K.,

Kim Oanh, N.T., Milly, G., Williams, M., Demkine, V. et Fowler, D. (2012). Simultaneously Mitigating Near-Term Climate Change and Improving Human Health and Food Security. *Science*, 335(6065), 183-189

Steffen, W., Rockström, J. et Costanza, R. (2011). How defining planetary boundaries can transform our approach to growth. *Solutions*, 2(3). <http://www.theolutionsjournal.com/node/935>

Stott, P.A., Allen, M., Christidis, N., Dole, D., Hoerling, M., Huntingford, C., Pall, P., Perlwitz, J. et Stone, D. (2011). Attribution of Weather and Climate-Related Extreme Events, WCRP OSC Climate Research in Service to Society, Denver, Colorado, USA. <http://www.wcrp-climate.org/conference2011/documents/Stott.pdf>

Stratégie internationale des Nations Unies pour la prévention des catastrophes (2011). Au milieu de 2011, les pertes économiques estimées s'élèvent déjà à 265 milliards de dollars – la Stratégie internationale pour la prévention des catastrophes est plus nécessaire que jamais, déclare l'ONU <http://www.unisdr.org/archive/20779>

TRAFFIC (2011). <http://www.traffic.org/home/2011/12/29/2011-annus-horribilis-for-african-elephants-says-traffic.html>

IUCN (Union internationale pour la conservation de la nature) (2011). Red List Update: Another leap towards the barometer of life. Communiqué de presse, 10 novembre. <http://www.iucn.org/knowledge/news/?uNewsID=8548>

Ververs, M. (2012). The East African Food Crisis: Did Regional Early Warning Systems Function? *The Journal of Nutrition*, 142(1), 131-133

Wittemyer, G., Daballen, D. et Douglas-Hamilton, I. (2011). Poaching policy: Rising ivory prices threaten elephants. *Nature*, 476, 282-283

WWF (World Wildlife Fund) (2012). Record Rhino Poaching in South Africa. Press release, 12 janvier. <http://www.worldwildlife.org/who/media/press/2012/WWFPresitem26351.html>





Les avantages du carbone dans le sol

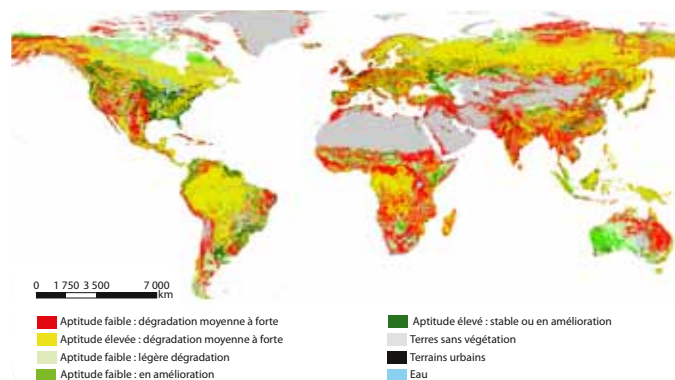
Les multiples avantages environnementaux, économiques et sociétaux de la gestion des sols

Compte tenu de l'accroissement de la population mondiale, d'ici à deux décennies la demande mondiale de produits alimentaires devrait s'accroître de 50 %, la demande d'eau de 35 à 60 % et la demande d'énergie de 45 %. Les sols du monde sont donc de plus en plus sollicités. Le carbone qu'ils contiennent joue un rôle vital dans la régulation du climat, l'approvisionnement en eau et la diversité et, par conséquent, dans la capacité qu'ont les écosystèmes à fournir des services essentiels au bien-être humain. Pour assurer une gestion des sols permettant de tirer au mieux parti des multiples avantages économiques, sociétaux et environnementaux correspondants, des politiques intégrées et des mesures visant à encourager la préservation et l'augmentation du carbone contenu dans les sols sont indispensables. Des actions décisives doivent être engagées pour limiter les pertes de carbone du sol dues à l'érosion ainsi que les émissions de dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Dans le premier mètre des sols du monde sont stockés environ 2 200 Gt (milliards de tonnes) de carbone, dont les deux tiers sous forme de matière organique (Batjes 1996). C'est là plus de trois fois le volume du carbone se trouvant dans l'atmosphère. Cependant, la dégradation des sols entraîne des pertes de carbone (**graphique 1**). Des gaz à effet de serre sont aussi rejetés dans l'atmosphère sous l'effet de leur décomposition accélérée due aux changements dans l'affectation des terres ou à des pratiques de gestion des terres peu durables (Lal 2010a, b).

Face à une nouvelle intensification de l'utilisation des sols pour faire face à la demande mondiale de denrées alimentaires, d'eau et d'énergie (Foresight 2011), une gestion des sols propre à préserver les stocks de carbone voire à les accroître revêt une importance cruciale si l'on veut répondre aux enjeux à court terme et conserver cette ressource précieuse pour les générations futures. Depuis le XIX^e siècle, 60 % environ du carbone contenu dans les sols et la végétation au niveau mondial ont été perdus en raison de l'utilisation des sols (Houghton 1995). Au cours des 25 dernières années, un quart de la superficie terrestre mondiale a souffert d'un recul de sa productivité et de son aptitude à fournir les services naturels des écosystèmes en raison des pertes de carbone dans le sol (Bai et al. 2008).

L'érosion des sols associée aux pratiques agricoles conventionnelles peut se produire à un rythme 100 fois supérieur à celui auquel le sol se reconstitue naturellement (Montgomery 2007). Partout dans le monde, le drainage des tourbières se traduit par la disparition de tourbe riche en carbone à une cadence 20 fois plus rapide que le taux auquel celle-ci s'accumule (Joosten 2009).



Graphique 1 : la dégradation des terres peut être définie comme la réduction de la capacité de ces écosystèmes à fournir des services sur une période donnée. Les pressions dues à l'utilisation des sols peuvent être la cause de cette dégradation. Les pertes du carbone contenu dans les sols sont une forme importante de dégradation pouvant se traduire par un recul de leur productivité et de l'aptitude des écosystèmes à fournir d'autres services. Cette carte illustre l'aptitude des écosystèmes à fournir leurs services (faible et élevée) et l'orientation des changements (forte dégradation, faible dégradation, stable, en amélioration). Ces résultats globaux donnent une première indication des pressions et des tendances aux niveaux régional et national et permettent de réaliser des comparaisons entre les différentes utilisations des terres ou régions géographiques. Source : Nachtergaele et al. (2011)

L'agriculture sur des tourbières drainées dans le Kalimantan central (Indonésie) conduit à des pertes énormes de carbone du sol. *Crédit : Hans Joosten*

Auteurs : Reynaldo Victoria (président), Steven Banwart, Helaina Black, John Ingram, Hans Joosten, Eleanor Milne y Elke Noellemeyer. **Rédacteur scientifique :** Yvonne Baskin

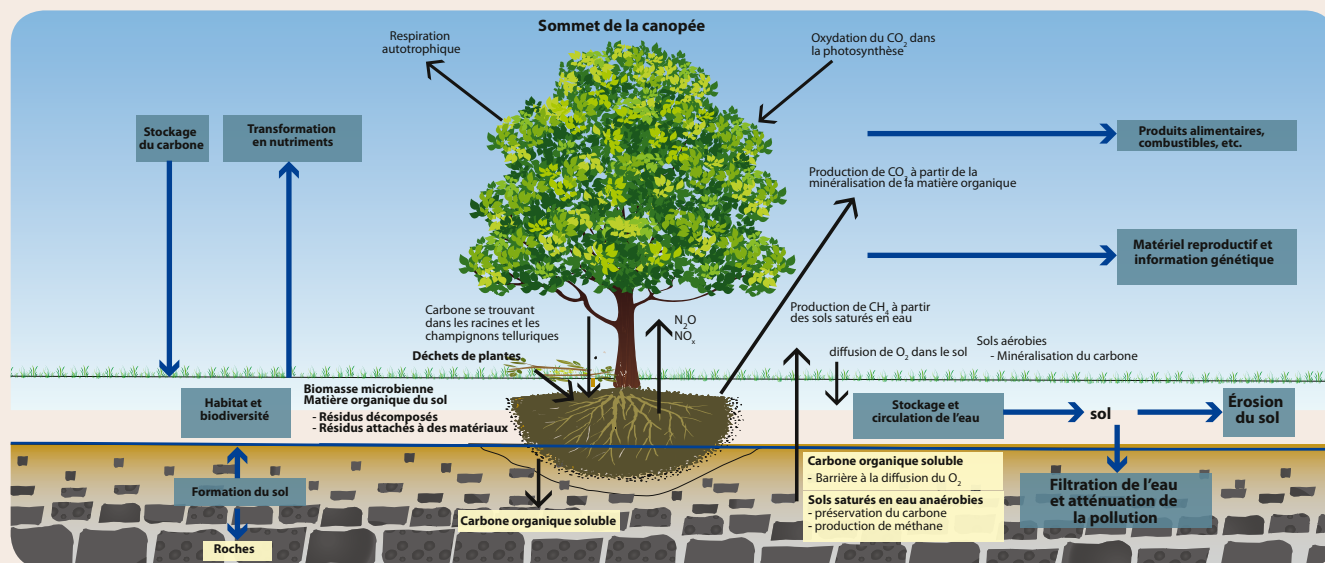
Encadré 1 : matière organique et carbone du sol

Les sols sont au cœur de « la zone critique » de la terre, fine couche extérieure située entre le sommet de la canopée et le bas des aquifères souterrains dont dépendent les hommes pour la plupart des ressources dont ils ont besoin (National Research Council des États-Unis 2001, PlanetEarth 2005). Ils se forment et se modifient continuellement sur des milliers d'années, à des rythmes différents et selon des processus différents, à mesure que la matière minérale issue de la rupture de la roche est colonisée par les plantes et les biotes du sol. Cette colonisation conduit à la formation de la matière organique et de la structure du sol, qui déterminent le cycle du carbone, des nutriments et de l'eau (Brantley 2010). Le carbone dans le sol existe sous forme organique et inorganique. Le carbone inorganique est issu des roches ou formé lorsque le CO_2 est piégé sous forme minérale (carbonate de calcium). Le carbone inorganique est beaucoup moins sujet à des pertes que le carbone organique. Bien qu'il puisse se dissoudre, notamment dans des conditions d'acidité, le carbone inorganique ne peut pas faire l'objet d'une biodégradation.

Le carbone organique est le principal constituant de la matière organique du sol. Celle-ci est formée par la décomposition biologique, chimique et physique des matériaux organiques qui entrent dans le système des sols à partir de sources se situant sur terre (entre autres, les feuilles tombées des arbres, les résidus des cultures, les déchets animaux) ou au-dessous (par exemple les racines, les biotes du sol). La composition élémentaire de la matière organique varie, avec des teneurs de l'ordre de 50 % en carbone (Broadbent 1953), de 40 % en

oxygène et de 3 % en azote ainsi que de petits montants de phosphore, de potassium, de calcium, de magnésium et d'autres éléments sous forme de micronutriments. Les biotes du sol (depuis les microbes jusqu'aux vers de terre) apportent de la biomasse vivante au mélange de la matière organique, entraînant la dégradation de cette matière sous l'effet de réactions physiques et biochimiques. Ces réactions biochimiques libèrent du carbone et des nutriments dans le sol ainsi que des gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde d'azote (N_2O) et le méthane (CH_4) dans l'atmosphère (**graphique 2**).

La gestion des sols peut influencer sur l'équilibre relatif de ces processus et leurs impacts sur l'environnement. Lorsque la matière organique est dégradée, une partie du carbone se minéralise assez rapidement en CO_2 et s'échappe du sol. De la matière organique peut aussi être perdue du fait de l'érosion physique. L'azote organique contenue dans la matière organique en voie de biodégradation se transforme en N_2O et autres composés d'oxyde d'azote (NO_x). Cependant, certaines fractions de la matière organique ne se dégradent pas facilement. Le contenu en carbone organique des sols tend donc à s'accroître lorsque les sols ne sont pas perturbés pendant un certain temps. Dans les sols saturés en eau, la matière organique peut même s'accumuler en couches épaisses de tourbe (Beer et Blodau 2007). La matière organique s'attache aux minéraux, en particulier les particules d'argile, un processus qui protège également le carbone (Von Lütow et al. 2006). La matière organique assure aussi la cohésion des sols et améliore leur fertilité, la circulation de l'eau et la résistance à l'érosion.



Graphique 2 : interactions du carbone contenu dans le sol et du carbone contenu dans les végétaux et services écosystémiques associés. Les sols, formés par l'action sur la roche mère des biotes et de l'eau ou des petites particules aqueuses infiltrées, fournissent des services écosystémiques sous la forme de flux de matériaux (carbone séquestré, eau et particules aqueuses, nutriments des plantes, biomasse des cultures) et d'informations codées dans les gènes des organismes des sols.

Stockage du carbone et autres services écosystémiques vitaux fournis par les sols

Les scientifiques distinguent des milliers de sols différents. Chacun a une composition distincte en minéraux, organismes vivants, matière organique, eau et gaz (WRB 2006, FAO et al. 2009). Les sols se constituent sur des milliers d'années sous l'effet de la dégradation des roches et de leur colonisation par les plantes et les biotes, conduisant à la formation de la matière organique. Si la matière organique est essentiellement du carbone, elle contient également des éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes, comme l'azote, le phosphore, le soufre et les micronutriments (**encadré 1**). Les organismes se trouvant dans le réseau alimentaire du sol décomposent la matière organique et libèrent ces nutriments (Brussaard et al. 2007). Le rythme de décomposition et de renouvellement de la matière organique dépend essentiellement de l'interaction entre les biotes, la température, l'humidité et la composition chimique et physique des sols (Taylor et al. 2009).

Si leur utilisation et leur valeur sont généralement appréciées par rapport à l'agriculture, les sols revêtent aussi une importance capitale dans la fourniture d'un grand nombre d'autres services fournis par les écosystèmes, dits services écosystémiques (**encadré 2**). Le volume et la dynamique du carbone du sol constituent des déterminants majeurs de la quantité et de la qualité de ces services. Les services écosystémiques sont généralement divisés en quatre catégories :

- **Les services de soutien** : ces services sont à la base de tous les autres services et des avantages que les êtres humains tirent du milieu naturel. La matière organique est un élément majeur qui influe sur l'aptitude des sols à soutenir les services écosystémiques. Les caractéristiques inhérentes des sols (par exemple la fertilité, la biodiversité, l'aptitude à séquestrer, garder et transporter l'eau et le carbone ou à former et libérer des gaz à effet de serre) sont largement déterminées par la capacité des différents sols de constituer et dégrader la matière organique.
- **Les services de régulation** : au niveau mondial, environ 75 milliards de tonnes de sols par an sont enlevés par le vent et l'érosion de l'eau (Wachs et Thibault 2009). La matière organique favorise la résistance à l'érosion et contribue à réguler les inondations en augmentant l'infiltration, réduisant le ruissellement et ralentissant la circulation de l'eau des terres en amont vers les terres en aval. Elle réduit aussi les rejets de produits agrochimiques, de pathogènes et de contaminants dans l'environnement en contribuant à leur rétention et à leur décomposition (Burauel et Baßmann 2005). Les sols jouent un rôle essentiel dans la régulation du climat car ils constituent le plus grand réservoir de carbone de la biosphère terrestre (Batjes et Sombroek 1997).
- **Les services d'approvisionnement** : les sols sont à la base de la production de denrées alimentaires et de fibres et revêtent une importance vitale dans l'approvisionnement en eau. La matière organique est indispensable à ces deux services car elle influe sur les apports en nutriments et en eau et sur la structure des sols. Elle



L'infiltration de l'eau est réduite dans les sols dégradés. Dans ce type de sols, une quantité moins grande d'eau peut s'infiltrer pour recharger les sols et les nappes phréatiques et une plus grande quantité est perdue par évaporation et ruissellement.
Photo : Elke Neoele Meyer

accroît aussi la résistance aux changements climatiques en contribuant à protéger les plantes et l'environnement contre le stress hydrique et l'excédent d'eau. Les tourbières riches en carbone sont depuis longtemps une source de combustibles. Aujourd'hui, elles servent surtout de support à la plantation de végétaux par les jardiniers, les horticulteurs et l'industrie.

- **Les services culturels** : depuis les temps anciens, les cultures humaines ont été profondément influencées par les modes d'utilisation et de gestion des sols. Les caractéristiques des sols et leur contenu en carbone ont influé sur la nature des paysages et l'environnement dans lesquels les diverses cultures se sont développées et épanouies. La matière organique permet aussi aux sols de garder les traces des cultures et climats anciens et de préserver des restes archéologiques.



Les tourbières saturées en eau peuvent conserver des restes archéologiques quasiment indéfiniment. Le corps momifié de l'homme de Tollund, vieux de 2 500 ans, a été retrouvé en 1950 dans une tourbière du Danemark. Photo : Cochyn



Encadré 2 : les sols revêtent une importance fondamentale pour la fourniture d'un grand nombre de services écosystémiques interdépendants. *Source : Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire 2005, Black et al. 2008.*

Services de soutien :

cycle nutritif, libération/rétention de l'eau, formation des sols, habitat pour la biodiversité, échange de gaz avec l'atmosphère, dégradation de matériaux complexes

Services de régulation :

séquestration du carbone, émissions de gaz à effet de serre, purification de l'eau, atténuation naturelle des polluants

Services d'approvisionnement :

production de denrées alimentaires et de fibres, approvisionnement en eau, support à la construction

Services culturels :

protection des restes archéologiques, activités récréatives extérieures, paysages, soutien des habitats



Photo : Elke Noellemeyer



Photo : Márton Bálint



Photo : Anja Leide



Photo : Kevin Bacher, NP

La gestion du carbone du sol pour tirer au mieux parti de ses multiples avantages est indispensable à son utilisation durable. Les arbitrages à opérer entre les avantages que procurent les services écosystémiques apparaissent lorsque la gestion des sols est axée sur un seul type de service. Par exemple, l'utilisation des tourbières drainées pour la production de biomasse diminue fortement les stocks de carbone dans le sol, dégrade les habitats naturels et modifie la capacité des tourbières à fournir des services de régulation du climat. Or le carbone du sol peut être géré pour renforcer un ensemble de services écosystémiques. Accroître la matière organique des sols dégradés permet à la fois de stimuler la productivité agricole, de séquestrer le CO₂ dont les émissions pourraient exacerber les changements climatiques et d'améliorer la capture de l'eau.

Quels sont les facteurs qui déterminent la distribution mondiale du carbone du sol ?

La distribution mondiale du carbone organique reflète la distribution de la pluviosité, avec de plus grandes accumulations de carbone dans les zones plus humides (**graphique 3**). La majeure partie du carbone organique se trouve donc dans l'hémisphère septentrional, où se trouve une plus grande masse terrestre soumise à des climats humides que dans l'hémisphère austral. La température joue un rôle secondaire dans la répartition mondiale du carbone organique, comme en témoigne l'existence de dépôts profonds de tourbe dans les zones humides tropicales et polaires.

Dans les différentes zones climatiques, le volume de carbone organique est déterminé par l'humidité des sols, qui est à son tour influencée par le relief, la texture du sol et le type d'argile. Un fort contenu du sol en eau tend à conserver la matière organique, car la quantité réduite d'oxygène se trouvant dans les sols humides ralentit la décomposition de la

matière organique par les microbes du sol. Les sols plus secs et plus aérés favorisent une décomposition plus rapide et accumulent moins de matière organique. Là où l'oxygène du sol, les niveaux d'humidité et la quantité de nutriments sont suffisants, des températures plus élevées accélèrent les processus biologiques, comme la production et la décomposition de biomasse et, en conséquence, la dynamique du carbone organique (Batjes 2011). C'est la raison pour laquelle le drainage des tourbières provoque une oxydation rapide de la matière organique stockée et libère de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère, notamment dans les climats plus chauds. De même, la conversion des prairies ou des forêts naturelles en sols labourés entraîne la rupture des agrégats du sol, se traduit par une plus grande aération et accroît ainsi la décomposition de la matière organique et les rejets de CO₂, avec des taux plus élevés dans les climats plus chauds. Les scientifiques ont montré que, dans l'agriculture arable, la gestion des terres sans labourage réduit les pertes de carbone et améliore le potentiel de séquestration de celui-ci (**encadré 3**).

Le contenu des sols en carbone varie sensiblement suivant les différents types de couverture terrestre (**graphique 4**). Les sols des savanes ont une teneur relativement faible en carbone organique, mais les stocks de carbone des sols de savane sont importants au niveau mondial en raison de l'importante superficie terrestre recouverte par ce biome. En revanche, les tourbières, qui n'occupent que 3 % de la superficie terrestre mondiale, contiennent près d'un tiers du carbone mondial du sol, ce qui en fait le réservoir de stockage de carbone le plus efficace de tous les écosystèmes terrestres. Les tourbières drainées et en dégradation, qui représentent 50 millions d'hectares dans le monde (0,3 % de la superficie terrestre mondiale), produisent plus de 2 Gt d'émissions de CO₂ par an – soit l'équivalent de 6 % de l'ensemble des émissions de CO₂ anthropogéniques au niveau mondial (Joosten 2009).



Graphique 3 : carbone organique contenu dans le sol à un mètre de profondeur, en tonnes par hectare. Les données sont tirées de la Base de données mondiales harmonisée sur les sols, v1.1. Source : PNUE-WCMC (2009)

Modélisation, mesure et suivi

Les méthodes d'estimation des stocks et des flux de carbone du sol, à des échelles allant du niveau local au niveau mondial, sont encore en cours de mise au point (Bernoux et al. 2010, Hillier et al. 2011). L'absence de méthodes et d'approches adéquates a été l'un des obstacles à la comptabilisation des importants effets d'atténuation que peuvent avoir les projets de gestion des terres. Cet aspect est important dans le cas des projets dont l'objectif est de séquestrer du carbone dans la biomasse

ou dans les sols, ou dans ceux où la séquestration est un avantage annexe de la réduction de la pauvreté rurale ou des efforts faits pour assurer la sécurité alimentaire. L'Initiative mondiale de cartographie des sols contribuera à fournir un ensemble cohérent au niveau mondial de données sur les sols, qui seront géographiquement continues, seront présentées à l'échelle et tiendront compte des estimations de l'incertitude (Cartographie mondiale des sols 2011). Ces données devront être étayées par des données instantanées recueillies sur le terrain (comme celles collectées en Afrique grâce à la Bill et Melinda

Encadré 3 : effets de la gestion des terres sans labourage en Argentine et au Brésil

En Argentine, où la superficie des terres agricoles est actuellement en expansion, la gestion des terres sans labourage s'est révélée être une solution de rechange fiable à la culture traditionnelle qui implique le travail du sol avec des charrues et des houes plusieurs fois avant l'ensemencement. Outre les avantages accrus sous la forme d'une meilleure rétention de l'eau et de la prévention de l'érosion, des augmentations infimes mais significatives des stocks de carbone organique ont été obtenues lorsque les agriculteurs sont passés à des systèmes sans labourage (Alvarez et Steinbach 2009, Fernández et al. 2010).

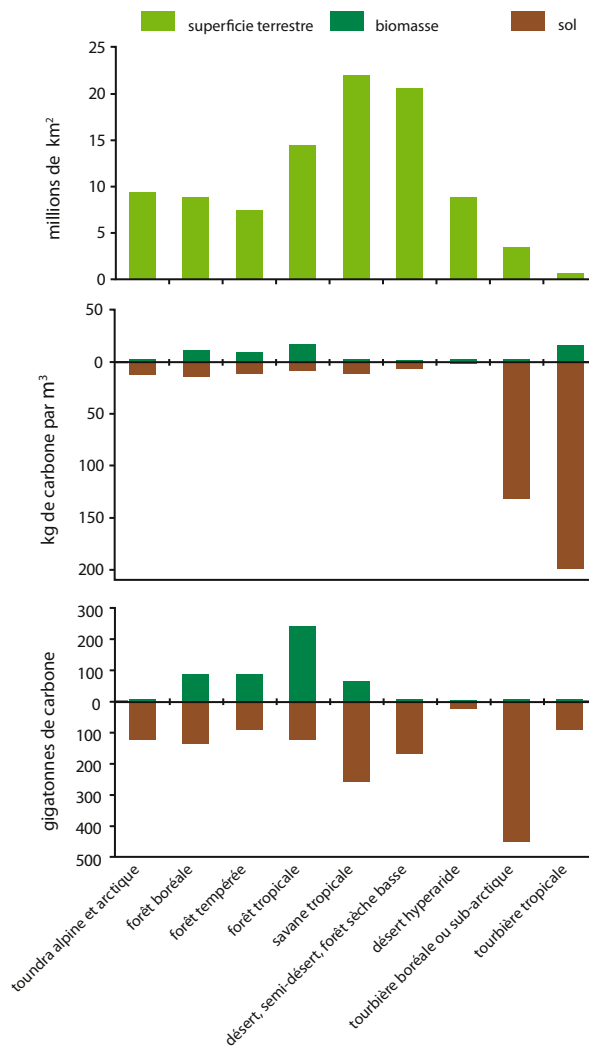
Au Brésil, les modifications apportées aux pratiques de culture ont aussi des effets significatifs sur les stocks de carbone du sol. Le passage à l'agriculture sans labourage du soja et du maïs ainsi que les systèmes correspondants de rotation des cultures se sont traduits par un taux de séquestration moyen du carbone organique de 0,41 tonne par hectare et par an. Les pâturages peuvent aussi séquestrer du carbone dans les sols lorsqu'ils sont intégrés dans l'agriculture arable (rotations), avec l'avantage supplémentaire d'accroître la production agricole. (De Figueiredo et La Scala 2011, La Scala et al. 2011).



Champ de soja dans la pampa semi-aride d'Argentine. Après 15 années de cultures sans labourage (droite), les niveaux de carbone à une profondeur de 0 à 20 cm dans le sol se situaient à 15,8 tonnes par hectare, contre 13,8 tonnes par hectare dans la culture traditionnelle (gauche).

Source : Fernandez et al. 2010. Photo : Elke Noellmeyer.





Graphique 4 : superficie terrestre et stocks indicatifs de carbone dans les sols et dans la biomasse suivant les biomes, les modes d'utilisation des terres et les types de couverture terrestre. Les stocks de carbone du sol concernent le premier mètre de sol, sauf dans le cas des tourbières. Pour les trois biomes forestiers et la toundra, une certaine quantité de carbonates de tourbière est incorporée dans leur stock global de carbone du sol. *Source : adapté de Gorham (1991), ORNL (1998), Verwer et Van de Meer (2010) et Page et al. (2011)*

Gates Foundation et au Service d'information sur les sols africains) ainsi que par un suivi des sols dans le temps (Service d'information sur les sols africains 2011; Gates Foundation 2011).

La mesure des stocks de carbone est une question actuellement débattue à plusieurs niveaux dans l'optique d'une gestion adéquate des marchés du carbone, par exemple dans les secteurs agricoles et

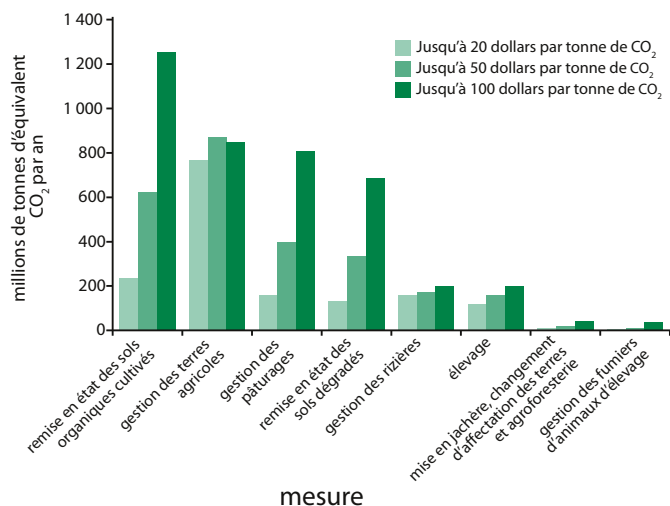
Encadré 4 : projet sur les avantages pour les stocks de carbone

Les activités influant sur l'utilisation des terres, les changements dans l'affectation des terres et la foresterie peuvent être un moyen économique de compenser les émissions en supprimant davantage de gaz à effet de serre de l'atmosphère (grâce, par exemple, à la plantation d'arbres ou à la gestion des forêts) ou en réduisant les émissions (par exemple, par le freinage de la déforestation) (CCNUCC 2012). Cependant, il est souvent difficile d'estimer la suppression des gaz à effet de serre ou la réduction des émissions résultant des activités en question. Le projet sur les avantages du carbone lancé par le PNUE et le Fonds mondial pour l'environnement et visant la modélisation, la mesure et le suivi a permis de mettre au point un ensemble d'instruments efficaces par rapport aux coûts et scientifiquement rigoureux pour déterminer les avantages sur le plan du carbone des interventions de gestion durable des terres. Ces instruments visent à estimer et modéliser les stocks et les flux de carbone et les émissions de gaz à effet de serre dans le cadre des pratiques de gestion actuelles et des pratiques nouvelles ainsi qu'à mesurer et à suivre les changements intervenant dans les stocks de carbone suivant l'utilisation des sols (**graphique 6**).

Une série d'outils en ligne peuvent être utilisés pour les projets se centrant sur les services fournis par les sols et la gestion des ressources naturelles (par exemple la sylviculture, agroforesterie, agriculture et gestion des pâturages) dans toutes les zones climatiques. Le système de modélisation permet d'évaluer les sources et les puits de CO₂ et des autres gaz à effet de serre à tous les stades du cycle d'un projet. Le système de mesure est fondé sur un ensemble d'observations de télédétection, d'études d'étalonnage au sol et de systèmes d'information géographique connectés à l'Internet. Il fournit aussi des estimations de la dynamique du CH₄ et du N₂O sur la base de mesures directes des flux sur le terrain.

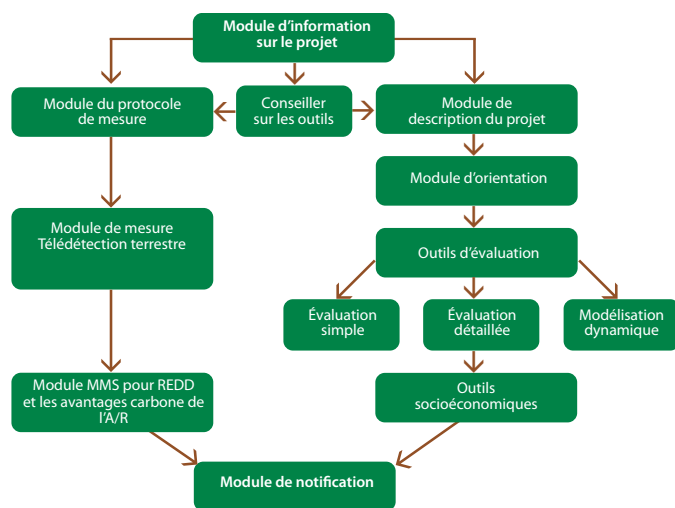
Ces approches devraient permettre des évaluations des stocks de carbone au-dessus et au-dessous du sol sur de grandes superficies terrestres dans le cadre des mécanismes ayant pour objectif d'atténuer les changements climatiques grâce à la Réduction des émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD) dans les pays en développement. La suppression des gaz à effet de serre et la réduction des émissions obtenues par le biais des activités d'afforestation et de reboisement (A/R) depuis 1990 pourraient être prises en compte dans la réalisation des objectifs d'émissions du Protocole de Kyoto sous réserve de certaines règles (CCNUCC 2012). Les parties pourraient aussi choisir d'utiliser ces outils pour d'autres activités influant sur l'utilisation des terres, les changements d'affectation des terres et la foresterie, comme la gestion des pâturages, la gestion des terres de culture, la gestion des forêts et la revégétalisation.

forestiers. L'amélioration des estimations de la matière organique du sol et des stocks et flux de carbone pourrait beaucoup aider les scientifiques à suivre et à prévoir la réaction des écosystèmes aux changements climatiques, en plus de faciliter la prise de décisions concernant l'utilisation et la gestion des sols et ainsi que d'aider les gestionnaires des terres à avoir un meilleur accès aux marchés du carbone (Smith et al. 2007, Ravindranath et Ostwald 2008, Milne et al. 2010, FAO, 2011,



Graphique 5 : effet des prix du marché sur l'efficacité des mesures de gestion visant à accroître le carbone du sol. Source : adapté de Smith et al. (2007)

Schmidt et al. 2011). Lorsque des mécanismes de mesure et d'incitation appropriés sont en place, les prix du carbone peuvent avoir une incidence significative sur l'efficacité des mesures de gestion visant à accroître le carbone du sol (**graphique 5**). Le projet PNUE/FEM vise à mettre au point un outil permettant d'estimer les avantages sur le plan du carbone ainsi que de mesurer et suivre les effets des interventions de gestion des terres (**encadré 4**).



Graphique 6 : concept sous-tendant la série d'outils en ligne du Projet sur les avantages pour les stocks de carbone. Source : CBP 2012

Vulnérabilité des stocks de carbone du sol face aux activités humaines

Les stocks de carbone du sol sont très vulnérables face aux activités humaines. Ils diminuent sensiblement (et souvent rapidement) en cas de changements dans la couverture terrestre et l'utilisation des sols, comme la déforestation, le développement urbain et le développement du labourage, et sous l'effet de pratiques agricoles et forestières non durables. Le carbone organique peut aussi être accru (mais beaucoup plus lentement) grâce à l'afforestation et à d'autres activités qui diminuent la rupture de la matière organique (par exemple labourage minimum, pâturages pérennes, désignation de zones protégées). Les pratiques qui ajoutent de la matière organique dans le sol (notamment du compost ou du fumier) peuvent améliorer l'équilibre carbone dans un site tout en le diminuant dans un autre. Les changements climatiques devraient avoir des incidences significatives sur la dynamique du carbone du sol (Schils et al. 2008, Conant et al. 2011). La hausse des niveaux atmosphériques de CO₂ pourrait accroître la production de biomasse et les apports de matières organiques dans les sols. Cependant, l'augmentation des températures pourrait réduire le carbone organique en accélérant la décomposition microbienne et l'oxydation de la matière organique, en particulier dans les permafrosts connaissant un dégel. Les experts craignent que la disparition du permafrost n'entraîne la libération d'énormes quantités de carbone, intensifiant considérablement le réchauffement planétaire (Schoor et Abbott 2011). L'ampleur de cet effet est très incertaine, mais le volume estimé récemment du carbone présent dans le sol gelé est immense. D'après certains scientifiques, sur quelque 18,8 millions km² de sols septentrionaux se trouvent environ 1 700 milliards de tonnes de carbone organique (Tarnocai et al 2009).

Les connaissances scientifiques actuelles sur la façon dont les propriétés locales des sols et les conditions climatiques affectent les changements dans les stocks de carbone du sol et les flux de carbone sont insuffisantes et conflictuelles (Tuomi et al, 2008, Conant et al. 2011, Fallon et al. 2011). De plus amples études seront nécessaires pour pouvoir établir des



Le gel du permafrost pourrait conduire à la libération d'énormes quantités de carbone dans l'air. Photo : Hans Joosten

prévisions plus précises des incidences des changements climatiques sur les sols, le carbone du sol et les services écosystémiques associés à des échelles pertinentes pour la gestion locales, ainsi que pour l'établissement d'inventaires nationaux du carbone.

Le rythme actuel des modifications du carbone organique est essentiellement attribuable à l'intensification de l'utilisation des terres partout dans le monde et à la conversion de nouvelles terres pour la production de denrées alimentaires et de fibres. La production industrialisée moderne s'appuie sur les monocultures de végétaux très rentables, qui conduisent généralement à un bilan carbone négatif. Les nouvelles utilisations des résidus des cultures pour l'alimentation du bétail, les combustibles ou des applications industrielles exacerbent cette tendance à la diminution de la reconstitution du carbone du sol. Le type de culture joue aussi un rôle. Les monocultures de soja, qui se sont récemment beaucoup développées, accélèrent les pertes de carbone organique car leurs faibles résidus ne laissent qu'une couverture insuffisante pour protéger les sols de l'érosion par le vent et l'eau, sont très peu stables et s'oxydent rapidement en CO₂. Les systèmes d'élevage intensif, qui conduisent à récolter toute la biomasse des plantes, réduisent aussi les stocks de carbone organique par rapport aux systèmes de pâture traditionnels, qui ne suppriment que partiellement la biomasse. L'impact global de cette intensification est que, si les taux des émissions de carbone d'une grande partie des terres arables du

monde restent faibles, de larges superficies de terres cultivées souffrent d'une diminution des stocks de carbone organique. Globalement, en conséquence, les sols soumis à une agriculture intensive peuvent être considérés comme une source importante de CO₂ atmosphérique et d'autres gaz à effet de serre (Janzen 2006, Powlson et al. 2011).

Les utilisations intensives des terres se multiplient également dans les zones où les stocks de carbone organique sont moins résistants et où les conditions des sols ne sont guère adaptées à l'agriculture. Par exemple, des savanes et des prairies semi-arides, des forêts tropicales et des tourbières sont transformées en terres arables à un rythme accéléré. Si les prairies des terres humides perdent environ 30 % de leur carbone organique après 60 années de culture (Tiessen et Stewart 1983), les stocks de carbone du sol dans les environnements semi-arides peuvent diminuer de 30 % en moins de cinq ans lorsque la végétation naturelle ou les pâturages sont supprimés pour cultiver la terre (Zach et al. 2006, Noellemeyer et al. 2008). Les pâturages établis sur d'anciennes forêts tropicales amazoniennes émettent entre 8 et 12 tonnes de carbone par hectare (Fearnside et Barbosa 1998, Cerri et al. 2007). La culture des sols de forêts tropicales entraîne la perte de plus de 60 % des stocks initiaux de carbone organique en juste quelques années (Brown et Lugo 1990).

Les tourbières tropicales converties en cultures ou plantations sont un autre problème critique pour les émissions de carbone (**encadré 5**). Le

Encadré 5 : la paludiculture : culture durable des tourbières



Enlèvement de la biomasse dans la tourbière de Biebrza en Pologne. Photo : Lars Lachmann, BMBF-VIP-Projekt

L'utilisation actuelle de tourbières drainées sur seulement 0.3 % de la surface terrestre est responsable de pas moins de 6 % des émissions globales de CO₂ générées par les activités humaines (Joosten 2009). Les tourbières drainées sont de plus en plus utilisées pour produire des produits combustibles de biomasse, comme l'huile de palme en Asie du Sud, la canne à sucre en Floride, le maïs et le miscanthus dans les pays européens tempérés et le bois dans certaines parties de la Scandinavie. Ce type de cultures entraîne une augmentation des

émissions de CO₂ bien supérieure à la réduction des émissions obtenue par le remplacement des combustibles fossiles par les combustibles issus de la biomasse (Couwenberg 2007, Sarkkola 2008, Wicke et al. 2008, Couwenberg et al. 2010).

La paludiculture (*palus* est le mot latin pour marais) est la culture de biomasse sur des tourbières humides et réhumidifiées (Wichtmann et al. 2010). Il s'agit d'un substitut novateur à l'agriculture et à la sylviculture conventionnelles sur les tourbières. La paludiculture peut contribuer à l'atténuation des changements climatiques de deux manières : en réduisant les émissions de gaz à effet de serre grâce à la réhumidification des sols des tourbières drainées; et en remplaçant les ressources fossiles par des produits de la biomasse renouvelables.

La réhumidification des tourbières est généralement bénéfique à la biodiversité car les tourbières fortement dégradées sont des déserts écologiques. La culture régulière de la biomasse sur des tourbières non drainées ou réhumidifiées maintient la végétation rase, réduit les niveaux d'éléments nutritifs et permet à des espèces naturelles moins compétitives de s'établir ou de se rétablir. On peut citer en exemple la fauvette aquatique, nom habituel donné à plusieurs oiseaux ne survivant que dans des milieux humides cultivés (Tanneberger et al. 2009).

La paludiculture offre un avenir durable aux tourbières gérées de manière productive. Bien que des machines spécialement adaptées aux terres humides soient requises, les roseaux récoltés en hiver dans les zones de paludiculture en Allemagne du Nord peuvent parfaitement concurrencer le miscanthus ou la paille cultivés sur des sols minéraux.



L'agriculture sur les tourbières drainées, comme ici dans le Kalimantan central (Indonésie) conduit à de très importantes pertes de carbone. Photo : Hans Joosten

drainage des sols de tourbe pour introduire des systèmes de production commerciale dans les milieux tropicaux se traduit par des pertes permanentes de pas moins de 25 tonnes de carbone par hectare et par an (Jauhiainen et al. 2011), alors que, dans les tourbières boréales, les pertes dans les zones cultivées sont d'environ 7 tonnes par hectare et par an (Couwenberg 2011).

Conséquences des pertes de carbone du sol et potentiel de restauration

Les pertes de carbone du sol non seulement se traduisent par une augmentation des concentrations atmosphériques de CO_2 du fait de l'accélération du phénomène d'oxydation, mais conduisent aussi à une dégradation générale du fonctionnement des sols et de leur biodiversité. La diminution de la matière organique entraîne une baisse de la cohésion entre les particules du sol, qui accroît la fragilité à l'érosion sous l'effet de l'eau ou du vent, accélère les pertes de sols denses et modifie le cycle des nutriments et de l'eau. La dégradation de la structure des sols réduit le volume des sols disponibles pour le stockage de l'eau ainsi que la perméabilité des sols pour le drainage. Ce phénomène peut, à son tour, conduire à des débordements plus importants, qui exacerbent les inondations et réduisent la recharge des eaux souterraines durant les périodes de pluie. La réduction de la recharge des eaux souterraines aggrave les pénuries d'eau et les conditions de sécheresse. Une autre conséquence de la perte de carbone est la perte des éléments nutritifs du sol, notamment des éléments nutritifs se trouvant dans la matière organique et d'éléments nutritifs inorganiques, comme le phosphore et le potassium, qui s'accrochent aux surfaces minérales. Étant donné le rôle joué par la matière organique dans la formation des agrégats, la perte des nutriments peut réduire la cohésion des sols et engendrer la rupture de ces agrégats (Malamoud et al. 2009). Cela accroît les risques de perte des argiles du sol et d'autres minéraux, soit sous l'effet d'une érosion en masse soit par transport colloïdal à mesure que l'eau percole au travers du profil du sol.

Compte tenu des nombreux effets positifs du carbone dans le sol, la priorité devrait être accordée à la préservation du niveau de carbone organique et, si possible, à l'augmentation de ce niveau. Pour obtenir une augmentation du carbone dans le sol, on peut procéder de deux manières : premièrement, appliquer des stratégies de gestion (y compris la mise en réserve de terres lorsque cette option est possible socialement et économiquement) et utiliser des technologies qui réduisent les pertes du carbone présent dans le sol (cela est particulièrement important dans le cas des sols des zones sèches et des prairies ou savanes naturelles); et deuxièmement, mettre en œuvre des techniques de gestion durable qui favorisent l'accroissement des niveaux de carbone dans les sols, notamment dans les sols agricoles dégradés (**encadré 6**).

Les pertes de carbone organique peuvent être réduites en minimisant son oxydation et en réduisant les enlèvements de terres (par exemple de la tourbe utilisée pour les combustibles, du terreau pour les utilisations horticoles ou des terres pour la construction). Dans le cas des sols minéraux, qui sont typiques des grandes régions de cultures, la réduction du labourage devrait permettre de réduire au minimum les pertes de carbone du sol. En outre, le carbone présent à la surface du sol peut être protégé par des pratiques de lutte contre l'érosion, comme les ceintures de protection, les cultures de pourtour et les cultures de couverture. Dans les sols tourbeux, la forte densité naturelle du carbone peut être préservée en maintenant des conditions de saturation d'humidité, au lieu de drainer les tourbières pour planter des forêts et des végétaux, notamment pour la production d'huile de palme. Dans les sols tourbeux déjà dégradés, l'augmentation des niveaux d'eau par le blocage du drainage peut réduire la poursuite de l'oxydation et contribuer au maintien et à la restauration des niveaux de carbone (Tanneberger et Wichtmann 2011). Cependant, il faut veiller à ne pas inonder la matière organique peu stable, comme les résidus frais des cultures, car la saturation en eau peut conduire à une décomposition anaérobie source de fortes émissions de méthane (CH_4), un puissant gaz à effet de serre (Tanneberger et al 2011).

Une restauration des niveaux de carbone organique peut aussi être obtenue en augmentant les apports de carbone dans les sols. Dans le cas des sols travaillés, on peut accroître l'apport et la rétention de biomasse au-dessus du sol. Les plantes sont aussi des vecteurs importants de carbone en partie sous-terrain de par leurs racines. Ce processus favorise l'activité des biotes du sol dans la zone racinaire et facilite ce faisant l'absorption de nutriments par les plantes, ce qui se traduit par une amélioration de la productivité des sols et par une augmentation plus importante des flux de carbone dans le sol. Ainsi, la gestion durable des terres aux fins du relèvement des niveaux de carbone organique repose sur : une productivité végétale optimale (sélection des cultures, gestion appropriée des nutriments, irrigation); des pertes minimales de la matière organique du sol (labourage minimum, lutte contre l'érosion, cultures de couverture); et une forte restitution du carbone dans les sols (par exemple en laissant les résidus des cultures après la récolte ou en apportant de la matière organique, comme les engrais animaux, le biochar et les déchets domestiques ou industriels, après examen des risques potentiels associés à l'utilisation de ces matériaux).

Les stocks de carbone peuvent être améliorés en faisant en sorte que les entrées de carbone dans le sol soient plus importantes que les sorties de carbone du sol. Différentes stratégies sont possibles pour réaliser cet objectif, suivant les modes d'utilisation des terres, les propriétés des sols, le climat et la superficie concernée.

Pâturages

L'amélioration du carbone dans le sol des pâturages offre un potentiel d'atténuation des gaz à effet de serre au niveau mondial de 810 Mt de CO₂ (au cours de la période allant jusqu'à 2030), mais la totalité de ce carbone doit être séquestrée dans le sol (Conant et al. 2001, Ravindranath et Ostwald 2008). Le surpâturage peut conduire à la dégradation des prairies, à l'accentuation de l'érosion des sols, à l'épuisement du carbone organique et à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre issues du sol. Il devrait donc être évité. Les activités qui améliorent le carbone dans le sol des pâturages sont notamment les suivantes :

- Les apports de fumier et d'engrais qui ont une incidence directe sur les niveaux de carbone organique grâce à la matière organique ajoutée, en plus de leur contribution directe à l'amélioration de la productivité des végétaux et à la stimulation de la biodiversité des sols (par exemple grâce aux vers de terre qui facilitent la dégradation et le mélange du matériel organique). L'utilisation d'engrais peut toutefois conduire à des émissions de N₂O.
- La re-végétalisation, en particulier en utilisant des végétaux de pâturage et des légumineuses améliorées, peut accroître la productivité, générant ainsi davantage de déchets végétaux et de biomasse souterraine, qui peuvent accroître le stock de carbone organique.
- L'irrigation et la gestion de l'eau peuvent améliorer la productivité des végétaux et la production de matières organiques. Ces gains devraient toutefois être évalués par rapport aux émissions de gaz à effet de serre associées à l'énergie utilisée pour l'irrigation, à la déperdition de nutriments affectant la qualité de l'eau et aux risques de dépôts de sel par évaporation, pouvant avoir une incidence négative sur la fertilité du sol.

Terres cultivées

Les techniques propres à accroître le carbone organique dans le secteur agricole sont notamment les suivantes (Altieri 1995) :

- Le paillis, qui peut ajouter de la matière organique. Si des résidus de végétaux sont utilisés, le paillis empêche aussi les pertes de carbone du système. Cependant, sur les sols inondés, il peut accroître les émissions de CH₄.
- La réduction du labourage ou le non labourage évitent la décomposition accélérée de la matière organique et l'épuisement

du carbone du sol pouvant intervenir avec un labourage intensif. La réduction du labourage empêche aussi la rupture des agrégats du sol qui protègent le carbone.

- L'utilisation judicieuse du fumier des animaux ou des engrais chimiques peut accroître la productivité des végétaux et par conséquent le carbone organique, bien que l'excédent de nutriments puisse également accélérer les pertes de carbone organique sous la forme d'émissions de gaz à effet de serre. Tous les ajouts d'engrais doivent aussi prendre en compte les coûts en termes de gaz à effet de serre de la production et du transport par rapport à l'augmentation des rendements, ces coûts pouvant annuler l'intérêt de la production sur des terres marginales et du transport de l'exploitation agricole jusqu'au marché.
- La rotation de cultures commerciales avec des pâturages pérennes et (dans certains climats et systèmes agricoles) le recours aux cultures de couverture et aux engrais verts peuvent accroître la biomasse restituée au sol et donc augmenter les stocks de carbone dans le sol.
- L'utilisation de variétés améliorées de cultures peut accroître la productivité en surface et sous-terrain, et également augmenter les résidus végétaux, améliorant ainsi le carbone organique.
- Une gestion agricole adaptée au site peut réduire le risque d'échec des cultures et donc améliorer la productivité globale d'une zone et ses stocks de carbone.
- L'intégration de plusieurs cultures dans un même champ peut accroître le matériel organique, la biodiversité et la santé des sols et également augmenter la production alimentaire, en particulier dans l'agriculture de subsistance.

Forêts et plantations d'arbres

Les forêts ont un potentiel considérable de réduction des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère en stockant d'importantes réserves de carbone à la fois en surface et en partie sous-terrain. Les stratégies requises pour tirer parti de ce potentiel sont les suivantes :

- La protection des forêts existantes préservera les stocks actuels de carbone dans le sol.
- Le reboisement des terres dégradées et l'augmentation de la densité des arbres dans les forêts dégradées accroissent la densité de la biomasse et, par conséquent, la densité du carbone, en surface et en partie sous-terrain.
- La plantation d'arbres sur des terrains agricoles (agroforesterie) et des vergers permet de stocker du carbone en surface et en partie sous-terrain, voire de réduire les émissions dues aux combustibles fossiles si ces plantations sont envisagées comme une source renouvelable de bois de feu.



Champ de millet et greniers servant au stockage de cette céréale au Niger. Photo : Curt Reynolds



La restauration de l'hydrologie et des communautés végétales dans les terrains agricoles peut se traduire par une séquestration nette de carbone dans le sol, Caroline du Nord (États-Unis). Photo : J.L. Heitman

Dans tous les cas, le succès des stratégies d'augmentation des stocks de carbone dans le sol dépendra de la capacité intrinsèque d'un sol particulier (par exemple composition minérale, contenu en argile) et des conditions locales de la formation des sols (par exemple climat, pentes) de même que des modes d'utilisation des terres. Pour s'assurer que les modifications nettes de la quantité de carbone organique sont bien réelles, une plus grande priorité doit être accordée à la mesure du carbone organique présent en profondeur ainsi qu'à l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre. Des recherches sont aussi nécessaires pour déterminer la capacité intrinsèque de rétention de carbone organique des différents sols et ainsi mieux cibler les pratiques de gestion et les investissements – c'est-à-dire comparer les stocks et les flux de base actuels du carbone organique avec les stocks et les flux pouvant résulter de méthodes de gestion différentes.

Les prochaines étapes : gérer le carbone du sol pour tirer au mieux parti de ses multiples avantages

Le monde connaît des modifications rapides et sans précédent de l'utilisation des terres, motivées par l'augmentation de la demande de denrées alimentaires, d'eau, d'énergie et de lieux de vie (Verburg et al. 2011). Dans les périodes passées, la demande de produits alimentaires et de fibres a été couverte par la conversion d'habitats naturels et semi-naturels en zones cultivées afin d'exploiter des sols fertiles où existaient d'importants stocks de carbone. Face à la progression de cette demande à l'avenir, l'intensité des cultures devra s'accroître car moins de terres sont disponibles pour être transformées en terres agricoles (Bruinsma 2003). Ces conversions de terre ont des conséquences majeures pour les stocks de carbone du sol (Smith et al. 2010).

Si la tendance se poursuit, on assistera à la libération rapide dans l'atmosphère du carbone contenu dans le sol dans les années à venir – ce qui exacerbera non seulement les changements climatiques mais accroîtra aussi la dégradation des sols au niveau mondial et la perte d'un large éventail de services écosystémiques vitaux. Les conséquences de nouvelles pertes de carbone du sol peuvent n'apparaître qu'après

plusieurs décennies, c'est-à-dire trop tard pour que l'on puisse y remédier facilement et à moindre coût.

Les stocks de carbone du sol disparaissent rapidement sous l'effet de changements dans l'affectation des terres et de la gestion non durable, alors que la reconstitution de ces stocks est lente et exige des investissements importants. Des actions positives peuvent être engagées dès à présent pour éviter les pertes de carbone organique en protégeant les stocks de carbone du sol et en encourageant des pratiques durables qui renforcent le carbone organique. Une comptabilisation complète des coûts et avantages sociaux, économiques et environnementaux peut contribuer à assurer une large compréhension des conséquences locales et mondiales des changements dans l'utilisation et la gestion des terres qui préserveront, amélioreront ou dégraderont le carbone organique.

Des possibilités existent aux niveaux mondial, régional et local d'améliorer le carbone du sol et d'éviter les pertes de cette ressource. L'enjeu consiste à élaborer et à mettre en œuvre des modalités de planification, des politiques et des mécanismes d'incitation permettant d'arbitrer entre les contraintes auxquelles sont soumis les sols pour répondre à des besoins divergents et (parfois) conflictuels dans le domaine de la production de denrées alimentaires et de fibres, de la production de cultures pour les carburants, de la régulation du climat, de l'eau, de la conservation de la biodiversité, de la création de lieux de vie, entre autres. En certains endroits, des mécanismes devront être mis en place pour protéger les sols qui sont importants pour le stockage du carbone, comme les tourbières et les toundras, en renonçant à d'autres utilisations, comme l'expansion agricole ou forestière. Cependant, dans nombre de cas, de multiples avantages économiques, sociaux et environnementaux peuvent être obtenus grâce à la gestion efficace du carbone contenu dans les sols.

Les exemples sont nombreux qui illustrent partout dans le monde les multiples avantages qui peuvent être tirés de la gestion efficace du carbone du sol (PNUE-WCMC, 2008, Marks et al. 2009, Kapos et al. 2010, Reed et al. 2010, Watson 2010). Par exemple, le Fonds biocarbone de la Banque mondiale fournit 350 000 dollars pour la réalisation de projets au Kenya sur le carbone agricole; il s'agit en l'occurrence de rémunérer de petits agriculteurs afin qu'ils améliorent leurs pratiques agricoles et contribuent ainsi au renforcement de la sécurité alimentaire et de la séquestration du carbone dans le sol (Banque mondiale 2010). Parallèlement, l'Initiative de la Grande Muraille Verte est un projet de reboisement massif visant à créer une bande large de 15 000 km d'arbres et d'autres végétaux le long d'un axe de 7 000 km sur le continent africain allant du Sénégal à Djibouti (Bellefontaine et al. 2011). Les objectifs de ce projet sont notamment la séquestration du carbone, la stabilisation des sols, la conservation de l'humidité des sols et le soutien à l'agriculture. Des approches similaires sont étudiées en Chine pour déterminer si elles peuvent contribuer à inverser durablement la dégradation des sols dans les régions arides (Bai and Dent 2009).



L'intégration des politiques relatives à la gestion des sols peut avoir de multiples avantages économiques, sociétaux et environnementaux. Photo : Clean Seed Capital

Des technologies et des options de gestion qui ont fait leur preuve sont disponibles pour la conservation et l'amélioration du carbone organique, mais la mesure dans laquelle elles peuvent être appliquées dépendra des politiques et des incitations qui seront mises en place pour les encourager. Actuellement, la valeur du carbone contenu dans les sols (et des sols en général) est rarement prise en compte dans les différents secteurs. Lorsque les effets positifs du carbone du sol sont envisagés, c'est souvent uniquement en fonction des besoins liés à une utilisation particulière d'un sol, comme la production alimentaire. Dans certaines parties du monde, des stratégies et des politiques de gestion des sols sont déjà en place pour éviter que les contraintes liées à la production ne fassent obstacle à d'autres objectifs sociétaux, comme la préservation de la biodiversité ou l'amélioration de la qualité de l'eau. Cependant, aucune d'entre elles n'a été expressément conçue pour optimiser la gestion des sols afin de tirer au mieux parti des multiples avantages du carbone et des services écosystémiques associés. Par exemple, les apports organiques dans les sols agricoles sont généralement destinés à accroître la fertilité des sols, bien que cette pratique puisse aussi réduire l'érosion, améliorer la séquestration du carbone et renforcer la résilience des systèmes agricoles.

Le moment est venu d'utiliser les mécanismes existants, individuellement et collectivement, pour encourager la gestion active du carbone du sol et élargir ainsi l'éventail des avantages potentiels. Là où les stratégies destinées à appliquer ces mécanismes font défaut, il est possible d'en concevoir de nouvelles pour tenir compte des multiples effets positifs de la gestion du carbone du sol. Divers efforts et actions ont déjà été engagés au niveau mondial qui pourraient être développés pour tirer plus largement parti des gains associés au carbone organique (**encadré 7**).

Dans cette optique, il conviendra en fin de compte de dégager toutes les synergies possibles entre les différents accords et politiques mis en place au niveau mondial. En septembre 2011, l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a commencé à planifier avec

Encadré 7 : options existant au niveau mondial pour tirer au mieux parti des avantages du carbone contenu dans le sol

- Les efforts faits au niveau international pour lutter contre les changements climatiques et réduire l'intensité du réchauffement planétaire (par exemple la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques) pourraient indirectement réduire les pertes de carbone du sol en mettant un terme à l'accélération des pertes de carbone organique dans les sols très organiques de la toundra, entre autres, en empêchant une plus grande intensification de l'utilisation des sols dans les zones où les conditions climatiques actuelles limitent les cultures, comme les régions de montagne, et en favorisant la restauration du carbone organique dans les sols agricoles.
- Les mesures prises pour freiner la dégradation des sols (par exemple dans le cadre de la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification) pourraient réduire les pertes de carbone en encourageant les mesures de conservation des sols pour prévenir l'érosion et accroître les stocks de carbone dans les zones affectées, ainsi qu'en favorisant les pratiques qui renforcent la matière organique du sol de façon à restaurer les sols dégradés.
- Les politiques commerciales (élaborées, par exemple, dans le cadre de l'Organisation mondiale du commerce) pourraient encourager les avantages marchands de l'augmentation du carbone du sol (entre autres, grâce à une meilleure tarification des produits issus de systèmes de production durables et favorables au stockage du carbone, tels qu'identifiés par l'étiquetage) ou freiner les pertes de carbone du sol dues à l'expansion d'utilisations particulières des terres ou de certains types de cultures dans des zones vulnérables (notamment au moyen de contrôles sur la commercialisation de produits cultivés sur des tourbières drainées ou sur d'anciennes zones de forêts tropicales transformées en terrains agricoles).
- Parmi les accords mondiaux pourraient figurer des mécanismes d'échange de crédits carbone ou d'autres formes de crédits (par exemple les crédits « eau verte ») ainsi que des dispositifs pour gérer les ressources des sols afin d'en tirer tous les avantages environnementaux, sociaux et économiques sur site et de hors site (Tanneberg et Wichtmann 2011). L'adoption généralisée de stratégies de gestion du carbone organique dans les sols dépendra de la stabilité et du niveau du prix sur les marchés du carbone organique ainsi que de l'accès à des mécanismes financiers et mesures d'incitation appropriés et du règlement de questions locales comme les droits de propriété foncière. Les crédits carbone ne sont efficaces que si la séquestration de carbone organique peut être adéquatement surveillée et évaluée et si les incidences et environnementales à long terme sont adéquatement prises en compte en même temps que les avantages économiques à court terme.
- Les politiques de conservation dont l'objectif est de stopper la dégradation de la biodiversité et de protéger les écosystèmes peuvent aussi préserver les stocks de carbone dans les sols (par exemple lorsque les tourbières sont réhumidifiées ou lorsque la végétation de surface est restaurée) (Bain et al. 2011). La Convention sur la diversité biologique et la Convention de Ramsar sur les terres humides visent la protection et la conservation des zones désignées. Un mécanisme international de protection du patrimoine mondial que représentent les sols a été mis en place dans le cadre de la Convention concernant la protection du patrimoine mondial. Sa mise en œuvre permettrait d'améliorer la protection et la gestion des ressources des sols, y compris le carbone.

d'autres organismes des Nations Unies, y compris le PNUE, l'établissement d'un Partenariat mondial sur les sols afin de soutenir et de faciliter la réalisation d'efforts conjoints pour assurer la gestion durable des ressources des sols dans l'intérêt de la sécurité alimentaire et de la mise en œuvre de mesures d'adaptation et d'atténuation face aux changements climatiques (FAO 2012). Les réglementations et incitations nationales et locales peuvent aussi être utilisées pour encourager l'amélioration de la gestion du carbone du sol et en tirer tous les avantages, notamment en s'attachant à une utilisation plus rationnelle des terres existantes et en s'employant à restaurer les sols dégradés.

Parmi les différents mécanismes envisageables, on peut citer les suivants :

- La planification de l'utilisation des sols de façon à exclure les sols vulnérables dont l'exploitation peut conduire à des pertes de carbone organique.
- La promotion de la gestion de façon à protéger et améliorer la matière organique en tant qu'élément essentiel d'une bonne qualité du sol et de l'environnement.
- Des règlements et des directives pour limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, les rejets de carbone du sol, d'azote et d'autres contaminants dans les eaux de surface et les eaux souterraines et le drainage des sols riches en carbone.
- La promotion des sources de nutriments pour les plantes (par exemple les cultures de couverture, les légumineuses, les plantes résistantes aux bio-agresseurs), qui améliorent les stocks de carbone organique.

- Des incitations financières, comme des paiements pour le stockage du carbone, la lutte contre les inondations, l'amélioration de la qualité de l'eau, la conservation de la biodiversité du sol et d'autres services écosystémiques.
- Des systèmes consultatifs techniques (services de vulgarisation) pour l'agriculture et la foresterie qui concernent l'ensemble des services écosystémiques soutenus par les sols.

Le carbone du sol est aisément perdu et difficile à reconstituer. Étant donné qu'il joue un rôle central dans la productivité agricole, la stabilisation du climat et d'autres services écosystémiques vitaux, la mise en place de mesures visant à favoriser sa gestion durable pourrait avoir de nombreux avantages à court et à long terme. Ces mesures devraient viser une meilleure répartition des ressources du sol entre les différentes utilisations et des pratiques de gestion plus rationnelles que celles prônées dans le cadre des différentes politiques mises en œuvre actuellement pour assurer des services écosystémiques particuliers. Des politiques intégrées et soigneusement conçues permettraient aussi d'éviter de générer des incitations financières qui créent de nouveaux conflits ou arbitrages impliquant le carbone du sol.

Accorder plus d'importance, à tous les niveaux de gouvernance, à la gestion des sols de façon à tirer au mieux parti des multiples avantages d'une gestion efficace du carbone constituerait un pas important vers la préservation des services écosystémiques indispensables à la population mondiale en 2030 et au-delà.

La fauvette aquatique (*Acrocephalus paludicola*) est menacée au niveau mondial et ne survit que dans les terrains humides cultivés et riches en carbone. Photo : Franziska Tanneberger



Références

- Altieri, M.A. (1995). *Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture*. Westview Press, Boulder, Colorado (États-Unis)
- Álvarez, R. et Steinbach, H. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crop yields in the Argentine Pampas. *Soil & Tillage Research*, 104, 1-15
- Bai, Z.G. et Dent, D.L. (2009). Recent land degradation and improvement in China. *Ambio*, 38, 150-156
- Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L. et Schaepman, M.E. (2008). Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24, 223-234
- Bain, C.G., Bonn, A., Stoneman, R., Chapman, S., Coupar, A., Evans, M., Gearey, B., Howat, M., Joosten, H., Keenleyside, C., Labadz, J., Lindsay, R., Littlewood, N., Lunt, P., Miller, C.J., Moxey, A., Orr, H., Reed, M., Smith, P., Swales, V., Thompson, D.B.A., Thompson, P.S., Van de Noort, R., Wilson, J.D. et Worrall, F. (2011). Union internationale pour la conservation de la nature (IUCN), Royaume-Uni, Commission d'enquête sur les tourbières. Programme sur les tourbières de l'IUCN Royaume-Uni, Edinburgh (Royaume-Uni)
- Banque mondiale (2010). Project Information Document: Kenya Agricultural Carbon Project. <http://web.worldbank.org/external/projects/main?pagePK=64283627&piPK=73230&theSitePK=40941&menuPK=228424&ProjectID=P107798>
- Batjes, N.H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 47, 151-163
- Batjes, N.H. (2011). Soil organic carbon stocks under native vegetation - revised estimates for use with the simple assessment option of the Carbon Benefits Project system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142, 365-373
- Batjes, N.H. et Sombroek, W.G. (1997). Possibilities for carbon sequestration in tropical and sub-tropical soils. *Global Change Biology*, 3, 161-173
- Beer, J. et Blodau, C. (2007). Transport and thermodynamics constrain belowground carbon turnover in a northern peatland. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 2989-3002
- Bellefontaine, R., Bernoux, M., Bonnet, B., Cornet, A., Cudennec, C., D'Aquino, P., Droy, J., Jaffret, S., Leroy, M., Magnoux, M. et Réquier-Desjardins, M. (2011). The African Great Green Wall project. What advice can scientists provide? *CSFD Topic Briefs - février 2011*. http://www.csfd-desertification.org/pdf_csfd/GMV/fiche-A4-GMV-eng.pdf
- Bernoux, M., Branca, G., Carro, A., Lipper, L., Smith, G. et Bockel, L. (2010). Ex-ante greenhouse gas balance of agriculture and forestry development programs. *Scientia Agricola*, 67(1), 31-40
- Black, H.J., Glenk, K., Towers, W., Moran, D. et Hussain, S. (2008). Valuing our soil resource for sustainable ecosystem services. Scottish Government Environment, Land Use and Rural Stewardship Research Programme 2006-2010. <http://www.programme3.net/soil/p3-soilposter-2.pdf>
- Brantley, S. (2010). Weathering Rock to regolith. *Nature Geoscience*, 3, 305
- Broadbent, F.E. (1953). The soil organic fraction. *Advances in Agronomy*, 5, 153-183
- Brown, S. et Lugo, A.E. (1990). Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen contents of soil in Puerto Rico and U.S. *Plant and Soil*, 124, 53-64
- Bruinsma, J. (2003). *World Agriculture: Towards 2015/2030, an FAO Perspective*. Earthscan Publications, Londres
- Brussaard, L., de Ruiter, P.C. et Brown, G.G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 121, 233-244
- Burauel, P. et Baßmann, F. (2005). Soils as filter and buffer for pesticides – experimental concepts to understand soil functions. *Environmental Pollution*, 133, 11-16
- Carbon Benefits Project (CBP) (en préparation). Projet sur les avantages pour les stocks de carbone : www.unep.org/ClimateChange/carbon-benefits/cbp_pim
- Cartographie mondiale des sols (2011). Global Soil Information Facilities. <http://www.globalsoilmap.net/category/image-galleries/global-soil-information-facilities-book>
- Cerri, C.E.P., Easter, M., Paustian, K., Killian, K., Coleman, K., Bernoux, M., Fallow, P., Powlson, D.S., Batjes, N.H., Milne, E. et Cerri, C.C. (2007). Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 122(1), 46-57
- CCNUCC (Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques) (2012). *Land Use, Land-Use Change and Forestry (LULUCF)*. http://unfccc.int/methods_and_science/lulucf/items/3060.php
- Conant, R.T., Paustian, K. et Elliott, E.T. (2001). Grassland management and conversion into grassland: Effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2), 343-355
- Conant, R.T., Ryan, M.G., Ågren, G.I., Birge, H.E., Davidson, E.A., Eliasson, P.E., Evans, S.E., Frey, S.D., Giardina, C.P., Hopkins, F.M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M.U.F., Lavallee, J.M., Leifeld, J., Parton, W.J., Megan Steinweg, J., Wallenstein, M.D., Wetterstedt, J.A.M. et Bradford, M.A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17, 3392-3404
- Couwenberg, J. (2007). Biomass energy crops on peatlands: On emissions and perversions. *IMCG Newsletter*, 3, 12-14
- Couwenberg, J. (2011). Greenhouse gas emissions from managed peat soils: Is the IPCC reporting guidance realistic? *Mires and Peat*, 8, 1-10. <http://www.mires-and-peat.net/>
- Couwenberg, J., Dommain, R. et Joosten, H. (2010). Greenhouse gas fluxes from tropical peatlands in south-east Asia. *Global Change Biology*, 16, 1715-1732
- Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärisch, S., Dubovik, D., Lianzhchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovitch, A. et Joosten, H. (2011). Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674, 67-89
- De Figueiredo, E.B. et La Scala Jr., N. (2011). Greenhouse gas balance due to the conversion of *sugarcane* areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141, 77-85
- Dexter, A.R. (2004). Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120, 201-214
- Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire (2005). *Écosystèmes et bien-être*. Island Press, Washington.
- Fallow, P., Jones, C.D., Ades, M. et Paul, K. (2011). Direct soil moisture controls of future global soil carbon changes: An important source of uncertainty. *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB3010
- FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) (2011). The Ex Ante Carbon-balance Tool. <http://www.fao.org/tc/exact/en>
- FAO (2012). Partenariat mondial sur les sols. http://www.fao.org/nr/water/landandwater_gsp.html
- FAO/IIASA (Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués)/ISRIC-Information mondiale sur les sols/ISSCAS (Institut des sciences du sol de l'Académie chinoise des sciences)/JRC (Centre commun de recherche de l'Union européenne) (2009). Base de données harmonisées sur les sols du monde (version 1.1). FAO, Rome (Italie) et IIASA, Laxenburg (Autriche). http://www.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/HWSD_Data.html?sb=4
- Fearnside, P.M. et Barbosa, R.I. (1998). Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 108, 147-166
- Fernández, R., Quiroga, A., Zoratti, C. et Noellemeyer, E. (2010). Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage. *Soil & Tillage Research*, 109, 103-109
- Foresight (2011). *The Future of Food and Farming: Challenges and choices for global sustainability*. Final Project Report. The Government Office for Science, Londres.
- Gates Foundation (2011). 2010 *Annual Report: Strategy Refinement* (Bill & Melinda Gates Foundation). <http://www.gatesfoundation.org/annualreport/2010/Pages/strategy-development.aspx>
- Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecologica Applications*, 1, 182-195
- Hillier, J., Walter, C., Malin, D., Garcia-Suarez, T., Mila-i-Canals, L. et Smith, P. (2011). A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production. *Environmental Modelling and Software*, 26, 1070-1078
- Houghton, R.A. (1995). Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In Lal, R., Kimble, J., Levine, E. et Stewart, B.A. (eds.), *Soils and Global Change*. Lewis Publishers, Boca Raton, Floride (USA)
- Janzen, H.H. (2006). The soil carbon dilemma: Shall we hoard it or use it? *Soil Biology and Biochemistry*, 38, 419-424
- Jauhainen, J., Hooijer, A. et Page, S. E. (2011). Carbon dioxide emissions from an Acacia plantation on peatland in Sumatra, Indonesia. *Biogeosciences Discuss.*, 8, 8269 – 8302
- Joosten, H. (2009). *The Global Peatland CO2 Picture. Peatland status and drainage associated emissions in all countries of the World*. Wetlands International, Ede (Pays-Bas)
- Kapos V., Ravilious, C., Campbell, A., Dickson, B., Gibbs, H., Hansen, M., Lysenko, I., Miles, L., Price, J., Scharlemann, J.P.W. et Trumper, K. (Eds.) PNUE-WCMC, Cambridge (Royaume-Uni)

- Kapos, V., Ravilious, C., Leng, C., Bertzy, M., Osti, M., Clements, T. et Dickson, B. (2010). *Carbon, biodiversity and ecosystem services: Exploring co-benefits*. Cambridge PNUE-WCMC, Cambridge (Royaume-Uni)
- Lal, R. (2010a). Managing Soils and Ecosystems for Mitigating Anthropogenic Carbon Emissions and Advancing Global Food Security. *BioScience* 60(9), 708-721
- Lal, R. (2010b). Managing soils for a warming earth in a food-insecure and energy-starved world. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173, 4-15
- La Scala, Jr., N., de Figueiredo, E.B. et Panosso, A.R. (2011). On the mitigation potential associated with atmospheric CO₂ sequestration and soil carbon accumulation in major Brazilian agricultural activities. *Brazilian Journal of Biology*
- Malamoud, K., McBratney, A.B., Minasny, B. et Field, D.J. (2009). Modelling how carbon affects soil structure. *Geoderma*, 149, 19-26
- Marks, E., Aflakpui, G.K.S., Nkem, J., Poch, R. M., Khouma, M., Kokou, M., Sagoe, R. et Sebastião, M.-T. (2009). Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa. *Biogeosciences*, 6, 1825-1838
- Milne, E., Sessay, M., Paustian, K., Easter, M., Batjes, N.H., Cerri, C.E.P., Kamoni, P., Gicheru, P., Oladipo, E.O., Minxia, M., Stocking, M., Hartman, M., McKeown, B., Peterson, K., Selby, D., Swan, A., Williams, S. et Lopez, P.J. (2010). Towards a standardized system for the reporting of carbon benefits in sustainable land management projects. *Grassland carbon sequestration: management, policy and economics* (Procès verbaux de l'Atelier sur le rôle de la séquestration du carbone dans l'atténuation des effets du changement climatique Rome, avril 2009). Gestion intégrée des cultures, 11, 105-117
- Montgomery, D.R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104, 13268-13272
- Nachtergaele, F.O., Petri, M., Biancalani, R., Lynden, G., van, Velthuizen, H. van, et Bloise, M. (2011). Global Land Degradation Information System (GLADIS) Version 1.0. An Information database for Land Degradation Assessment at Global Level, LADA rapport technique n. 17, FAO, Rome
- National Research Council des États-Unis (2001). US NRC (United States National Research Council) (2001). *Basic Research Opportunities in the Earth Sciences*, National Academies Press, Washington.
- Noellemeyer, E., Frank, F., Alvarez, C., Morazzo, G. et Quiroga, A. (2008). Carbon contents and aggregation related to soil physical and biological properties under a land-use sequence in the semiarid region of Central Argentina. *Soil and Tillage Research*, 99 (2), 179-190
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. et Sombroek W.G. (1991). World Map of the Status of Human-Induced Soil Degradation: An Explanatory Note (édition révisée), PNUE et ISRIC, Wageningen (Pays-Bas)
- ORNL (1998). Terrestrial ecosystem responses to global change: a research strategy. Environmental Sciences Division Publication No. 4821.
- Page, S., Rieley, J.O. et Banks, C.J. (2010). Global and regional importance of the tropical peatland carbon pool. *Global Change Biology*, 17, 798-818
- PlanetEarth (2005). *Soil – Earth's living skin*. International Year of Planet Earth, Trondheim (Norvège). http://www.isric.nl/isric/webdocs/Docs/Soil_2.pdf
- PNUE-WCMC (Centre mondial de surveillance de la conservation de la nature) (2008). *Carbon and biodiversity: A demonstration atlas*.
- PNUE-WCMC (2009). Carte mise à jour du carbone mondial. Affiche présentée à la session de la Conférence des Parties à la CCNUCC, tenue à Copenhague. [Article par Scharlemann et al. sur la méthodologie, en préparation (2012)].
- Powlson, D.S., Whitmore, A.P. et Goulding, K.W.T. (2011). Soil carbon sequestration to mitigate climate change: A critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62, 42-55
- Ravindranath, N.H. et Ostwald, M. (2008). *Carbon Inventory Methods: Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects*. *Advances in Global Change Research* 29. Springer Science + Business Media B.V.
- Reed, M., Buckmaster, S., Moxey, A., Keenleyside, C., Fazey, I., Scott, A., Thomson, K., Thorp, S., Anderson, R., Bateman, I., Bryce, R., Christie, M., Glass, J., Hubacek, K., Quinn, C., Maffey, G., Midgely, A., Robinson, G., Stringer, L., Lowe, P. et Slee, B. (2010). *Policy Options for Sustainable Management of UK Peatlands. Scientific Review*. Programme sur les tourbières de la Commission du Royaume-Uni de l'UICN, Programme de la Commission d'enquête sur les tourbières
- Sarkkola, S. (ed.) (2008). *Greenhouse impacts of the use of peat and peatlands in Finland. Research Programme Final Report*. Ministère de l'agriculture et des forêts, Helsinki
- Schils, R., Kuikman, P., Liski, J., Van Oijen, M., Smith, P., Webb, J., Alm, J., Somogyi, Z., Van den Akker, J., Billett, M., Emmett, B., Evans, C., Lindner, M., Palosuo, T., Bellamy, P., Jandl, R. et Hiederer, R. (2008). *Review of existing information on the interrelations between soil and climate change* (ClimSoil). Rapport final. Bruxelles, Commission européenne
- Schmidt, M.W.J., Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, P.D., Weiner, S. et Trumbore, S.E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478, 49-56
- Service d'information sur les sols africains (2011). Africa Soil Information Service Labs: Data Analysis. <http://africasoils.net/lab/s/data-analysis-2/>
- Smith P, Gregory, P.J., Van Vuuren, D., Obersteiner, M., Havlik, P., Rounsevell, M., Woods, J., Stehfest, E. et Bellarby, J. (2010). Competition for land. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 365, 2941-2957
- Smith, P., Martino, D., Cai, Z., Gwary, D., Janzen, H., Kumar, P., McCarl, B., Ogle, S., O'Mara, F., Rice, C., Scholes, B. et Sirotenko, O. (2007). Agriculture. In Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R., and Meyer, L.A. (eds.), *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (États-Unis)
- Tanneberger, F. et Wichtmann, W. (eds.) (2011). *Carbon credits from peatland rewetting*. Climate – biodiversity – land use. Science, policy, implementation and recommendations of a pilot project in Belarus. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart (Allemagne)
- Tanneberger, F., Tegetmeyer, C., Dylawski, M., Flade, M. et Joosten, H. (2009). Commercially cut reed as a new and sustainable habitat for the globally threatened Aquatic Warbler. *Biodiversity and Conservation*, 18, 1475-1489
- Tarnocai, C., Canadell, J.G., Schuur, E.A.G., Kuhry, P., Mazhitova, G. et Zimov, S. (2009). Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, GB2023
- Taylor, L.L., Leake, J.R., Quirk, J., Hardy, K., Banwart, S.A. et Beerling, D.J. (2009). Biological weathering and the long-term carbon cycle: integrating mycorrhizal evolution and function into the current paradigm. *Geobiology*, 7, 171-191
- Tiessen, H. et Stewart, J.W.B. (1983). Particle-size fractions and their use in studies of soil organic matter: 2. Cultivation effects on organic matter composition in size fractions. *Soil Science Society of America Journal*, 47, 509-514
- Tuomi, M., Vanhala, P., Karhu, K., Fritze, H. et Liski, J. (2008). Heterotrophic soil respiration – Comparison of different models describing its temperature dependence. *Ecological Modelling*, 21, 182-190
- Verborg, P.H., Neumann, K. et Nol, L. (2011). Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Global Change Biology*, 17, 974-989
- Verwer, C.C. et Van der Meer, P.J. (2010). *Carbon pools in tropical peat forests – Towards a reference value for forest biomass carbon in relatively undisturbed peat swamp forests in Southeast Asia*. Alterra, Wageningen
- Von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. et Flessa, H. (2006). Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science*, 57, 426-445
- Wachs, T. et Thibault, M. (eds.) (2009). *Benefits of Sustainable Land Management*. WOCAT (World Overview of Conservation Approaches and Technologies), Berne (Suisse)
- Watson, L. (2010). Portugal gives green light to pasture carbon farming as a recognised offset. *Australian Farm Journal*, janvier, 44-47
- Wichtmann, W., Tanneberger, F., Wichtmann, S. et Joosten, H. (2010). Paludiculture is paludifuture. Climate, biodiversity and economic benefits from agriculture and forestry on rewetted peatland. *Peatlands International*, 1, 48-51
- Wicke, B., Dornburg, V., Junginger, M. et Faaij, M. (2008). Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications. *Biomass and Bioenergy*, 32, 1322-1337
- WRB (2006). World Reference Base for soil resources – A framework for international classification, correlation and communication. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/wrb/doc/wrb2006final.pdf>
- Zach, A., Tiessen, H. et Noellemeyer, E. (2006). Carbon turnover and ¹³C natural abundance under land-use change in the semiarid La Pampa, Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 1541-1546



Fermeture et démantèlement de centrales nucléaires

Un autre regard après l'accident de Fukushima

Depuis l'accident de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi au Japon, plusieurs pays revoient leur programme d'énergie nucléaire. L'Allemagne a décidé d'y mettre totalement fin. Quelles que soient les décisions prises par les gouvernements, les déclassements de réacteurs civils devraient se multiplier à travers le monde au moment où les premières générations de ces installations arrivent au terme de leur durée de vie initiale.

Il est prévu de mettre hors service jusqu'à 80 réacteurs civils au cours des dix prochaines années. Malgré le renouvellement probable des licences d'exploitations de bon nombre de ces centrales, celles-ci seront à terme déclassées. Il s'agit là d'une tâche énorme, qui nécessite des réglementations nationales et internationales adéquates, d'importants financements, des technologies novatrices et un grand nombre de travailleurs spécialisés.

Depuis plusieurs années, les démantèlements s'effectuent sans aucun accident radiologique. Il convient cependant de se poser certaines questions : À quel point ces opérations sont-elles sûres ? Quelles sont les conséquences de la suppression de certains programmes nationaux, comme celui de l'Allemagne ? Les pays disposent-ils de l'expertise et des infrastructures nécessaires pour faire face à l'augmentation prévue du nombre de centrales à déconstruire ? Et comment couvrir les frais énormes et imprévisibles de telles interventions ?

Qu'est-ce qu'un démantèlement ?

On entend par démantèlement la gestion en toute sécurité d'installations et sites nucléaires arrivés en fin de vie. Plusieurs types différents d'installations sont concernés : centrales, usines de traitement de combustibles, réacteurs de recherche, usines d'enrichissement, laboratoires nucléaires et radiologiques, mines d'uranium et usines de traitement de l'uranium. Les réacteurs propulsant certains sous-marins et navires (notamment des brise-glaces et porte-avions) doivent également être démantelés. Le principal secteur de croissance en matière de déclassement est celui des réacteurs civils (**encadré 1**).

Les démantèlements de réacteurs civils devraient se multiplier au cours de la prochaine décennie. Photo : visdia

Auteurs : Jon Samseth (présidente), Anthony Banford, Borislava Batandjeva-Metcalf, Marie Claire Cantone, Peter Lietava, Hooman Peimani and Andrew Szilagyi

Rédacteur scientifique : Fred Pearce

Le démantèlement ne constitue qu'une partie de la mise à l'arrêt définitif d'un réacteur nucléaire, qui commence par le retrait du combustible usé hautement radioactif et peut se terminer par la décontamination d'une installation ou d'un site tout entier, et dans certains cas du sol et de l'eau souterraine (AIEA 2004a). Le processus comprend la démolition des bâtiments et autres structures, notamment des parties parfois radioactives situées près du cœur du réacteur, ainsi que la manipulation sur place de matériaux de construction (généralement de l'acier et du béton) puis leur conditionnement et transport en vue de leur entreposage et élimination en toute sécurité. Chaque chantier présente des défis particuliers et des risques pour la santé humaine et l'environnement. Les difficultés rencontrées sont souvent liées aux choix opérés il y a plusieurs décennies en matière de conception et de construction, à une époque où le démantèlement entraînait peu en ligne de compte, ainsi qu'aux pratiques d'exploitation adoptées pendant plusieurs années.

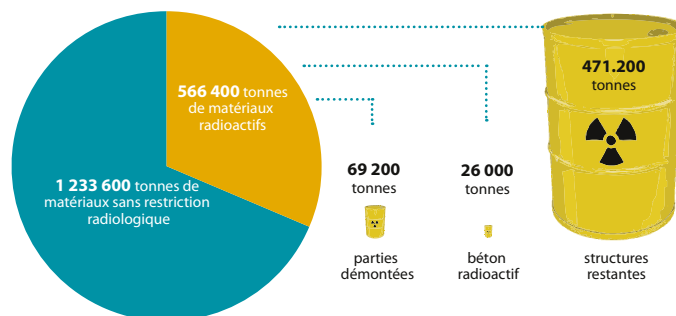


Figure 1 : lors du démantèlement, de vastes quantités de déchets sont produites, tant radioactifs (orange) que radiologiquement sûrs (bleu). Ce schéma est basé sur le débit massique de l'opération de démantèlement de la centrale de Greifswald (Allemagne). Source : Adapté de EWN – The Greifswald Nuclear Power Plant Site



La majeure partie des déchets de déconstruction ne font l'objet d'aucune restriction au plan radiologique (**figure 1**). Quant aux déchets radioactifs issus de ce type de travaux, ils ont un niveau d'activité qui va de très faible à moyen (**tableau 1**). C'est pendant l'exploitation du réacteur que sont produits les déchets hautement radioactifs (le combustible usé). Si les déchets de déconstruction présentent *un taux de radioactivité généralement bien plus faible* que ceux engendrés lors de l'exploitation, le *volume de déchets radioactifs résultant* du démantèlement est en revanche bien plus important que celui engendré au stade de l'exploitation. Après la mise hors service du réacteur, les niveaux de rayonnement diminuent avec le temps.

Encadré 1 : Le réacteur nucléaire

Le type le plus courant de réacteur est celui à eau sous pression (**figure 2**). Dans ce système, la chaleur engendrée par l'uranium radioactif dans la cuve du réacteur est absorbée par l'eau et acheminée jusqu'à un échangeur de chaleur qui produit de la vapeur. Cette vapeur actionne une turbine et un générateur, qui produit de l'électricité. Refroidie (par l'eau d'un cours d'eau, d'un lac, de la mer ou à travers une tour de refroidissement), la vapeur se condense en eau.

La cuve du réacteur, le générateur de vapeur et, dans certains cas, la piscine de stockage du combustible irradié (non représenté dans la figure) sont situés dans une structure de confinement en acier épais et/ou en béton, qui empêche les émissions radioactives dans l'environnement. Les parties devenues radioactives à l'intérieur du réacteur et qui exigent une attention particulière pendant le démantèlement sont la cuve elle-même et les éléments qu'elle contient, notamment les barres de contrôle. La tuyauterie, les pompes et autres équipements ayant été en contact direct avec l'eau qui a traversé la cuve ou la piscine d'entreposage sont également contaminés. Des quantités relativement faibles de béton sont parfois contaminées et doivent être traitées (O'Sullivan et al. 2010).

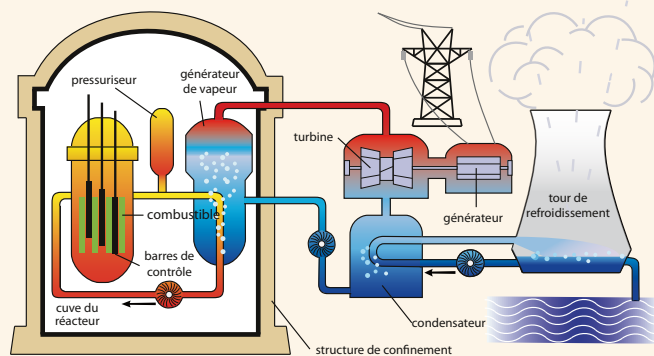


Figure 2 : Un réacteur à eau sous pression produit de l'électricité en utilisant de la chaleur engendrée par de l'uranium radioactif pour créer de grandes quantités de vapeur qui actionnent une turbine et un générateur. Source : Kazimi (2003)

Démantèlement d'installations : situation et tendances

En janvier 2012, 138 réacteurs nucléaires civils avaient été mis hors service dans 19 pays, dont 28 aux États-Unis, 27 au Royaume-Uni, 27 en Allemagne, 12 en France, 9 au Japon et 5 en Fédération de Russie (AIEA 2012a). Au moment de la rédaction de cet annuaire, seuls 17 d'entre eux ont été complètement démantelés. Le déclassement constitue un processus complexe qui prend plusieurs années. Le Royaume-Uni, par exemple, n'a achevé son premier chantier qu'en 2011. La centrale, située à Sellafield, avait été fermée en 1981 (WNN 2011a).

Le nombre de réacteurs civils hors service en attente de démantèlement devrait augmenter. Il y a également un vaste héritage de réacteurs militaires et de recherche (**encadré 2**). La durée de vie initiale d'un réacteur civil est de 30 à 40 ans. On compte actuellement 435 centrales civiles en exploitation dans le monde, représentant une puissance installée de 368,279 milliards de watts (GWe) (**figure 3**). Parmi celles-ci, 138 ont plus de 30 ans d'âge et 24 plus de 40 ans (AIEA 2012a). L'âge moyen des centrales nucléaires en service est de 27 ans (AIEA 2012a, ANM 2011a).

De nombreuses centrales civiles continueront à fonctionner en toute sécurité au-delà de leur durée de vie initialement prévue. Certaines verront leur licence d'exploitation renouvelée jusqu'à 60, voire 80 ans (Energetics Inc. 2008). On dénombre par ailleurs 63 installations civiles en construction, représentant une puissance nette de 61 GWe (AIEA 2012a, ANM 2011b) (**figure 4**). Toute centrale nucléaire doit un jour être démantelée et les déchets radioactifs devront être gérés et éliminés de manière sûre (Bylkin et al. 2011).

En mars 2011, un tremblement de terre dévastateur d'une amplitude de 8,9 suivi d'un tsunami de 15 m a frappé le Japon, faisant des milliers de morts et de blessés et causant des dégâts sans précédent aux habitations et infrastructures. Ces deux phénomènes ont endommagé la centrale de Fukushima, provoquant le rejet de matières radioactives dans l'atmosphère et la mer. La zone autour du site, dans un rayon d'une trentaine de kilomètres, est devenue inhabitable et impropre à la production alimentaire, pour de nombreux mois ou années à certains endroits. La capacité de production d'électricité du Japon a été gravement affectée et l'impact politique produit dans d'autres pays a conduit certains gouvernements à remettre en question leur dépendance à l'égard du nucléaire. Jusqu'ici, seule l'Allemagne a décidé d'arrêter la production d'énergie nucléaire (BMU 2011, ANM 2011c) mais dans de nombreux autres pays le débat se poursuit (Okyar 2011). L'un des principaux constructeurs de centrales en Allemagne a annoncé qu'il arrêterait la construction de réacteurs partout dans le monde (Der Spiegel 2011). Étant donné que certains réacteurs civils destinés jusque là à rester opérationnels pendant de nombreuses années vont rejoindre ceux qui arrivent au terme de leur durée de vie initiale, le nombre total d'installations à démanteler devrait considérablement augmenter.

Encadré 2 : L'héritage nucléaire

Les premiers programmes nucléaires ont laissé un héritage considérable d'installations contaminées, notamment des centrales nucléaires. Certaines étaient destinées à un usage civil mais la majorité servait à des fins militaires, scientifiques et de démonstration. Jusqu'à ce qu'elles soient démantelées avec succès, les installations contaminées poseront des risques constants et, pour une grande partie du public, jetteront une ombre sur l'industrie nucléaire actuelle. Parmi les difficultés rencontrées par les personnes engagées dans des opérations de déconstruction on notera l'insuffisance de données historiques et le manque d'information sur l'état des sites et équipements. L'Autorité britannique de démantèlement nucléaire signale que « certaines installations ne possèdent pas d'inventaire détaillé des déchets ou de plans fiables; un bon nombre de ces projets étaient des initiatives isolées » (UK NDA 2011).

Le Département américain de l'énergie (DoE) a entrepris de décontaminer, d'ici à 2025, une centaine d'anciens sites de recherche et d'armements nucléaires, couvrant plusieurs milliers d'hectares. Cela impliquera la gestion de millions de mètres cube de débris et de sol contaminé, notamment de vastes superficies où l'eau souterraine a été contaminée (Szilagyi 2012). Par exemple, le laboratoire national d'Oak Ridge dans le Tennessee couvre 15 000 hectares et comprend plus d'une centaine de sites contaminés connus (US DoE 2011). L'installation nucléaire d'Hanford dans l'État de Washington, plus vaste, renferme d'importantes quantités de déchets liquides radioactifs (US EPA 2011a).

Le Département américain de l'énergie a assaini avec succès des sites complexes comme celui de Rocky Flats dans le Colorado (Tetra Tech 2012). Néanmoins, certains sites ne pourront sans doute jamais être décontaminés en vue d'une libre utilisation. Au Royaume-Uni, l'Agence écossaise de protection de l'environnement (SEPA) est arrivée à la conclusion, en 2011, que tenter d'éliminer toute trace de contamination radioactive sur la côte et le fond marin autour de la centrale de Dounreay ferait « plus de tort que de bien » (SEPA 2011). Dans de nombreux pays, il sera cependant possible de réutiliser les sites démantelés qui n'ont pas été complètement décontaminés pour de nouvelles applications nucléaires (AIEA 2011a).

Les réacteurs de sous-marins et navires constituent un autre type d'héritage préoccupant. Le démantèlement d'un sous-marin nucléaire typique produit plus de 800 tonnes de déchets dangereux (Kværner Moss Technology 1996). À la fin de la Guerre froide, on dénombrait plus de 400 sous-marins nucléaires, en activité ou en construction, principalement dans l'ex-Union soviétique et aux États-Unis (ANM 2011d). Un grand nombre de sous-marins nucléaires ont été mis hors service et la plupart d'entre eux attendent d'être démantelés. Les États-Unis en ont déclassé plusieurs; leurs réacteurs ont été retirés et soigneusement emballés en vue de leur élimination à Hanford. Avant 1988, quelque 16 réacteurs provenant de sous-marins démontés dans l'ex-Union soviétique ont été jetés à la mer (Mount et al. 1994, AIEA 1999).

Trois stratégies de démantèlement

Les stratégies généralement acceptées sont : le démantèlement immédiat, le démantèlement différé et l'enceinte de confinement. Chacune de ces approches requiert des décisions précoces et claires

concernant la programmation de la fermeture de l'installation et l'utilisation future prévue du site (**figure 5**). Elles exigent également un financement adéquat, un personnel qualifié, une surveillance soumise à une réglementation ainsi que des installations de stockage et d'élimination (AIEA 2006).

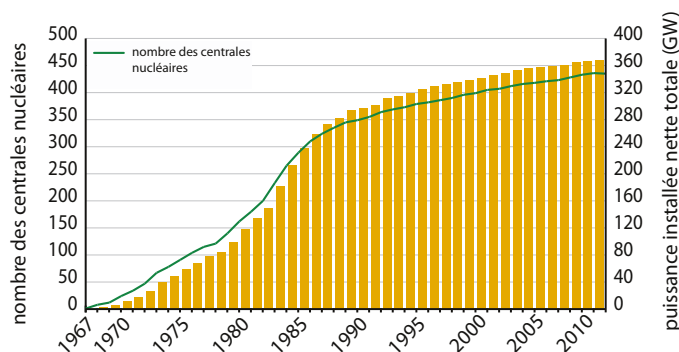


Figure 3 : Début 2012, on recensait 435 réacteurs nucléaires dans le monde. La puissance installée a augmenté de manière relativement plus rapide que le nombre de réacteurs. Source: AIEA (2012)

Démantèlement immédiat : Tous les équipements, structures et autres parties d'une installation contaminée par la radioactivité sont évacués (ou totalement décontaminés) pour pouvoir traiter le site jusqu'à sa décontamination en vue d'une utilisation limitée ou illimitée (site dit « non contaminé »). Cette stratégie adoptée d'un commun accord au niveau international présente l'avantage de pouvoir profiter de l'expérience du personnel d'exploitation encore sur place, qui connaît l'histoire du site et possède notamment des informations sur d'éventuels incidents passés susceptibles de compliquer le démantèlement. Le démantèlement immédiat permet en outre d'éviter les effets imprévisibles de la corrosion et autres dégradations affectant à long terme certaines parties du réacteur, d'éliminer tout risque d'exposition future aux radiations et de redonner au paysage son aspect initial. L'inconvénient est que d'une part les niveaux de radioactivité dans les parties du réacteur sont plus élevés que dans le cas d'une opération différée, ce qui impose un surcroît de précautions lors de la déconstruction, et d'autre part les volumes de déchets classés radioactifs sont plus importants.



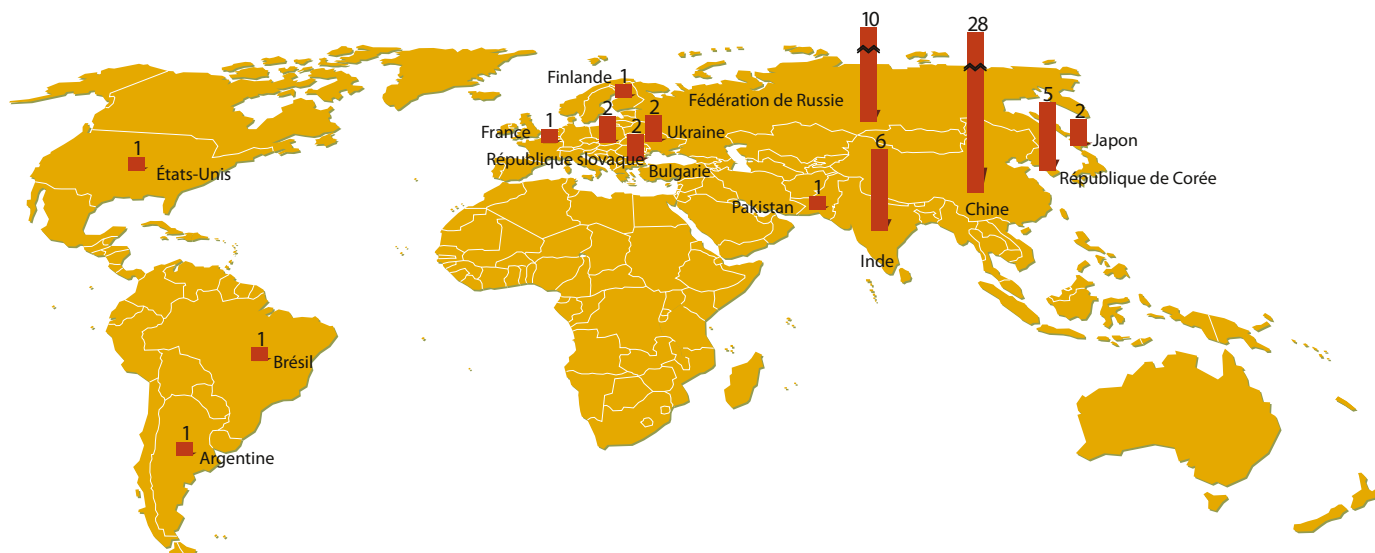


Figure 4 : Réacteurs nucléaires en construction. On en dénombre 63, situés pour la plupart en Chine, en Inde et en Fédération de Russie. *Source : Adapté de AIEA (2012)*

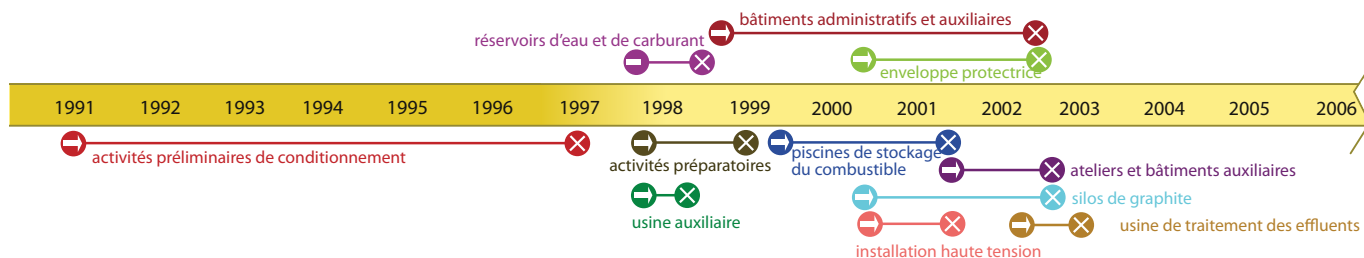
Démantèlement différé : Après le retrait de tout le combustible utilisé, la tuyauterie est drainée et l'installation sécurisée en attendant son démantèlement ultérieur. Les périodes de report envisagées dans le cadre de cette méthode, souvent appelée « stratégie de confinement sûr », vont de 10 à 80 ans (Deloitte 2006). Par exemple, le réacteur de Dodewaard, aux Pays-Bas, a été fermé en 1997 mais ne sera démantelé qu'à partir de 2047 (AIEA 2004b). Le démantèlement différé permet d'abaisser le taux de radioactivité des matériaux (**encadré 3**), ce qui réduit les problèmes d'élimination et les risques d'accident pour les travailleurs. Entre temps, de nouvelles techniques, notamment en robotique, rendant plus sûres les opérations de démantèlement, pourront être mises au point. L'inconvénient réside dans la détérioration possible de certains matériaux, comme le béton ou l'acier, qui complique la déconstruction. De plus, les connaissances personnelles de l'histoire d'un site se perdent avec le temps.

Enceinte de confinement : Une fois le combustible utilisé retiré, les réacteurs sont enfermés dans une structure faite d'un matériau très

durable, comme le béton, pour permettre une décroissance radioactive. Cette approche relativement récente est surtout envisagée dans des situations spéciales (petits réacteurs de recherche ou lieux reculés, par exemple). Comme la manipulation de matériaux contaminés se trouve réduite, les travailleurs sont moins exposés à la radioactivité. Il faut cependant assurer une maintenance et une surveillance à long terme. Aux États-Unis, 5 réacteurs ont été recouverts d'un sarcophage; 2 chantiers ont été achevés en 2011 sur le site de Savannah River (**figure 6**).

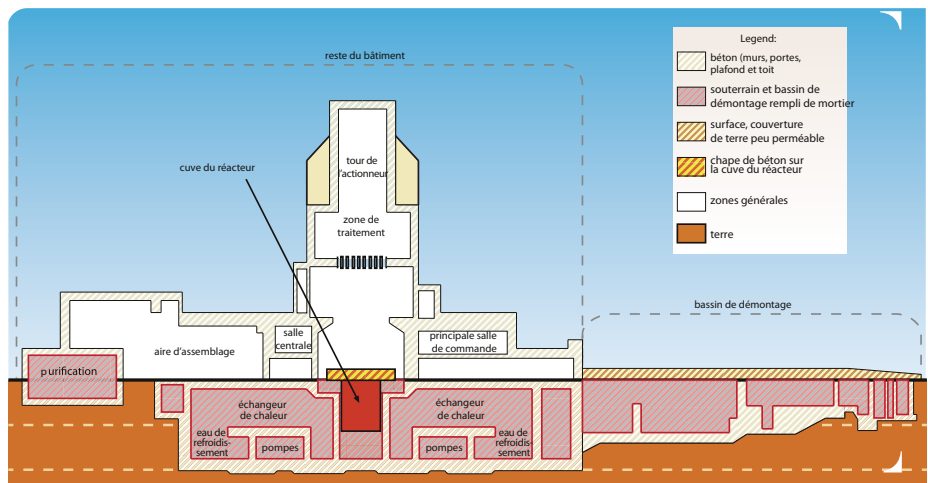
Les défis du démantèlement

Jusqu'à présent, les opérations de démantèlement se sont déroulées sans risques supplémentaires pour la santé ou l'environnement, même si elles ont occasionnellement révélé des contaminations insoupçonnées liées à des activités nucléaires (ANM 2011a). Il convient néanmoins de mettre en place un cadre juridique adéquat assignant clairement les responsabilités aux différents acteurs, notamment aux organismes de





Centrale avant le démantèlement



Vue transversale d'une enceinte de confinement

Figure 6 : Enceinte de confinement sur le site de Savannah River (États-Unis). Le combustible usé et autres déchets hautement radioactifs ont été retirés du réacteur de même que les déchets ou matériaux contaminés considérés comme inacceptables sur la base d'évaluations rigoureuses de risques et de performance. Tous les espaces souterrains contaminés ont été remplis avec du mortier spécial. En surface, les zones non contaminées ont été généralement laissées en l'état. Pour augmenter la protection contre les infiltrations d'eau, le bâtiment n'a pas été démoli et fera l'objet d'une surveillance à long terme. *Source : Adapté de US DoE (2012)*

réglementation. Faute de quoi, les risques pourraient se multiplier avec l'augmentation du nombre de démantèlements; l'intensification des pressions dans certains pays visant à accélérer les fermetures et démantèlements, raccourcir les calendriers et réduire les coûts; et le lancement d'opérations de déconstruction dans des pays n'ayant ni l'expérience requise ni les capacités de gestion de déchets suffisantes. À terme, l'expérience acquise devrait contribuer à améliorer les techniques et réduire les coûts. Toutefois, si l'élimination accélérée de réacteurs nucléaires ne fait pas l'objet d'une gestion rigoureuse et d'une supervision réglementaire appropriée, des décisions de démantèlement risquent d'être prises de manière trop hâtive ou certains réacteurs pourraient rester inutilisés pendant de longues années avant d'être finalement démantelés. Toute période de report excessive qui ne ferait pas l'objet d'une surveillance et d'une gestion appropriées pourrait accroître les risques de rejet de contaminants radioactifs dans l'environnement et d'exposition des populations avoisinantes (AIEA 2007).

Un démantèlement plus intelligent

Il est essentiel de déconstruire en séparant les matériaux radioactifs de ceux qui ne le sont pas. Cette séparation réduit au minimum la quantité de déchets nécessitant un traitement spécial du fait de leur radioactivité. Elle permet aussi de maximiser le volume de matériaux (d'acier et d'aluminium notamment) recyclables et la quantité de gravats de béton réutilisable sur place (Dounreay 2012). Certaines opérations de démantèlement et de décontamination doivent être effectuées sur place. Ces tâches complexes nécessitent dès le départ une bonne information sur les caractéristiques radiologiques et l'état du réacteur, notamment l'histoire de son exploitation pour être au fait d'éventuels incidents et accidents ou de la présence possible de débris de combustible usé.

Le démontage de structures destinées à protéger les travailleurs pendant l'exploitation de la centrale peut compliquer les opérations. Par exemple, les tuyaux métalliques contenant des liquides

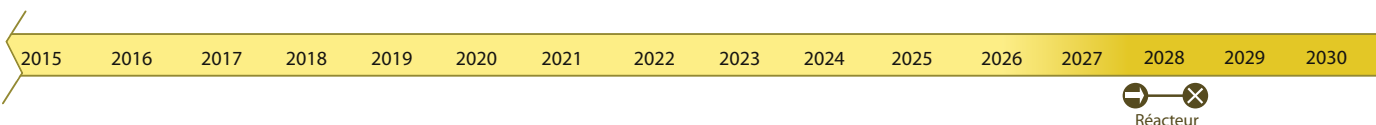


Figure 5 : La mise hors service et le démantèlement du réacteur civil Vandellós I en Espagne se déroule en 3 phases principales : mise à l'arrêt définitif du réacteur et activités préliminaires (1991-1997); retrait des structures auxiliaires (1998-2003); et démantèlement de la cuve (vers 2028). La troisième phase devrait commencer après une période de dormance de 25 ans, pendant laquelle le réacteur restera sous étroite surveillance. *Source : Adapté de ENRESA (2009)*



Encadré 3 : rayonnements associés au démantèlement

La majeure partie des déchets issus d'opérations de démantèlement sont constitués de matériaux de faible et très faible activité, principalement de l'acier et du béton. Les éléments plus radioactifs proviennent essentiellement du réacteur. Ces déchets contiennent des isotopes qui en se décomposant émettent des radiations. L'émission initiale de rayonnements décroît rapidement en raison de la demi-vie relativement courte de plusieurs isotopes. Après une cinquantaine d'années, le niveau de radiation de la plupart des déchets issus du démantèlement ne représente plus qu'un infime pourcentage du niveau initial.

Isotope	Demi-vie (années)
C-14	5 730
Ni-59	75 000
Ni-63	96
Fe-55	2,7

À très fortes doses, les rayonnements peuvent provoquer des maladies, des cancers voire même une mort immédiate ou à court terme, comme cela a été le cas pour certains travailleurs de la centrale de Tchernobyl au moment de l'accident. À doses plus faibles, ils peuvent entraîner des cancers et des altérations génétiques. Aux doses normalement reçues pendant l'exploitation ou le démantèlement, les risques encourus par les travailleurs devraient être négligeables.

Les rayonnements émis lors d'activités de déconstruction et d'élimination de déchets sont presque exclusivement de type beta et gamma (**figure 7**). Les principaux risques liés au démantèlement sont ceux associés à l'exposition à ces types de radiation. Comme les déchets issus d'activités de démantèlement se composent généralement de matières solides, seuls des rejets non intentionnels de poussière radioactive pendant la démolition peuvent entraîner des expositions au sein de la population (US EPA 2011b).

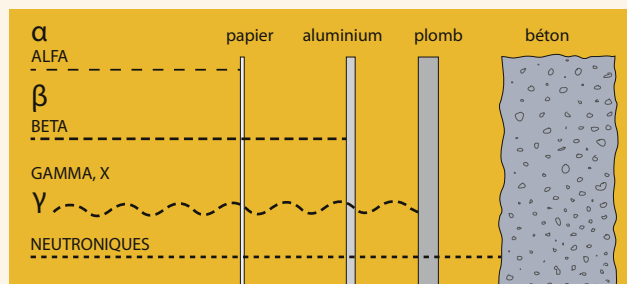


Figure 7 : On distingue plusieurs types de rayonnement - alpha, beta, gamma et neutronique - selon leur capacité de pénétration des matériaux. Les particules alpha peuvent être bloquées par une feuille de papier, les particules bêta par un morceau d'aluminium, les rayons gamma par des métaux lourds comme le plomb, et les neutrons par le béton ou l'eau. *Source : ANM (2011*)*

hautement radioactifs sont souvent coulés dans du béton. Ceci constitue un obstacle car les tuyaux peuvent être radioactifs alors que les énormes masses de béton qui les enrobent ne le sont pas. Le matériau contaminé devra soit être retiré séparément soit être séparé ultérieurement (O'Sullivan et al. 2010).

Pour réduire le volume de déchets contaminés, il est essentiel de séparer les matériaux pendant le démantèlement. Concilier cette pratique avec l'exigence d'exposition minimale des travailleurs peut cependant s'avérer difficile. Des évaluations préalables sont donc réalisées pour choisir des méthodes appropriées, faisant appel à des techniques manuelles ou de contrôle à distance. Dans bien des cas, on peut utiliser des véhicules téléopérés, des bras manipulateurs et des robots pour découper en petits morceaux les matériaux extraits. Le développement futur de ces technologies constituera un atout précieux car il permettra de réduire les volumes de déchets radioactifs en rendant le découpage plus sélectif et réduira par conséquent les coûts et les risques radiologiques.

L'expérience du démantèlement des premières générations de réacteurs nucléaires montre que la déconstruction aurait été plus aisée et moins coûteuse si ces centrales avaient été conçues en tenant compte de cette phase ultime (OCDE/AEN 2010a). Peu de vieux réacteurs possèdent des caractéristiques initiales qui facilitent ou simplifient leur démantèlement. Pour les centrales actuellement en activité, un plan de déclassement a généralement été établi, la présentation de plans préliminaires étant souvent exigée pour l'obtention d'une licence d'exploitation (OCDE/AEN 2010a). Ces plans devraient être régulièrement mis à jour et un calendrier détaillé devrait être établi deux ans au moins avant la date prévue de fermeture (AIEA 2008, 2011b). Il arrive cependant que cette date doive être avancée par suite d'un changement de politique, d'un accident ou d'une catastrophe naturelle (**encadré 4**).



Les déchets compactables de faible activité comprennent notamment des vêtements, du verre et des matériaux de construction. *Photo : Sellafeld Ltd.*



Fût découpé contenant des déchets liquides de moyenne activité solidifiés dans du béton. Il s'agit de matériaux fortement contaminés, comme des enveloppes de barres de combustible ou des parties démontées de la cuve du réacteur, qui nécessitent un blindage anti-rayonnement. Le temps de stockage dépend des isotopes radioactifs présents. Les liquides radioactifs sont solidifiés avant leur élimination. Photo : Dounreay

Ressources et capacités

Plusieurs pays se sont forgé une solide expertise dans le domaine du démantèlement. Aux États-Unis, par exemple, 1 450 installations nucléaires gouvernementales de différents types ont été complètement démantelées, dont plusieurs réacteurs (US DoE 2012). Si ce savoir-faire incite à l'optimisme, plusieurs pays n'ont pas encore développé le savoir-faire ni les infrastructures adaptés à leurs futurs besoins. Cependant, un peu partout dans le monde, des universités et centres techniques mettent en place des programmes de formation ou entreprennent des travaux de recherche et développement portant spécifiquement sur le démantèlement. Une grande partie de cette activité est centrée sur les équipements automatiques et les méthodes novatrices de travail en milieu radioactif.

À l'avenir, les opérations de déclasserment de réacteurs civils rivaliseront avec les nombreux projets de déconstruction d'installations militaires et de recherche pour l'accès au savoir-faire, aux ressources et aux sites d'élimination. En effet, plus de 300 réacteurs de ce type, petits et grands, ont été mis hors service (ANM 2011a) et la majorité d'entre eux n'ont pas encore été démantelés.

Acceptation par le public

L'acceptabilité au sein du public est essentielle pour l'avenir de l'énergie nucléaire (OCDE/AEN 2010b). Que les centrales soient démantelées immédiatement ou après un certain temps, le sort des déchets radioactifs et le choix du résultat final (site décontaminé, enceinte de confinement ou solution intermédiaire) dépendent autant de la réaction du public que de considérations techniques. Une intense activité de déconstruction peut être désapprouvée par les voisins, mais elle permet l'élimination des structures qui défigurent le paysage et une nouvelle

Encadré 4 : Gestion de réacteurs endommagés

Tout démantèlement nécessite l'approbation d'une étude de sûreté par les autorités de réglementation, qui exigent la soumission d'une évaluation et d'une déclaration d'impact environnemental. Lorsque le déclassement a lieu après un accident majeur – comme pour les centrales de Three Mile Island (États-Unis), Tchernobyl (Ukraine) ou Fukushima (Japon) – les types de plans, d'équipements et de financements requis diffèrent de ceux nécessaires pour une intervention planifiée sur une installation en fin de vie. Un réacteur endommagé peut contenir du combustible nucléaire non protégé et son confinement peut être compromis. Le réacteur et les installations auxiliaires doivent être stabilisés et sécurisés avant de pouvoir procéder au démantèlement ou à la mise en place d'une enceinte de confinement.

En 1979, le cœur surchauffé du réacteur n° 2 de Three Mile Island a partiellement fondu. Les opérateurs ont procédé à un assainissement, retirant le combustible, décontaminant l'eau radioactive et expédiant les déchets radioactifs dans un site d'élimination. Le combustible et les débris du cœur fondu ont été transportés jusqu'à une installation gouvernementale de stockage à sec en attendant une décision sur le lieu de leur élimination définitive. Le réacteur est en stockage surveillé jusqu'à la fermeture du réacteur n°1. Les deux réacteurs seront alors démantelés (US NRC 2009).

En 1986, le réacteur n° 4 de Tchernobyl a explosé et brûlé, rejetant dans l'atmosphère de grandes quantités de matières radioactives. L'incendie causé par l'explosion a été éteint après quelques heures mais le graphite à l'intérieur du réacteur a brûlé pendant plusieurs jours. Il a fallu 6 mois pour envelopper le réacteur dans un sarcophage de béton. Celui-ci s'est cependant détérioré à un point tel que des infiltrations d'eau sont apparues et qu'il risque à présent de s'écrouler. Une enceinte de confinement devrait être construite d'ici fin 2015 pour pouvoir retirer en toute sécurité la structure en décomposition ainsi que le combustible et autres éléments contaminés et les transférer dans un site d'entreposage de déchets (Wood 2007, Yanukovych 2011).

En décembre 2011, la compagnie d'électricité de Tokyo (Tepco), l'Agence pour les ressources naturelles et l'énergie du Ministère de l'économie, du commerce et de l'industrie et l'Agence japonaise de sûreté nucléaire et industrielle ont publié une première feuille de route pour le démantèlement des réacteurs de Fukushima. Celle-ci préconise le retrait du combustible restant dans les piscines de stockage dans un délai de 10 ans et, dans 10 ans, le retrait du combustible des cœurs des réacteurs. Cette tâche sera extrêmement complexe car l'on ne connaît pas l'étendue des dégâts causés aux cœurs des réacteurs. On pense que l'un des cœurs a fondu à travers la cuve et a atteint le sol de béton sous le réacteur. Le retrait des cœurs prendra encore 10 à 15 ans. La démolition finale des structures devrait être achevée d'ici 30 à 40 ans (WNN 2011b).



Emballage et stockage provisoires de déchets radioactifs.
Source : Nuclear Decommissioning Authority, Royaume-Uni

utilisation des terres. En revanche, une enceinte de confinement est non seulement inesthétique mais le maintien d'un réacteur en mode de sûreté nécessite des dispositions de sécurité permanentes (OCDE/AEN 2010b).

Certains opérateurs redoutent les débats publics tandis que d'autres les acceptent volontiers. L'Autorité britannique de démantèlement nucléaire, par exemple, se montre plus ouverte que par le passé (UK DTI 2002). Une ouverture accrue peut produire des résultats appréciables. Aux États-Unis, la NASA (Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace), qui exploite un réacteur de recherche dans l'Ohio, a réagi aux inquiétudes suscitées par le démantèlement de cette installation au sein du public en l'informant par le biais d'ateliers communautaires, de journées portes ouvertes, de visites du réacteur (pour les médias), de sites Internet et de vidéos. Ce projet de déclassement a fini par recueillir l'approbation des populations locales (AIEA 2009a). Le Forum sur la confiance des parties prenantes, créé en 2000 par l'Agence intergouvernementale pour l'énergie nucléaire, facilite la confrontation d'expériences sur les questions sociales liées à la gestion des déchets radioactifs. Cet organisme étudie les moyens de maintenir un dialogue constructif avec le public afin de renforcer la confiance au niveau de la prise de décision, ce qui implique dans certains cas l'intervention d'acteurs nationaux, régionaux et mondiaux (OCDE/AEN 2011).

Des exigences imprévisibles

Les décisions découlant de la réévaluation par certains pays de leur programme nucléaire suite à l'accident de Fukushima auront des répercussions importantes sur les programmes nationaux de déclassement. Elles poseront également la question de savoir si l'on dispose des compétences, de l'expertise, des financements et des infrastructures nécessaires pour répondre aux exigences nouvelles et imprévues en matière de démantèlement.

Au Japon, sur les 50 centrales nucléaires restantes, 5 seulement restent en activité (AIEA 2012a, WNN 2012a). Tous les réacteurs hors service pourraient à terme être remis en service après avoir réalisé des tests de résistance, amélioré la protection contre les tsunamis et obtenu l'aval du gouvernement et des pouvoirs locaux. En 2011, le gouvernement a temporairement fermé la centrale d'Hamaoka suite à l'anticipation d'un tremblement de terre majeur dans cette région. Elle sera rouverte après avoir amélioré la protection anti-tsunamis (WNN 2011d).

La décision de l'Allemagne de se débarrasser progressivement de toutes ses centrales nucléaires d'ici 2022 implique la fermeture anticipée de 13 installations actuellement en activité (ANM 2011d). Cette opération sera coûteuse et nécessitera la manutention de très grandes quantités de déchets de déconstruction ou, en cas de démantèlement différé, la maintenance dans de bonnes conditions de sûreté de plusieurs installations mises à l'arrêt. Le savoir-faire et les infrastructures du pays en matière de démantèlement seront mis à rude contribution.

Les parties engagées dans des opérations de déconstruction doivent se préparer à l'inattendu. Par exemple, des législateurs, des organismes de réglementation ou des avocats peuvent intervenir pour mettre en route ou arrêter des travaux de déclassement. En 2010, le sénat de l'État du Vermont (États-Unis) a annulé la licence de la centrale de Vermont Yankee suite à des craintes de fuites de tritium gazeux radioactif et à des allégations de déclarations trompeuses de la part des opérateurs sur cette question. L'installation devait fermer en mars 2012, mais les opérateurs ont contesté en justice le droit de l'État d'imposer cette mise à l'arrêt et ont obtenu gain de cause (WNN 2011d, 2012b).

Coût et financement du démantèlement

Les coûts de démantèlement varient largement en fonction du type et de la taille du réacteur, de son emplacement, de la proximité et de la disponibilité d'installations d'élimination de déchets, de l'utilisation future prévue du site ainsi que de l'état du réacteur et du site au moment des opérations. Des méthodes d'estimation de coût ont été mises au point (OCDE/AEN 2010c). Cependant, les données publiées concernant les montants investis dans les quelques déclassements achevés jusqu'ici sont fragmentaires (OCDE/AEN 2010c, US GAO 2010). Quant aux estimations prévisionnelles, elles varient dans une très large mesure.

Les frais de déclassement représentent une part substantielle des dépenses d'exploitation d'un réacteur nucléaire (**figure 8**). En revanche, ils peuvent ne constituer qu'une petite proportion des revenus engendrés par une installation civile sur une période de 40 ans. Aux États-Unis, le coût moyen des travaux de démantèlement d'un réacteur s'élève à environ 500 millions de dollars, soit à peu près 10 à 15 % de l'investissement initial. En France, on estime que la déconstruction du petit réacteur de Brennilis (en service de 1967 à 1985) équivaldra à 59 % du coût initial. Le montant estimatif a augmenté de 26 % entre 2001 et 2008 pour atteindre près de 500 millions d'euros, une somme 20 fois supérieure à celle initialement prévue (Cour des comptes 2005, 2012). Au Royaume-Uni, l'enveloppe financière gouvernementale

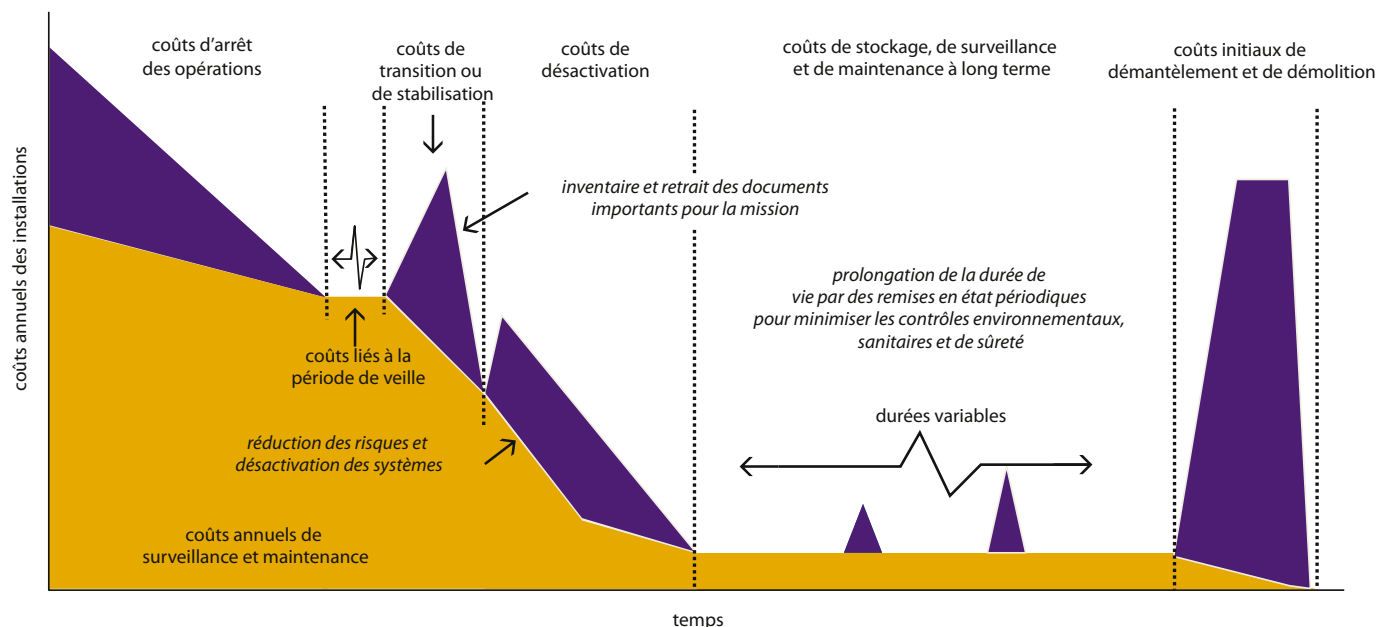


Figure 8 : Le démantèlement d'une installation prend de nombreuses années et les coûts varient largement. Les phases les plus onéreuses sont la mise à l'arrêt initiale ainsi que le démantèlement et la démolition définitifs. Toute période intermédiaire de surveillance sera moins coûteuse. Ces facteurs peuvent influencer sur les décisions relatives à la rapidité des travaux. Source : United States Department of Energy (2010)

affectée au démantèlement est passée de 2 millions de livres sterling en 1970 à 9,5 milliards de livres sterling en 1990 et à 53,7 milliards de livres sterling en 2011 (Huhne 2011). Il ne fait aucun doute que ce type de travaux peut parfois entraîner d'importants dépassements de budget (OCDE/AEN 2010d). À mesure que l'on acquiert plus d'expérience, ce genre d'incertitude devrait se réduire et les coûts devraient diminuer.

Dans bon nombre de pays, c'est au propriétaire qu'il incombe de financer les activités de démantèlement, conformément au principe du « pollueur-payeur » (Deloitte 2006). Néanmoins, il appartient aux gouvernements de veiller à ce que l'exploitation des centrales sur leur territoire génère des revenus suffisants pour couvrir ces coûts élevés et parfois imprévisibles. Des incertitudes pèsent souvent sur le degré de protection des fonds contre d'éventuelles crises financières. De plus, les fonds investis ne produisent pas nécessairement les bénéfices anticipés. En tout état de cause, le gouvernement est généralement le bailleur de fonds de dernier recours (SwissInfo 2011).

En 2006, la Commission européenne a publié une recommandation et des orientations relatives à la gestion des ressources financières destinées au démantèlement d'installations nucléaires et à la manutention du combustible usé et des déchets radioactifs (UE 2006a, b). En outre, conformément à une récente directive de l'Union européenne établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs, tous les États membres sont tenus de s'assurer de la disponibilité de ressources financières pour les travaux de démantèlement (UE 2011).

De nombreux gouvernements européens – mais pas tous – ont pris des mesures visant à garantir la disponibilité de ces fonds. Les systèmes de financement varient. En Espagne, cette gestion financière est assurée par une entreprise publique; en Slovaquie par le Ministère de l'économie.

Encadré 5 : Réglementation du déclassé au niveau mondial

La Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs est le premier instrument juridique traitant directement, entre autres questions, de la gestion des déchets radioactifs issus de travaux de démantèlement à l'échelle mondiale (AIEA 2011c). Entrée en vigueur le 18 juin 2001, elle a été ratifiée par 62 pays. Elle stipule à l'article 26 que « Chaque Partie contractante prend les mesures appropriées pour veiller à la sûreté du déclassé d'une installation nucléaire. Ces mesures doivent garantir que : i) du personnel qualifié et des ressources financières adéquates sont disponibles; ii) les dispositions de l'article 24 concernant la radioprotection durant l'exploitation, les rejets d'effluents et les émissions non programmées et incontrôlées sont appliquées; iii) les dispositions de l'article 25 concernant l'organisation pour les cas d'urgence sont appliquées; iv) les dossiers concernant des informations importantes pour le déclassé sont conservés. »

Tableau 1 : Classification des déchets radioactifs. *Source : Adapté de AIEA (2009b)*

	Déchets de très faible activité (TFA)	Déchets de faible activité (FA)	Déchets de moyenne activité (MA)	Déchets de haute activité (HA)
Radioactivité	contiennent des concentrations très limitées d'isotopes radioactifs à vie longue avec des concentrations d'activité généralement supérieures aux limites autorisées	contiennent des concentrations limitées d'isotopes radioactifs à vie longue mais présentent une forte radioactivité	contiennent des isotopes radioactifs qui n'atteindront pas un niveau de concentration d'activité acceptable pour une élimination proche de la surface	contiennent des niveaux de concentration d'activité suffisamment élevés pour produire des quantités importantes de chaleur par la décroissance radioactive ou de grandes quantités d'isotopes radioactifs à vie longue
Exemples de sources de déchets	gravats de béton, sol	vêtements, verre, matériaux de construction	enveloppes de barres de combustible, parties de la cuve du réacteur	débris de combustible usé
Isolement	décharge de surface aménagée	enfouissement jusqu'à 30 m de profondeur	enfouissement à des profondeurs comprises entre quelques dizaines et quelques centaines de mètres	formations géologiques profondes
Blindage	Non	Non	oui	oui
Refroidissement	Non	Non	non	oui

À l'échelle mondiale, le besoin de disposer de ressources suffisantes pour les opérations de démantèlement est énoncé dans la Convention commune sur la sûreté de la gestion du combustible usé et sur la sûreté de la gestion des déchets radioactifs (**encadré 5**).

Risques liés au démantèlement

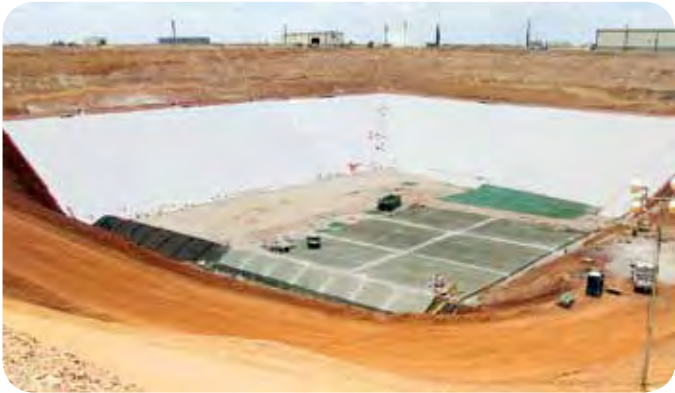
Les risques d'émissions massives de radioactivité au cours d'opérations de déconstruction d'un réacteur sont bien plus faibles que durant son exploitation. Une fois le combustible nucléaire retiré, la majeure partie de la radioactivité a disparu. Après le drainage des réservoirs et de la tuyauterie, la plupart des éléments radioactifs sont sous forme solide et donc plus faciles à manipuler et moins susceptibles de se retrouver dans l'environnement. Cependant, en raison du caractère non routinier et pratique de ces travaux, les risques d'exposition pour les travailleurs sont plus importants pendant les activités de déclassement que lors de l'exploitation.

Types et quantités de déchets radioactifs

En phase d'exploitation, un réacteur nucléaire produit des isotopes qui en se dégradant émettent des rayonnements potentiellement nuisibles. Leur demi-vie – c'est-à-dire le temps qu'il faut pour réduire de moitié leur radioactivité – varie de quelques secondes à plusieurs millions d'années. Ceux qui présentent une demi-vie supérieure à 10 jours entrent dans la catégorie des déchets radioactifs. Ces déchets doivent être conservés dans de bonnes conditions de sûreté jusqu'à ce que le processus de désintégration réduise les niveaux de radioactivité des matériaux. Pour l'entreposage et l'élimination, on applique habituellement la classification suivante, selon le niveau de risque et le

temps de désintégration : très faible activité, faible activité, activité moyenne et haute activité (**tableau 1**).

Le combustible usé retiré régulièrement des réacteurs en activité constitue la majeure partie des déchets radioactifs de haute activité. Un réacteur de 1 000 MW produit annuellement environ 27 tonnes de ce type de déchet (ANM 2011e). Le volume de combustible irradié produit chaque année par l'ensemble des réacteurs mondiaux suffit à peine à remplir deux piscines olympiques. Bien que relativement peu volumineux, ces déchets hautement radioactifs contiennent 95 % de la radioactivité des déchets de l'industrie nucléaire. Ils devront rester isolés pendant plusieurs milliers d'années.



L'enfouissement est une méthode courante d'élimination des déchets de faible activité. Il faut veiller à éviter les écoulements d'isotopes radioactifs en dehors du site. *Photo : US NRC*

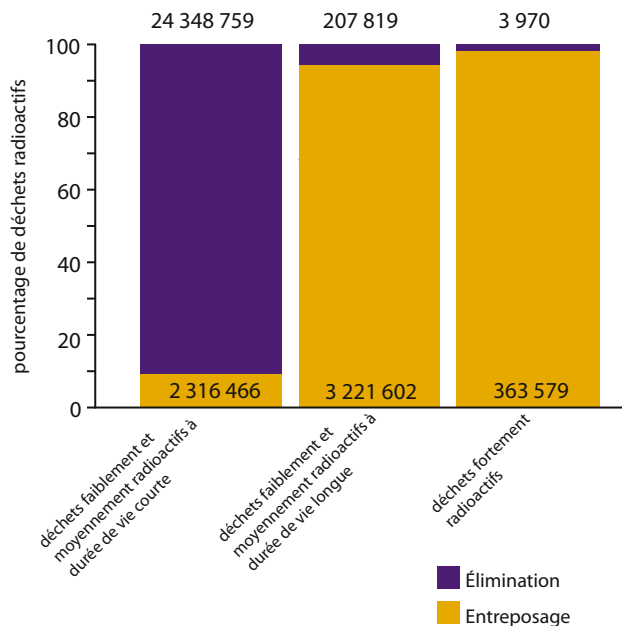


Figure 9 : Les déchets de déconstruction peuvent être classés comme faiblement, moyennement et hautement radioactifs. L'inventaire total montre, par catégorie, le pourcentage de déchets nucléaires stockés par rapport à ceux destinés à être éliminés. Les volumes, exprimés en m³, sont basés sur les données fournies par les pays selon l'ancienne classification de l'AIEA de 1994, qui répartissait les déchets de faible et moyenne activité en deux sous-groupes : vie longue et vie courte. Les déchets de très faible activité ne faisaient pas l'objet d'une catégorie distincte.
Source : Adapté de AIEA (2011d)

Selon les pratiques actuelles, les déchets de haute activité sont, à terme, enfouis dans des formations géologiques profondes. Si certains sites ont été désignés (en Finlande, France et Suède notamment), aucun pays ne dispose à ce jour d'une installation opérationnelle d'élimination de déchets de haute activité. Cela est dû au coût de telles installations ainsi qu'à la désapprobation par le public des sites proposés (ANM 2011f) et au temps de refroidissement trop court avant la mise en dépôt permanente. Au cours des 20 à 30 premières années suivant la mise à l'arrêt définitif, une partie des éléments intérieurs à déconstruire appartiennent à la catégorie des déchets hautement radioactifs.

Une fois le combustible retiré du réacteur, les travaux de déconstruction ne produisent plus que de petites quantités de déchets de haute activité (HA), principalement des débris de combustible restants après le retrait du combustible irradié. Cependant, ces activités génèrent généralement les deux tiers de l'ensemble des déchets de très faible, faible et moyenne activité produits pendant la durée de vie d'une centrale.

Le démantèlement d'un réacteur de 1 000 MW produit environ 10 000 m³ de déchets de très faible, faible et moyenne activité, mais il est possible de réduire sensiblement ce volume en utilisant des robots pour

extraire de façon plus sélective les éléments radioactifs (McCombie 2010). Ces déchets se composent de vastes quantités de matériaux de construction, d'équipements en acier provenant de la cuve du réacteur, de boues chimiques, de barres de commande et d'autres éléments qui se trouvaient à proximité du combustible. La radioactivité des déchets produits pendant le démantèlement devient généralement négligeable au bout de quelques décennies mais en attendant ceux-ci doivent être manipulés, stockés et éliminés de façon sûre.

Seulement 7 % des déchets à vie longue de faible et moyenne activité issus des activités de déconstruction ont été éliminés jusqu'à présent (**figure 9**). Les 93 % restants sont entreposés en attendant leur élimination. De nombreux pays se sont dotés d'une agence de gestion des déchets radioactifs mais celles-ci sont encore loin de pouvoir traiter les volumes à venir (CoRWM 2006). Des installations d'élimination existent pour les déchets de très faible activité dans les pays producteurs d'énergie nucléaire.

Voies possibles d'exposition à la radioactivité

Certaines activités de déconstruction, comme le découpage d'équipements, peuvent entraîner des dispersions de poussières ou gaz radioactifs (Shimada et al. 2010) (**figure 10**). Ces émissions par voie atmosphérique, qui présentent essentiellement des risques pour les travailleurs, doivent être contenues ou ventilées en toute sécurité à l'aide de filtres anti-poussières. Certaines parties hautement radioactives du réacteur peuvent parfois être découpées sous l'eau. Cette méthode offre une protection pour les travailleurs et empêche les rejets radioactifs dans l'atmosphère. Les déchets entreposés sur le site présentent des

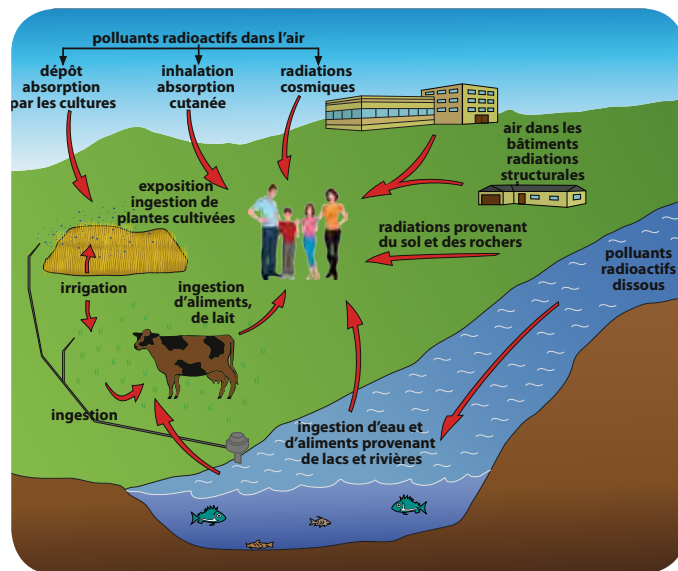


Figure 10 : Voies d'exposition aux rayonnements. Pendant la déconstruction, des rejets accidentels de particules de poussière dans l'atmosphère peuvent se produire.
Source : Adapté d'Arizona State University (2011)

risques potentiels si le matériel de stockage se corrode ou se dissout ou en cas d'incendie. Il y a également des risques liés aux incendies et inondations sur les sites de démantèlement : des rejets de matières radioactives dans l'atmosphère, le sol ou les eaux souterraines peuvent se produire, par exemple, à partir des aires de traitement ou de stockage des déchets. Des infiltrations d'eau risquent de dissoudre les isotopes radioactifs et de les emporter jusque dans le réseau hydrographique. Cependant, la plupart des isotopes rencontrés lors de déconstructions sont relativement insolubles ou ont une demi-vie courte.

Les risques de rejets massifs de matières radioactives en dehors d'une centrale lors de son démantèlement sont bien moins importants que pendant l'exploitation de l'installation. Des rejets de faible activité peuvent néanmoins se produire sur de courtes distances par voie atmosphérique ou via les eaux de surface et souterraines. Une planification minutieuse, l'utilisation de barrières et une surveillance locale et des lieux peuvent contribuer à se protéger contre ces fuites.

Des situations imprévues surviennent parfois au cours du démantèlement d'une centrale qui a été exploitée pendant des décennies. On découvre parfois des débris de combustible à l'intérieur d'un réacteur, bien que cela soit plus fréquent dans les réacteurs de recherche et ceux non destinés à la production d'électricité. Une contamination radioactive sous le site d'une centrale et qui n'a pas encore atteint la nappe phréatique peut rester non détectée jusqu'à la démolition. Cette situation exceptionnelle s'est présentée lors des travaux de déconstruction de la centrale de Connecticut Yankee (États-Unis) (**figure 11**), au cours desquels on a découvert 33 000 m³ de sol contaminé par la radioactivité. Les travaux d'excavation et d'élimination que cela a entraînés se sont traduits par un important surcoût (EPRI 2008). La déconstruction elle-même, par le biais d'excavations et d'autres activités, peut accroître le risque de propagation de matières radioactives dans les eaux de surface ou souterraines.

Au cours des opérations, certaines parties situées près du réacteur peuvent devenir radioactives. Pour maintenir les doses de radiation reçues par les travailleurs au niveau le plus bas possible – et en deçà des limites réglementaires – il faut une bonne planification des travaux, des contrôles administratifs et physiques, des vêtements de protection et un programme complet de surveillance. Il est possible de réduire encore ces doses en employant des robots et d'autres techniques de contrôle à distance qui permettent d'éloigner le personnel des endroits proches des zones à risque. Jusqu'à ce jour, le niveau d'exposition pendant les déconstructions est resté inférieur aux limites réglementaires.

Les centrales endommagées à la suite d'un accident comme celles de Tchernobyl et Fukushima nécessitent un traitement différent de celui prévu pour les centrales en fin de vie utile. En cas de rejet de matières contaminées sur de longues distances, des interventions d'urgence s'imposent pour empêcher de nouvelles émissions. Une fois les fuites radioactives maîtrisées et l'installation stabilisée, le combustible



Figure 11 : démantèlement réussi de la centrale Connecticut Yankee avec un site totalement décontaminé. Les photos montrent les progrès du chantier : lancement (juin 2003), travaux en cours (janvier 2006) et achèvement (septembre 2007).
Photo : Connecticut Yankee Atomic Power Company

nucléaire doit être retiré du réacteur qui pourrait avoir été touché. On peut ensuite engager les travaux de déconstruction de l'installation et d'assainissement du site et de ses environs.

Historiquement, les discussions sur l'impact environnemental des activités nucléaires (y compris le déclassement) ont porté presque exclusivement sur les risques pour la santé humaine. En 1991, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) émettait l'avis suivant : « le niveau de contrôle environnemental actuellement jugé souhaitable pour la protection de l'homme devra garantir que les autres espèces ne sont pas menacées. » Elle reconnaît aujourd'hui l'étroitesse de ce point de vue et considère que l'on ne peut pas évaluer les risques posés par le démantèlement pour la biodiversité et les écosystèmes en se basant sur ceux établis pour l'être humain (Higley et al. 2004).

Depuis 2007, cette commission établit des niveaux de référence de doses de radiation pour 12 animaux et plantes très divers : depuis le canard et le cerf jusqu'aux algues marines et aux vers de terre (CIPR 2007). Ces niveaux de référence sont considérés non comme des limites mais comme des seuils susceptibles d'être réévalués (Andersson et al. 2009). Plutôt que de chercher à éliminer tous les risques pour des organismes particuliers, la Commission s'est fixé comme objectif « de prévenir les effets nuisibles des rayonnements ou de limiter leur fréquence à un niveau d'impact négligeable pour le maintien de la diversité biologique, la conservation des espèces ou la santé et l'état des habitats naturels » (CIPR 2007).

Enseignements

Un démantèlement est plus qu'une simple démolition. C'est la déconstruction systématique d'une installation nucléaire complexe contaminée comprenant un réacteur composé de multiples éléments de grande taille (comme la cuve), des générateurs de vapeur, des pompes, des réservoirs et des systèmes d'appui (dont des milliers de mètres de tuyaux) accompagnés de volumes encore plus importants de matériaux de construction. Des travaux de ce type exigent beaucoup de temps, des financements considérables, une planification détaillée et une exécution précise, à un niveau comparable à celui requis pour la construction. Ils demandent également un degré similaire d'expertise et de contrôle réglementaire.

Dans différentes régions du monde, la filière du démantèlement n'a pas encore atteint sa maturité, même si elle connaît une croissance rapide. Il existe en effet des différences géographiques considérables en termes de degré d'expertise. Quelques pays possèdent des décennies d'expérience alors que d'autres développent un savoir-faire naissant.

Les connaissances se sont considérablement enrichies mais les leçons apprises ne se reflètent pas encore dans les pratiques normalisées au plan international. L'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a mis sur pied un réseau international sur le démantèlement dans le but de faciliter les échanges d'expériences entre les pays (AIEA 2012b).

Il est essentiel que les enseignements majeurs tirés jusqu'ici soient appliqués à temps pour pouvoir faire face à l'expansion anticipée de l'activité de démantèlement. Les organismes internationaux ainsi que les propriétaires et opérateurs d'installations nucléaires doivent pouvoir accéder à toutes les informations dont disposent les entrepreneurs. Il convient sans doute d'inscrire dans la législation, internationale et nationale, cette exigence d'échange d'informations, y compris le partage de l'expertise acquise dans la recherche de solutions à des problèmes particuliers, dans la mesure où les principaux enseignements découlent souvent de situations difficiles. Il faut absolument éviter que des considérations de confidentialité commerciale fassent obstacle à ces échanges.

L'industrie nucléaire doit continuer à innover et mettre au point de nouvelles approches et technologies propices à un processus de démantèlement « plus intelligent », c'est-à-dire plus sûr, plus rapide et moins coûteux. Il faut en outre des politiques et des mesures qui favorisent ce développement constant pour pouvoir relever le défi du démantèlement. La recherche pourrait aussi contribuer davantage au renforcement de la base de connaissances et du savoir scientifique sur lesquels s'appuie la filière du démantèlement.

On assistera probablement au cours de la prochaine décennie à une expansion rapide de cette activité, qui devrait attirer des dizaines de milliards de dollars d'investissement. La performance du secteur revêtira une importance capitale pour l'avenir de la production d'énergie nucléaire. Les défis sont d'ordre technique mais aussi politique, financier, social et environnemental.

L'expérience montre que les travaux peuvent s'effectuer de manière sûre et en temps voulu et présenter un bon rapport coût-efficacité. Il importe que dès le départ les centrales soient conçues non seulement de façon à garantir une exploitation sûre et à prévenir les accidents dans le respect du public potentiellement affecté et de l'environnement mais aussi de manière à permettre un démantèlement efficace en toute sécurité. Les premières générations de centrales nucléaires ont été développées en ne tenant guère compte de leur démantèlement, entraînant des coûts qui auraient pu être évités. Aujourd'hui, de nombreux opérateurs et organismes de réglementation incorporent dans les plans des nouvelles installations certaines caractéristiques qui facilitent ou simplifient la déconstruction.



Références

- AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) (1999). *Radioactivity in the Arctic Seas. A Report of International Arctic Seas Assessment Project (IASAP)*. IAEA TECDOC 1075. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1075_pnn.pdf
- AIEA (2004a). Status of the decommissioning of nuclear facilities around the world. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1201_web.pdf
- AIEA (2004b). *Transition from Operation to Decommissioning of Nuclear Installations*. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS420_web.pdf
- AIEA (2006). *IAEA Safety Standards. Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material*. Safety Requirements WS-R-5. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1274_web.pdf
- AIEA (2007). *Lessons Learned from the Decommissioning of Nuclear Facilities and the Safe Termination of Nuclear Activities. Proceedings of an International Conference held in Athens, 11-15 December 2006*. IAEA Proceedings Series. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1299_web.pdf
- AIEA (2008). *Long Term Preservation of Information for Decommissioning Projects*. Technical Reports Series No. 467. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs467_web.pdf
- AIEA (2009a). *An overview of stakeholder involvement in decommissioning*. IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.5. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1341_web.pdf
- AIEA (2009b). *IAEA Safety Standards. Classification of Radioactive Waste*. General Safety Guide No.GSC. 1. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1419_web.pdf
- AIEA (2010). *Nuclear Power Reactors in the World*. Reference Data Series No. 2. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/iaea-rds-2-30_web.pdf
- AIEA (2011a). *Redevelopment and Reuse of Nuclear Facilities and Sites: Case Histories and Lessons Learned*, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.2.
- AIEA (2011b). *Design Lessons Drawn from the Decommissioning of Nuclear Facilities*. IAEA TECDOC 1657. http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1657_web.pdf
- AIEA (2011c). International Conventions and Agreements. <http://www.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv.html>
- AIEA (2011d). The Net-Enabled Radioactive Waste Management Database (NEWMDB). <http://newmdb.iaea.org/datacentre-comparee.aspx>
- AIEA (2012a). Power Reactor Information System website. <http://www.iaea.org/programmes/a2/> (date retrieved: 20 January 2012)
- AIEA (2012b). International Decommissioning Network (IDN). Waste Technology Section. <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/WTS-Networks/IDN/overview.html>
- Andersson, P., Garnier-Laplace, J., Beresford, N.A., Copplestone, D., Howard, B.J., Howe, P., Oughton, D. et Whitehouse, P. (2009). Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context (PROTECT): proposed numerical benchmark values. *Journal of Environmental Radioactivity*, 100, 1100-1108
- ANM (Association nucléaire mondiale) (2011a). Decommissioning Nuclear Facilities. <http://www.world-nuclear.org/info/inf19.html>
- ANM (2011b). Nuclear power plants under construction. <http://world-nuclear.org/NuclearDatabase/rresults.aspx?id=27569&ExampleId=62>
- ANM (2011c). Nuclear Power in Germany. <http://world-nuclear.org/info/inf43.html>
- ANM (2011d). Nuclear-Powered Ships. <http://www.world-nuclear.org/info/inf34.html>
- ANM (2011e). Waste Management. <http://www.world-nuclear.org/education/wast.htm>
- ANM (2011f). Safe Decommissioning of Civil Nuclear Industry Sites. http://world-nuclear.org/reference/position_statements/decommissioning.html
- Arizona State University (2011). Radiation Exposure Pathways. <http://holbert.faculty.asu.edu/eee460/pathways.jpg>
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz et Reaktorsicherheit; Ministère fédéral de l'environnement, de la conservation de la nature et de la sûreté nucléaire) (2011). Questions and answers about transforming our energy system. http://www.bmu.de/english/energy_efficiency/doc/47609.php
- Bylkin, B.K., Pereguda, V.I., Shaposnikov, V.A. et Tikhonovskii, V.L. (2011). Composition and structure of simulation models for evaluating decommissioning costs for nuclear power plant units. *Atomic Energy*, 110(2), 77-81
- CIPR (Commission internationale de protection radiologique) (2007). *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 103. [http://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37\(2-4\)-Free_extract.pdf](http://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf)
- CoRWM (Comité sur la gestion des déchets radioactifs) (2006). *Managing our Radioactive Waste Safely. CoRWM recommendations to Government*. DoRWM Doc 700. Juillet. http://news.bbc.co.uk/1/ol/shared/bsp/hi/pdfs/310706_corwmfullreport.pdf
- Cour des comptes (2005). *Le démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs : Rapport au Président de la République suivi des réponses des administrations et des organismes intéressés*. Paris, France. <http://www.ccomptes.fr/fr/CC/>
- documents/RPT/RapportRadioactifsnuclaire.pdf
- Cour des comptes (2012). *Les coûts de la filière d'électronucléaire. Rapport public thématique*. Janvier 2012. Paris, France. http://www.ccomptes.fr/fr/CC/documents/RPT/Rapport_thematique_filiere_electro-nuclaire.pdf
- Deloitte (2006). Nuclear Decommissioning and Waste: A Global Overview of Strategies and the Implications for the Future. *Deloitte Energy and Resources*, Mai. <http://deloitte-ftp.fr/Lot-B-Energie-ressources/doc/NuclearDecommissioning.Mai06.pdf>
- Der Spiegel (2011). Response to Fukushima: Siemens to Exit Nuclear Energy Business, 19 septembre. <http://www.spiegel.de/international/business/0,1518,787020,00.html>
- Dounreay (2012). Non-radioactive waste. Waste is a product of decommissioning. Dounreay Site Restoration Ltd. <http://www.dounreay.com/waste/nonradioactive-waste>
- ENRESA (Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, S.A.) (2009). The dismantling and decommissioning of the Vandellós I nuclear power plant step by step. http://www.enresa.es/activities_and_projects/dismantling_and_decommissioning/dismantling_vandellos_i_step_by_step
- EPRI (Electric Power Research Institute) (2008). *Power Reactor Decommissioning Experience*. Technical Report ID 1023456. Palo Alto, California, USA. <http://my.epri.com>
- EWN (Energiewerke Nord GmbH) (1999). *EWN – The Greifswald Nuclear Power Plant Site*. <http://ec-cnd.net/eudecom/EWN-WasteManagement.pdf>
- Higley, K.A., Alexakhin, R.M. and McDonald, J.C. (2004). Dose limits for man do not adequately protect the ecosystem. *Radiation Protection Dosimetry*, 109(3), 257-264
- Huhne, C. (2011). Chris Huhne Speech to the Royal Society: Why the future of nuclear power will be different; speech by the Secretary of State for Energy and Climate Change, 13 octobre. http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/news/ch_sp_royal/ch_sp_royal.aspx
- Kazimi, M.S. (2003). Thorium Fuel for Nuclear Energy. *American Scientist*, 91, 408 <http://www.americanscientist.org/issues/feature/2003/5/thorium-fuel-for-nuclear-energy/1>
- Kværner Moss Technology as (1996). Disposal of Russian nuclear submarines, 19 janvier. <http://spb.org.ru/bellona/ehome/russia/nfl/nfl6.htm>
- McCombie, C. (2010). Spent fuel challenges facing small and new nuclear programmes, IAEA Conference on Management of Spent Fuel, juin 2010
- Mount, M.E., Sheaffer, M.K. et Abbott, D.T. (1994). Kara Sea radionuclide inventory from naval reactor disposal.

Nilsen, T., Kudri, I. et Nikitin, A. (1997). The Russian Northern Fleet: Decommissioning of Nuclear Submarines. Bellona Report No. 296

O'Sullivan, O., Nokhamzon, J.G. et Cantrel, E. (2010). Decontamination and dismantling of radioactive concrete structures. NEA News No. 28.2. <http://www.oecd-nea.org/nea-news/2010/28-2/NEA-News-28-2-8-updates.pdf>

OCDE/AEN (Organisation de coopération et de développement économiques/Agence pour l'énergie nucléaire) (2010a). *Applying Decommissioning Experience to the Design and Operation of New Nuclear Power Plants*. AEN No. 6924. <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6924-applying-decommissioning.pdf>

OCDE/AEN (2010b). *Public Attitudes to Nuclear Power*. AEN No. 6859. <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2010/nea6859-public-attitudes.pdf>

OCDE/AEN (2010c). Cost Estimation in Decommissioning: *An International Overview of Cost Elements, Estimation Practices and Reporting Requirements*. AEN No. 6831. <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6831-cost-estimation-decommissioning.pdf>

OCDE/AEN (2010d). *Towards Greater Harmonization of Decommissioning Cost Estimates*. AEN No. 6867. <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6867-harmonisation.pdf>

OCDE/AEN (2011). Site du Forum sur la confiance des parties prenantes. <http://www.oecd-nea.org/rwm/fsc/>

Okyar, H.B. (2011). International survey of government decisions and recommendations following Fukushima. NEA News No. 29.2. <http://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2010/nea6867-harmonisation.pdf>

SEPA (Agence écossaise pour la protection de l'environnement) (2011). Remediation of Radioactively Contaminated Sites. http://www.sepa.org.uk/about_us/sepa_board/agendas_and_papers/20_sept_2011.aspx

Shimada, T., Oshima, S. et Sukegawa, T. (2010). Development of Safety Assessment Code for Decommissioning of Nuclear Facilities (DecDose). *Journal of Power and Energy Systems*, 4(1), 40-53

SwissInfo (2011). Decommissioning nuclear plants comes at a price, 6 avril. http://www.swissinfo.ch/eng/politics/Decommissioning_nuclear_plants_comes_at_a_price.html?cid=29936460

Szilagyi, A. (2012). Andrew Szilagyi, Director, Office of Decommissioning and Facility Engineering, United States Department of Energy, personal communication (26 janvier).

Tetra Tech (2012). Rocky Flats Decontamination and Demolition Project, CO. Tetra Tech EC, Inc. <http://www.tteci.com/tteci/Department-of-Energy/rocky-flats-decontamination-and-demolition-project-co.html>

UE (Union européenne) (2006a). Recommandation de la Commission du 24 octobre 2006 sur la gestion des ressources financières pour le déclassement des installations nucléaires, du combustible usé et des déchets radioactifs (2006/851/Euratom). <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:33:0:0031:0035:EN:PDF>

UE (2006b). Guide relatif à la recommandation de la Commission sur la gestion des ressources financières pour le démantèlement des installations nucléaires (2006/851/Euratom). http://ec.europa.eu/energy/nuclear/decommissioning/doc/2010_guide_decommissioning.pdf

UE (2011). Directive du Conseil 2011/70/Euratom du 19 juillet 2011 établissant un cadre communautaire pour la gestion responsable et sûre du combustible usé et des déchets radioactifs. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:199:0048:056:EN:PDF>

UK DTI (Ministère du commerce et de l'industrie, Royaume-Uni) (2002). Managing the Nuclear Legacy – A strategy for action

UK NDA (Autorité de démantèlement nucléaire, Royaume-Uni) (2011). The Nuclear Legacy web site <http://www.nda.gov.uk/aboutus/the-nuclear-legacy.cfm>

US DoE (Ministère de l'énergie des États-Unis) (2009). *US DoE EM Strategy and Experience for In Situ Decommissioning*. Prepared By U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management. Office of Engineering and Technology, EM-20. http://www.em.doe.gov/EM20Pages/PDFs/ISD_Strategy_Sept_4_2009.pdf

US DoE (2010). Awards Contract for Decontamination and Decommissioning Project for the East Tennessee Technology Park. Media release, 29 April. <http://www.em.doe.gov/pdfs/DOE%20Awards%20Contract%20for%20ETTP%20DD.pdf>

US DoE (2012). Office Of Environmental Management (EM): Deactivation & Decommissioning (D&D) Program Map. <http://www.em.doe.gov/EM20Pages/DDMaps.AspX>

US EPA (Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis) (2011a). Hanford – Washington. <http://yosemite.epa.gov/R10/CLEANUP.NSF/sites/Hanford>

US EPA (2011b). Radiation Protection. <http://epa.gov/rpdweb00/index.html>

US GAO (Service national de comptabilité des États-Unis) (2010). *Department of Energy: Actions Needed to Develop High-Quality Cost Estimates for Construction and Environmental Cleanup Projects. Report to the Subcommittee on Energy and Water Development, Committee on Appropriations, House of Representatives*.

GAO-10-199. <http://www.gao.gov/new.items/d10199.Pdf>

US NRC (2009). *Background on the Three Mile Island Accident* (page last reviewed/updated 15 March 2011). <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>

US NRC (Autorité de sûreté nucléaire des États-Unis) (2001). NRC Seeks Early Public Comment on a Proposal to Permit Entombment for Reactor Decommissioning. NRC News No. 01-121, 11 octobre. <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0201/ML020150438.pdf>

US NRC (2011). Low-Level Waste Disposal. <http://www.nrc.gov/waste/llw-disposal.html>

WNN (World Nuclear News) (2011a). Decommissioning campaign complete at UK reactor, 16 June. http://www.world-nuclear-news.org/WR-Decommissioning_campaign_complete_at_UK_reactor-1606117.html

WNN (2011b). Fukushima units enter decommissioning phase, 21 December. http://www.world-nuclear-news.org/WR-Fukushima_units_enter_decommissioning_phase-2112114.html

WNN (2011c). Chubu agrees to Hamaoka shut down, 9 May. http://www.world-nuclear-news.org/RS-Chubu_agrees_to_Hamaoka_shut_down-0905115.html

WNN (2011d). US nuclear regulator Oks Vermont Yankee extension, 11 March. <http://www.world-nuclear-news.org/newsarticle.aspx?id=29618>

WNN (2012a). Japanese reactors await restart approvals, 16 January. http://www.world-nuclear-news.org/RS-Japanese_reactors_await_restart_approvals-1601124.html

WNN (2012b). Vermont Yankee wins right to keep generating, 20 January. http://www.world-nuclear-news.org/RS_Vermont_Yankee_wins_right_to_keep_generating-200112a.html

Wood, J. (2007). *Nuclear Power*. Institution of Engineering and Technology (IET). Power and Energy Series No. 52.

Wuppertal (éd.) (2007). *Comparison among Different Decommissioning Funds Methodologies for Nuclear Installations: Country Report France. On Behalf of the European Commission Directorate-General Energy and Transport*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH im Wissenschaftszentrum Nordrhein-Westfalen (Institut Wuppertal pour le climat, l'environnement et l'énergie – Centre scientifique Rhin Nord-Westphalie) http://www.wupperinst.org/uploads/tx_wiprojekt/EUDecommFunds_FR.pdf

Yanukovych, Viktor, Président de l'Ukraine : site officiel (2011). President visits Chernobyl Nuclear Power Plant. <http://www.president.gov.ua/en/news/19883.html>





Principaux indicateurs environnementaux

Suivi des progrès en matière de durabilité environnementale

L'évaluation des changements dans l'environnement au niveau mondial et le suivi de ces transformations constituent un premier pas important vers la sensibilisation aux problèmes majeurs et leur résolution. Aujourd'hui, même si, comme disait Einstein, « ce qui compte ne peut pas toujours être compté et ce qui peut être compté ne compte pas forcément », il faut souvent mesurer et surveiller avant de pouvoir déceler et gérer les problèmes. La gravité des dérèglements climatiques n'aurait jamais pu être décelée sans de solides séries de données chronologiques sur les températures de l'air et la fonte des glaciers. Beaucoup attribuent la mauvaise gestion de la biodiversité et des écosystèmes à une sous-évaluation, entraînant une prise en compte insuffisante dans les systèmes économiques et les mécanismes comptables.

Des données de mesure détaillées sont plus facilement comprises sous forme d'indicateurs et de graphiques clairs. Ces représentations aident à expliquer les phénomènes observés autour de nous et, ultérieurement, à définir des politiques et mesures permettant de répondre à des tendances défavorables. Une bonne carte ou un bon graphique « en disent plus que de longs discours ». En même temps, un indicateur n'est que cela : un moyen d'illustrer des tendances relatives à des phénomènes mesurés dans le temps.

Ce chapitre présente certaines tendances environnementales majeures au plan mondial à l'aide de quelques indicateurs essentiels. Il attire l'attention sur des problèmes touchant à la qualité de l'air, de l'eau et du sol et à la biodiversité, aidant ainsi à comprendre l'état actuel de l'environnement. Un suivi annuel de ces tendances est essentiel pour pouvoir informer et sensibiliser le monde et appuyer la prise de décision nationale et internationale. Souvent des études plus approfondies doivent être menées pour mieux saisir la dynamique et la complexité des questions d'environnement et leurs causes sous-jacentes et élaborer ensuite des stratégies de gestion efficaces et des politiques réalistes.

Dans la mesure du possible, les indicateurs présentés ici coïncident avec ceux identifiés dans le processus d'évaluation GEO (Avenir de l'environnement mondial). Le rapport GEO-5 présente une évaluation complète et intégrée de l'état de l'environnement dans le monde. Il analyse également les politiques qui marchent et recommande des

options et moyens pour parvenir à une gestion plus durable de la planète. Enfin, il met en évidence certains des indicateurs figurant parmi ceux destinés à suivre les progrès vers les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD), définis dans la Déclaration du Millénaire des Nations Unies, une initiative mondiale en faveur du développement durable.

La série d'indicateurs clés présentés dans ce chapitre constituent un instantané des principales questions d'environnement aux niveaux mondial et régional, dans la mesure de la disponibilité des données. Parfois les données sont insuffisantes ou trop incomplètes pour pouvoir illustrer convenablement les tendances numériques à des niveaux agrégés. C'est le cas notamment des tendances concernant l'utilisation des produits chimiques, la collecte des déchets, la qualité de l'eau douce, la pollution atmosphérique en zone urbaine, l'appauvrissement de la biodiversité et la dégradation des terres.

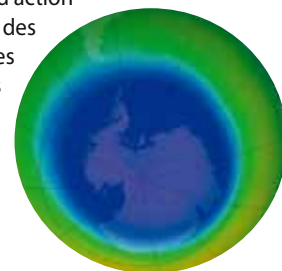
Épuisement de la couche d'ozone

Le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone a montré son efficacité pour la protection de la couche d'ozone stratosphérique. Il constitue un cadre d'action international pour l'élimination progressive des substances nocives pour l'ozone, dont les chlorofluorocarbones (CFC) et les

Mise à l'eau d'un système de surveillance environnementale à Panama par une équipe de la Woods Hole Oceanographic Institution. Photo : John F. Williams, US Navy

Un indicateur est une mesure qui peut servir à illustrer et présenter d'une façon simple des phénomènes complexes, y compris leur évolution et les progrès accomplis dans le temps.

Le trou d'ozone antarctique en septembre 2011. Le trou le plus important a été mesuré en septembre 2006. Un rétablissement complet dans cette région n'est pas attendu avant 2050. Photo : NOAA.



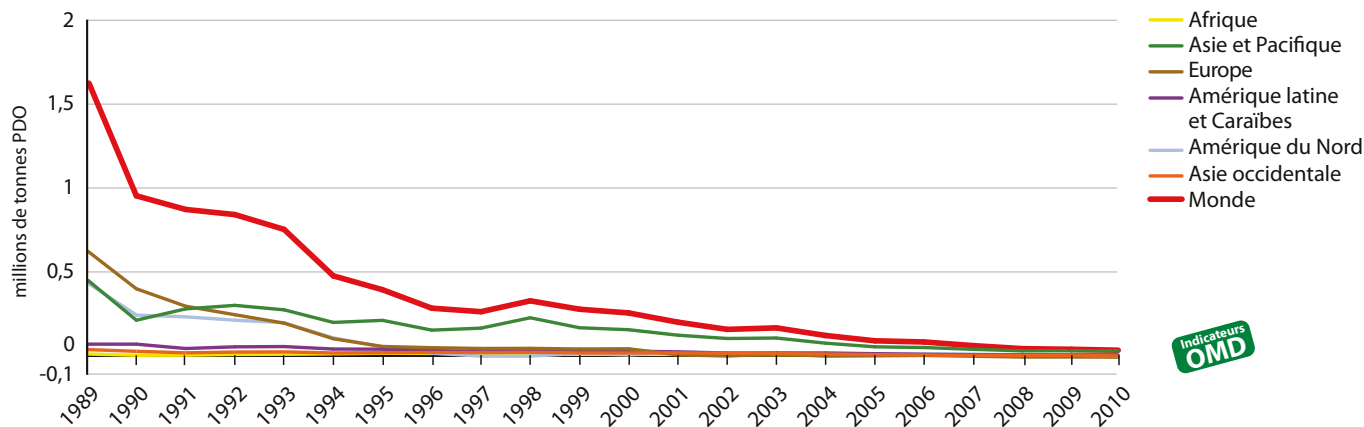


Figure 1 : Consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone en millions de tonnes de potentiel d'appauvrissement, 1989-2010. Si certaines difficultés persistent, cette consommation a cependant considérablement diminué grâce au Protocole de Montréal à la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone. Source : GEO Data Portal; établi d'après PNUE (2011a)

hydrochlorofluorocarbones (HCFC). Près de 98 % de ces substances contrôlées dans le cadre du Protocole ont été éliminées (**figure 1**). En conséquence, la couche d'ozone devrait retrouver son état d'avant 1980 d'ici le milieu de ce siècle. Néanmoins, certains produits de remplacement peuvent également avoir des effets nuisibles importants sur l'évolution du climat. Les hydrofluorocarbones (HFC) sont d'excellents substituts pour les réfrigérateurs et les climatiseurs industriels mais figurent parmi les gaz à effet de serre puissants à haut potentiel de réchauffement planétaire. À l'échelle mondiale, les émissions d'HFC augmentent

actuellement à un rythme de 8 % par an (**figure 2**). L'utilisation de ces substances risque d'anéantir tous les bénéfices obtenus au plan des changements climatiques suite à l'élimination des CFC et autres substances appauvrissant la couche d'ozone (PNUE 2011b).

Début 2011, des pertes d'ozone sans précédent étaient signalées au-dessus de l'Arctique (Manney et al. 2011). Les scientifiques ont attribué ce phénomène à des périodes de froid exceptionnellement longues, qui auraient favorisé l'érosion de l'ozone stratosphérique.

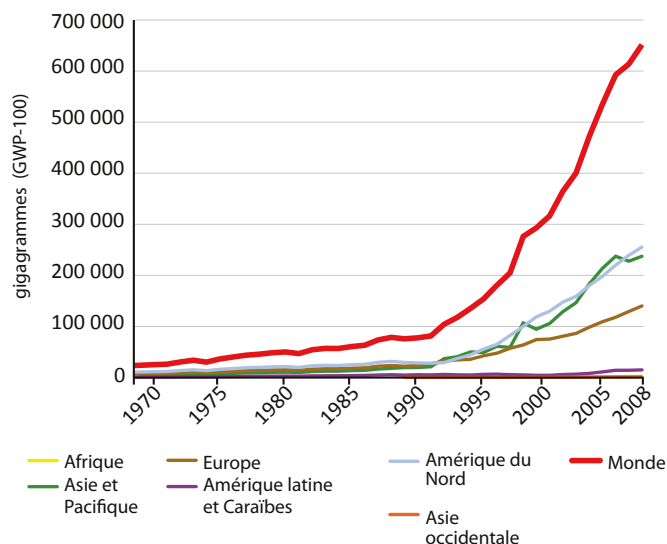


Figure 2 : Consommation de HFC en gigagrammes, 1968-2008. Le recours à des substituts pour ce type de substance qui appauvrit la couche d'ozone peut avoir un impact significatif sur les changements climatiques. Source : JRC/PBL (2010), PNUE (2011b)

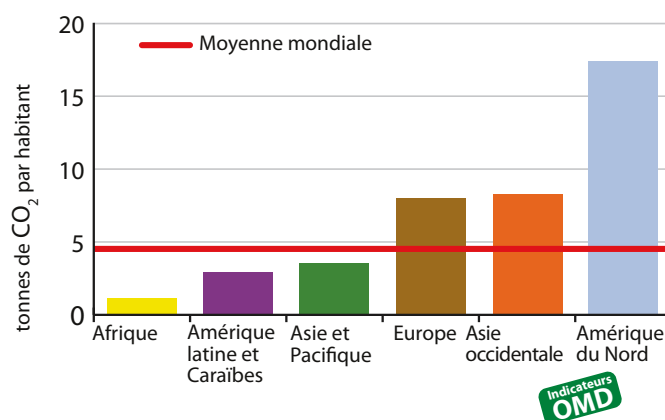


Figure 3 : Émissions de dioxyde de carbone par habitant, 2008. Elles dépassent largement la moyenne mondiale en Europe, en Asie occidentale et surtout en Amérique du Nord. Source : GEO Data Portal; établi d'après Boden et al. (2011)

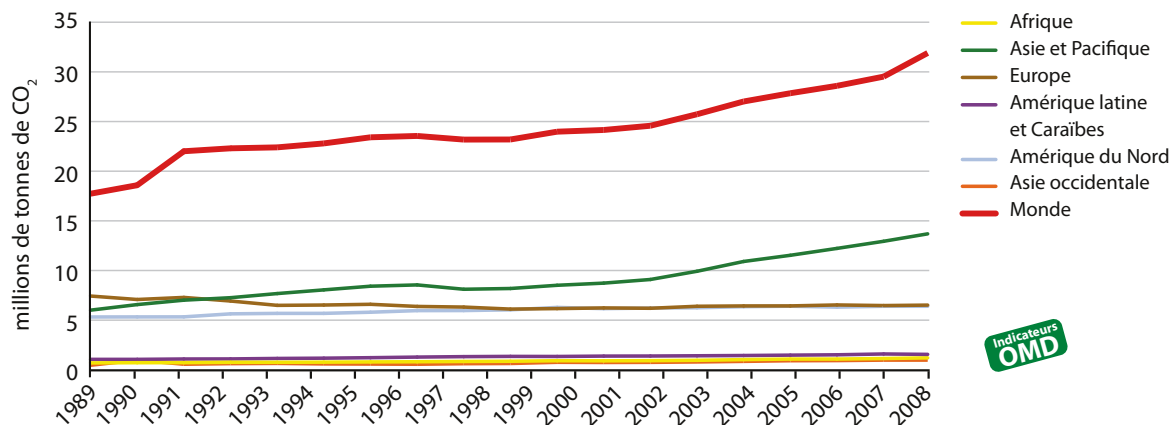


Figure 4 : Émissions de dioxyde de carbone dues à la consommation de carburants fossiles et à la production de ciment en milliards de tonnes de CO₂, 1989-2008. Ces dernières années, elles ont progressé à l'échelle mondiale, principalement en Asie et dans le Pacifique. Source : GEO Data Portal; établi d'après Boden et al. (2011)

Changements climatiques

Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) générées par la combustion de combustibles fossiles interviennent pour une large part dans l'évolution du climat. L'Amérique du Nord reste le principal émetteur de CO₂ par habitant, devançant l'Asie occidentale et l'Europe tandis que l'Afrique en est le plus faible producteur (**figure 3**). Les émissions mondiales continuent d'augmenter, atteignant 32,1 milliards de tonnes en 2008, soit une progression de 2,4 % par rapport à l'année précédente et de 42 % par rapport à 1990 (**figure 4**). On observe de fortes différences de niveaux d'émission entre les régions et les pays. Au cours de la dernière décennie, l'augmentation a été la plus sensible dans la région Asie – Pacifique. Parallèlement à cet accroissement des taux d'émission, les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère ont augmenté, passant de 280 ppm à l'époque préindustrielle et de 315 ppm en 1958 à 390 ppm en 2011, provoquant un réchauffement de la planète (Tans et Keeling 2011). Au-delà des fluctuations spatiales et temporelles à court terme, on constate un réchauffement mondial à long terme. La dernière décennie a été la plus chaude depuis 1880 si l'on considère les températures mondiales moyennes. Les dix années les plus chaudes ont toutes été enregistrées après 1998 (PNUE 2011c).

L'un des signes les plus évidents du réchauffement est la fonte des glaciers dans plusieurs régions du monde (**figure 5**). La fonte et la régression rapides, probablement accélérées, des glaciers ont des incidences graves sur l'approvisionnement en eau et en énergie, les variations du niveau des mers, les caractéristiques de végétation, les moyens de subsistance et la survenue de catastrophes naturelles. Un recul sensible des glaciers peut entraîner une déglaciation de vastes étendues dans de nombreuses chaînes montagneuses d'ici la fin de ce siècle (WGMS 2008).

Les combustibles fossiles – principalement le pétrole, le charbon et le gaz – continuent de dominer l'approvisionnement énergétique mondial

(**figure 6**). Malgré certains progrès sur le plan de l'efficacité énergétique et un recours accru à des sources d'énergie renouvelables, la consommation de carburants fossiles représente environ 80 % de l'approvisionnement en énergies primaires. Cependant, les investissements dans les énergies renouvelables progressent de façon spectaculaire, s'élevant à 211 milliards de dollars en 2010, un montant 5 fois supérieur à celui enregistré en 2004 (**figure 7**). Bien que la part globale des énergies renouvelables dépasse à peine 13 %, les énergies solaire et éolienne ont connu une forte poussée ces dernières années, de même que les biocarburants (**figure 8**).

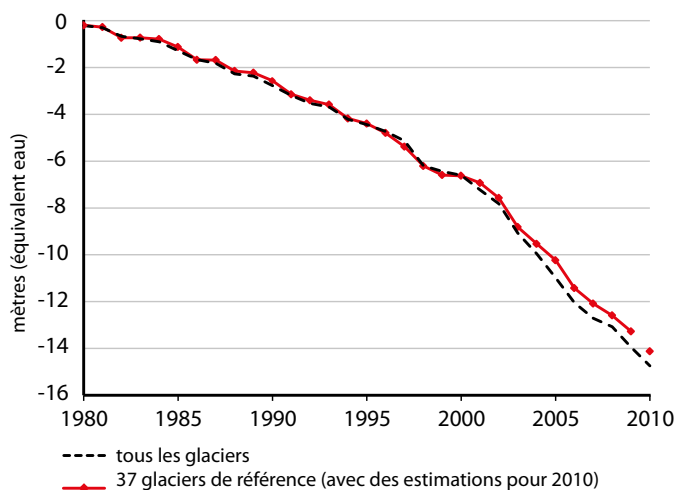


Figure 5 : Bilan massique des glaciers de montagne. La fonte se poursuit à un rythme sans précédent, avec de graves conséquences pour l'environnement, les ressources naturelles et le bien-être humain. Source : WGMS 2011.

Le recours à l'échange de droits d'émission de carbone, assez récent, s'est rapidement répandu (**figure 9**). Entre 2008 et 2010, après cinq années consécutives de croissance robuste, le marché du carbone s'est stabilisé aux alentours de 140 milliards de dollars, ce qui équivaut à 0,2 % du PIB mondial. La progression du marché mondial depuis 2005, année de l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto, est due essentiellement à une augmentation du volume des transactions. Les prix du carbone ont été affectés par la récente récession économique. Sur le marché européen, ils sont passés, en moins d'un an, de 30 à 8 euros. En outre, en raison d'incertitudes concernant les réglementations post-Kyoto qui seront adoptées après 2012, certains mécanismes enregistrent aujourd'hui de lourdes pertes de valeur. En 2010, le système d'échange de droits d'émission de l'Union européenne, lancé en 2005, représentait entre 84 et 97 % des valeurs échangées au niveau mondial (Banque mondiale 2011).

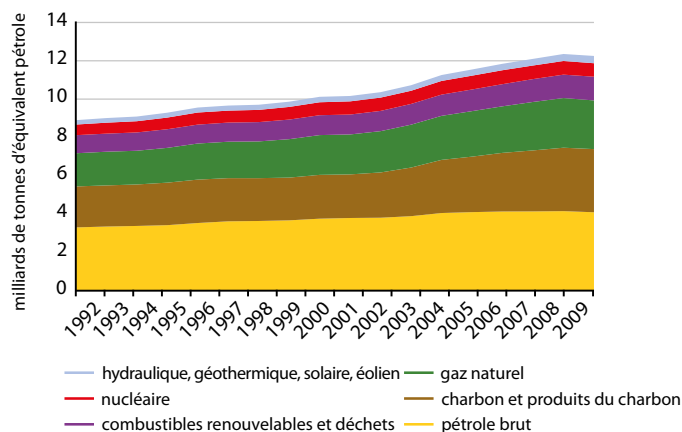


Figure 6 : Approvisionnement en énergies primaires, 2009. La consommation de carburants fossiles a régulièrement augmenté au cours des deux dernières décennies mais a stagné ces dernières années. Les ressources renouvelables représentent une part modeste mais croissante. Sources : AIE (2011a), REN21 (2011)

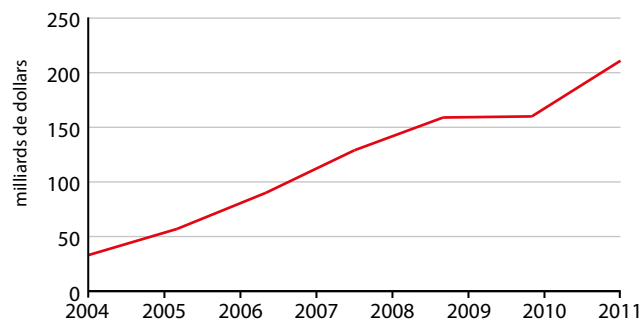


Figure 7 : Investissements dans les énergies renouvelables, 2004-2011. Ces investissements ont augmenté rapidement ces dernières années, s'élevant à 211 milliards de dollars en 2011. Source : PNUE (2011d)

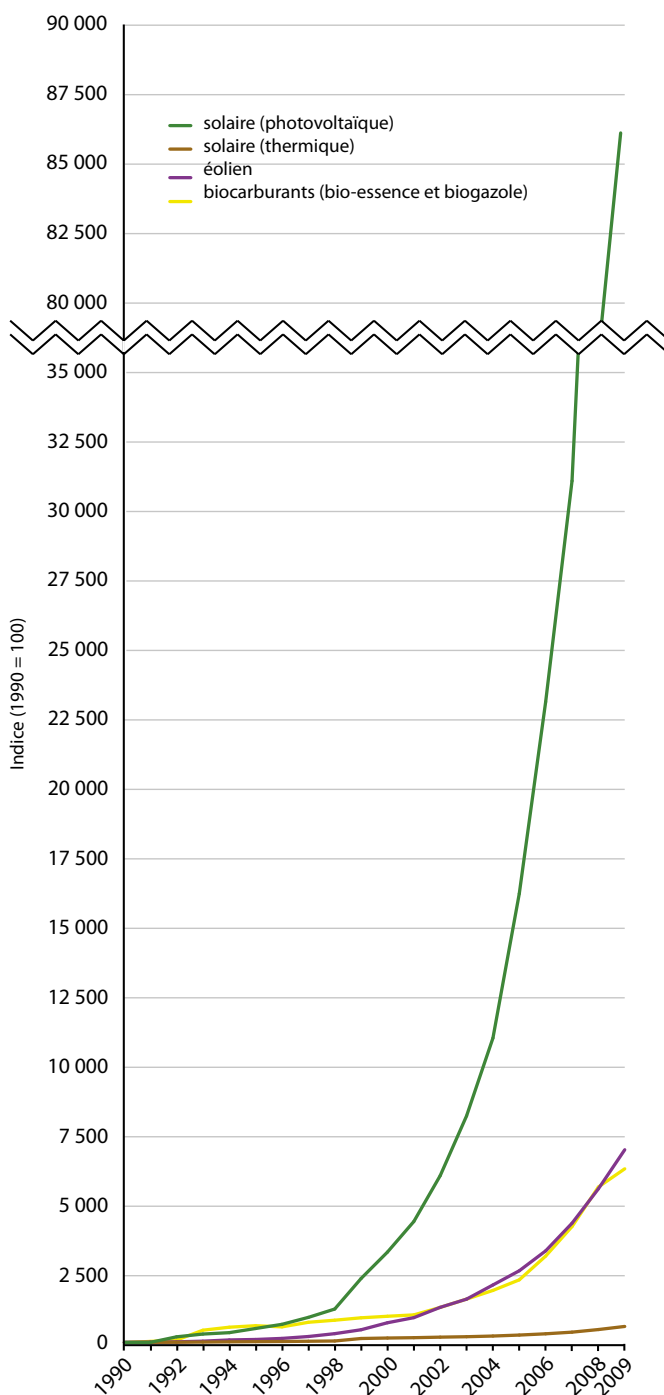


Figure 8 : Indice d'approvisionnement en énergies renouvelables, 1990-2009 (1990=100). Montée en flèche de l'énergie solaire, qui devance l'énergie éolienne et les biocarburants. Source : GEO Data Portal; établi d'après AIE (2011b)

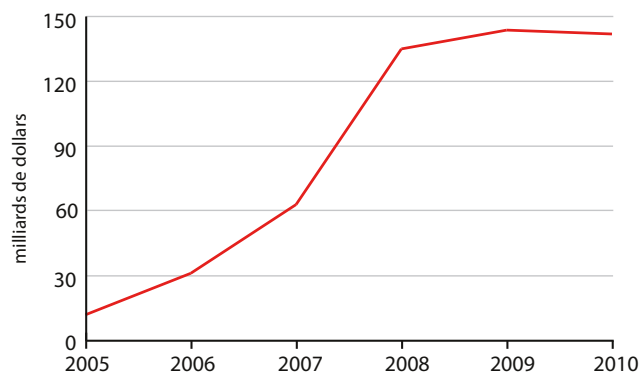


Figure 9 : marché du carbone en milliards de dollars, stabilisé autour de 140 milliards de dollars ces dernières années. Sa croissance est principalement due à une augmentation des transactions. Les prix ont baissé en raison de la récession économique. Source : Banque mondiale (2011).

Dans plusieurs grandes villes, notamment à Beijing, au Caire et à New Delhi, les taux de fines particules atmosphériques (PM_{10}), qui affectent aussi bien le climat mondial que la santé humaine, dépassent encore largement le niveau maximum de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recommandé par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS 2006, 2011). La carte de la pollution de l'air montre une forte concentration de très fines particules ($PM_{2.5}$), notamment dans certaines régions d'Asie, d'Asie occidentale et d'Afrique (**figure 10**). Il convient néanmoins de traiter avec prudence les données relatives aux fines particules dans la mesure où il s'agit d'estimations fondées sur des modèles et sensibles aux conditions locales.

Exploitation des ressources naturelles

L'appauvrissement des ressources naturelles se poursuit de différentes manières et dans de nombreuses régions du monde. Presque partout, les eaux, les terres et la biodiversité subissent une pression intense. C'est notamment le cas des stocks de poisson (FAO 2011a). Selon certaines estimations, le pourcentage de stocks surexploités, épuisés ou en voie de reconstitution serait en augmentation depuis de nombreuses années, atteignant 33 % en 2008, alors que s'amenuise la proportion des ressources sous-exploitées ou modérément exploitées (**figure 11**). Le volume des captures marines s'est stabilisé ces dernières années, sauf dans la région Asie-Pacifique où il continue d'augmenter. L'aquaculture a connu une forte croissance, là encore principalement en Asie et surtout en Chine (**figure 12**). En 2009, la production aquacole mondiale grimpait à 51 millions de tonnes tandis que les captures mondiales restaient inférieures à 90 millions de tonnes. L'aquaculture engendre, pour bon nombre d'intervenants et d'économies, des avantages considérables mais présente des inconvénients, notamment : de grandes quantités de poisson nécessaires pour l'alimentation aquacole, la perte de mangroves sur les côtes là où s'établissent des exploitations piscicoles et des produits chimiques et pharmaceutiques (notamment des antibiotiques) parfois utilisés en grandes quantités et rejetés dans l'environnement (FAO 2011b).

Les pressions qui pèsent sur les écosystèmes marins et côtiers s'alourdissent avec l'acidification progressive des océans, suite à l'augmentation des taux de CO_2 dans l'atmosphère (**figure 13**). À mesure que le carbone s'accumule dans l'atmosphère, les quantités de

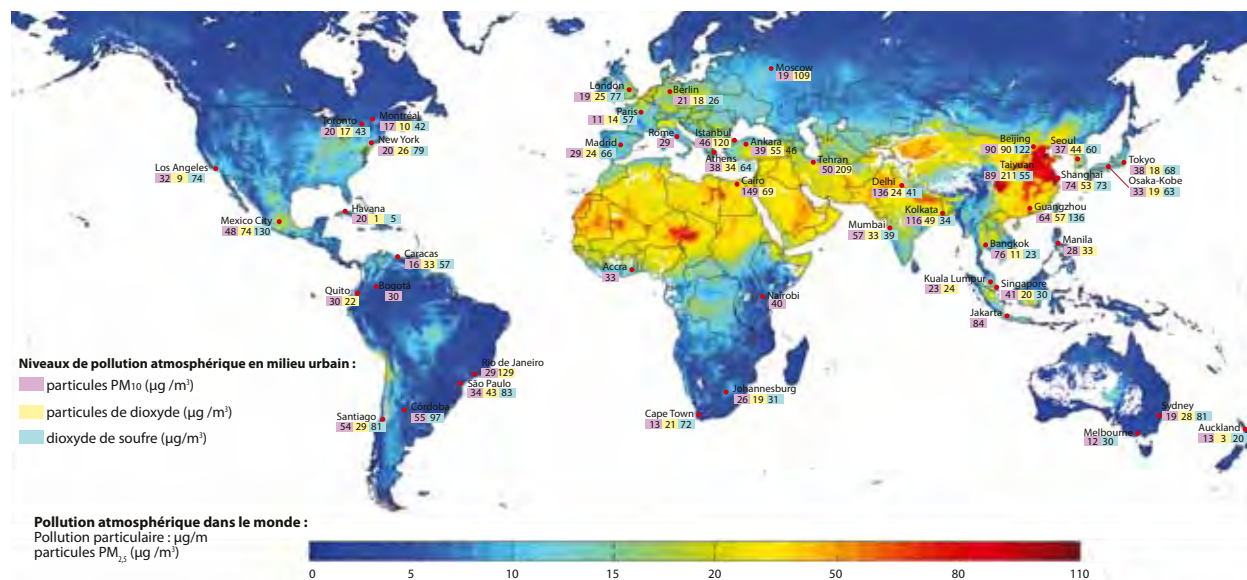


Figure 10 : Niveaux de pollution atmosphérique en milieu urbain dans le monde. Les estimations indiquent de niveaux nettement supérieurs aux directives de l'Organisation mondiale de la Santé. Sources : van Donkelaar et al. (2010), Banque mondiale (2010).

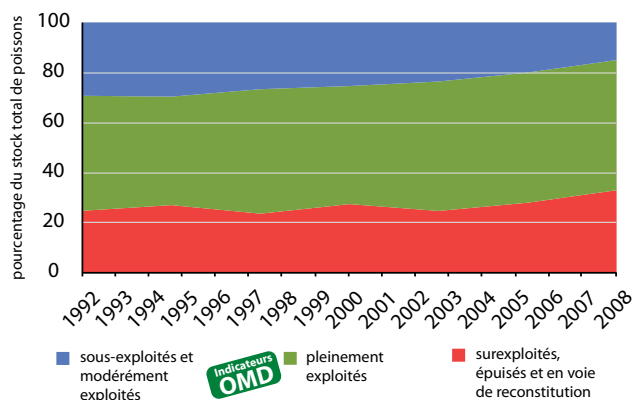


Figure 11 : Exploitation des stocks de poisson. Le pourcentage des stocks pleinement exploités, surexploités, épuisés et en voie de rétablissement a augmenté, atteignant 85 %. Source : GEO Data Portal; établi d'après FAO (2011a)

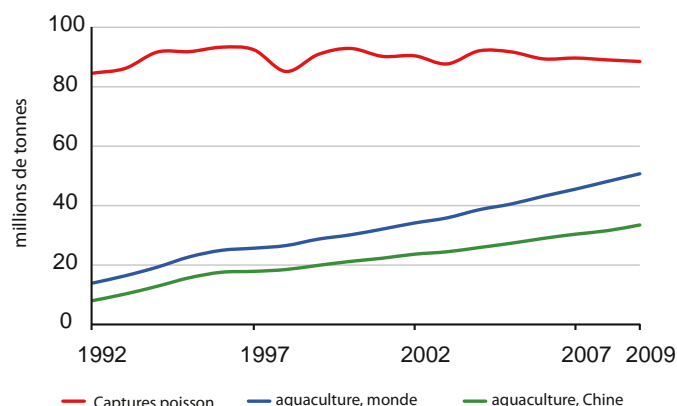


Figure 12 : Production halieutique et aquacole. Les captures mondiales de poisson se sont stabilisées autour de 90 millions de tonnes par an tandis que l'aquaculture a sensiblement progressé, surtout en Chine et ailleurs en Asie. Source : FAO (2011b)

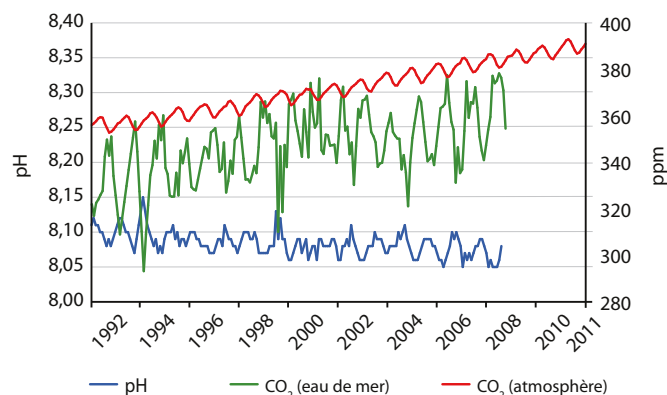


Figure 13 : Concentrations atmosphériques de CO2 et acidification des océans, indiquées par la pression partielle du CO2 et la diminution du pH dans les eaux de surface mondiales. Source : Caldeira et Wickett (2003), Feely et al. (2009), Tans et Keeling (2011)

CO₂ absorbées par les océans augmentent, renforçant la pression partielle du carbone et abaissant le pH. L'acidification croissante des océans peut avoir des conséquences néfastes importantes pour les organismes marins, en modifiant la composition spécifique et en perturbant les réseaux trophiques et les écosystèmes marins ainsi que pour les activités humaines liées à la mer en portant atteinte notamment à la pêche et au tourisme. Le sort des coraux, des mollusques et crustacés et du phytoplancton inquiète tout particulièrement. Au regard de telles tendances, il convient d'assurer au plus vite une gestion durable des stocks mondiaux de poisson et de la biodiversité marine et le besoin de conclure un accord international pour une meilleure gestion du milieu marin se fait de plus en plus pressant (PNUE 2010).

Malgré un ralentissement du taux global de déforestation, de vastes superficies forestières continuent de régresser, en particulier en Amérique latine et en Afrique (figure 14). En même temps, la superficie totale des plantations forestières ne cesse d'augmenter, une grande partie de ces terres étant consacrées à la culture de palmiers à huile pour la production vivrière et de biocarburants (figure 15).

La superficie forestière gérée sous le contrôle des deux principaux organismes de certification – le Conseil de protection des forêts (FSC) et le Système de reconnaissance des certifications forestières (PEFC) – augmente considérablement depuis 2002, au rythme de 20 % par an (figure 16). Cependant, la superficie totale exploitée conformément aux normes de ces deux régimes demeure modeste et ne représente actuellement que 10 % environ de l'ensemble des forêts, ces exploitations étant principalement situées en Europe et en Amérique du Nord. De même, les zones protégées s'étendent progressivement dans toutes les régions du monde (Figure 17). Toutefois, les aires marines protégées restent limitées, ne représentant que 7 % des eaux côtières et 1,4 % des océans. De nouveaux objectifs mondiaux d'extension des aires protégées ont été fixés. En 2010, les gouvernements ont décidé de protéger 17 % des eaux terrestres et continentales et 10 % des zones côtières et marine d'ici 2020 (CDB 2010).

La dégradation de la biodiversité demeure extrêmement préoccupante, comme l'indique l'index de la liste rouge (ILR) des espèces menacées (figure 18). Cette liste évalue le risque d'extinction des espèces en les classant dans 7 catégories, allant de « Préoccupation mineure » à « Éteinte ». Une valeur de 1,0 indique que l'espèce en question ne devrait pas disparaître dans un avenir proche tandis que 0,0 signifie que l'espèce est éteinte. Un léger changement dans le niveau de menace peut avoir un impact significatif sur le déclin de l'espèce. Pour ce qui concerne les groupes d'espèces et les années pour lesquelles des données sont disponibles (c'est-à-dire les oiseaux, mammifères et amphibiens depuis 1992), la tendance est à la baisse. Près d'un cinquième des vertébrés sont considérés comme menacés d'extinction dans une fourchette comprise entre 13 % (oiseaux) et 41 % (amphibiens). C'est dans les régions tropicales que l'on trouve le plus grand nombre de vertébrés menacés (Hoffman et al. 2010).

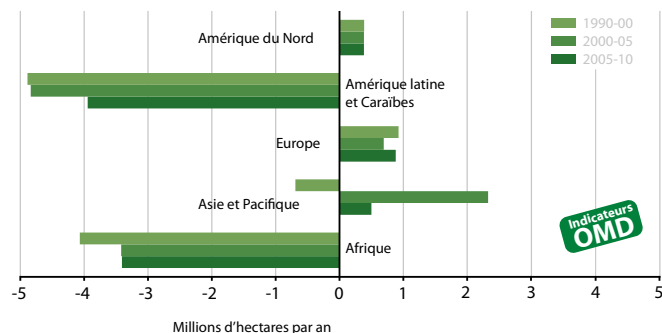


Figure 14 : Évolution annuelle du couvert forestier. Globalement, le taux de déforestation diminue et, dans certaines régions, les superficies forestières augmentent. Néanmoins, de vastes zones forestières régressent, en particulier en Amérique latine et en Afrique. Source : GEO Data Portal; établi d'après FAO (2010)

Des progrès significatifs sont enregistrés en ce qui concerne la réglementation et la communication de données sur les espèces menacées dans le cadre de la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES). Cela est dû en partie à l'augmentation du nombre de Parties à cette convention et au nombre d'espèces figurant dans ses annexes. La CITES a pour objectif d'assurer la légalité, la viabilité et la traçabilité du commerce international des espèces d'animaux et de végétaux inscrites sur ses listes. Les types d'échanges sont divers, allant d'animaux et

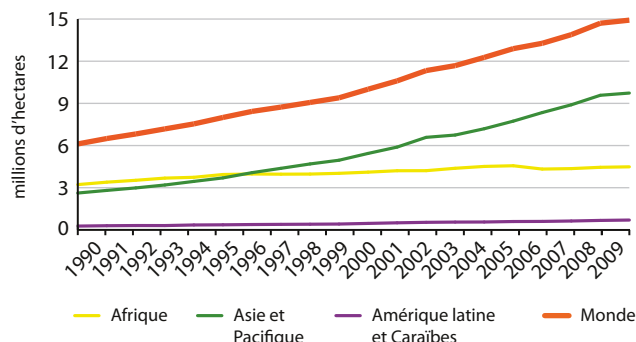


Figure 15 : Superficie des plantations de palmier à huile. L'augmentation mondiale de la demande de produits alimentaires et de combustible est la principale cause du déboisement en zone tropicale. Cette perte de forêts est due dans une large mesure à l'expansion rapide de la monoculture de palmiers à huile. Source : GEO Data Portal; établi à partir de FAO (2011c)

végétaux vivants à une vaste gamme de produits de la faune et de la flore sauvages, notamment des produits alimentaires, des articles en cuir exotique, des instruments de musique, du bois de construction, des bibelots touristiques et des médicaments. On estime que le commerce international d'espèces sauvages représente chaque année plusieurs milliards de dollars et porte sur des millions de spécimens de plantes et animaux. Le volume des échanges indique une augmentation du commerce déclaré d'animaux vivants jusqu'à la première moitié des années 1990 suivie d'une relative stabilisation jusqu'en 2005 puis d'un

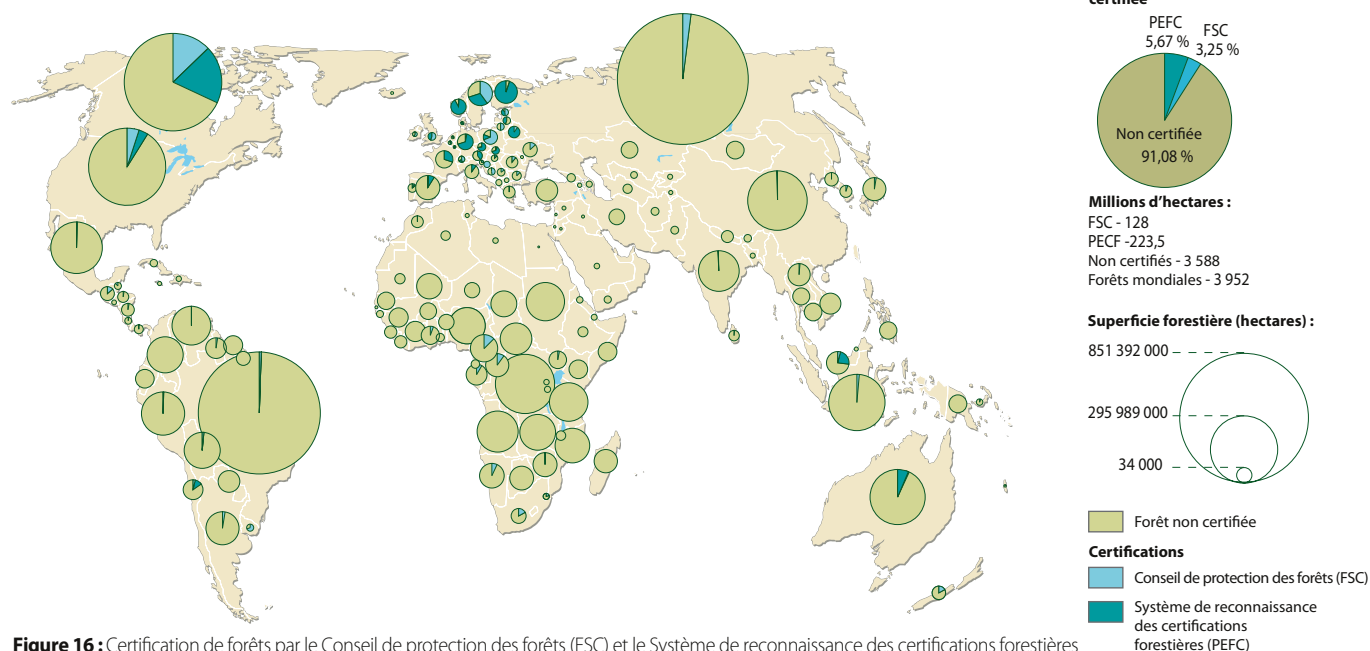


Figure 16 : Certification de forêts par le Conseil de protection des forêts (FSC) et le Système de reconnaissance des certifications forestières (PEFC) en 2011. On observe une augmentation impressionnante des certifications mais principalement en Europe et en Amérique du Nord. Sources : FSC 2012, PEFC (2012)

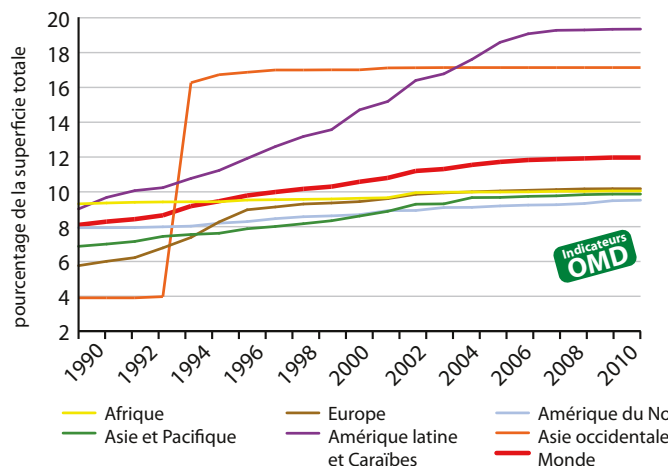


Figure 17 : Étendue des aires protégées pour le maintien de la diversité biologique par rapport aux superficies totales. On observe un accroissement de ces zones, en particulier en Amérique latine et dans les Caraïbes mais aussi en Asie occidentale après la création, en 1994, d'une vaste réserve. Source : GEO Data Portal, établi d'après PNUE-WCMC (2011)

déclin au cours de ces dernières années (figure 19). Toutefois, la proportion d'animaux élevés en captivité augmente depuis quelques années, dépassant celle des animaux sauvages déclarés comme faisant l'objet d'échanges.

L'accès à l'eau potable s'est sensiblement amélioré, avec un chiffre mondial proche de 90 % en 2010 (figure 20). Certaines régions, comme l'Afrique ou la région Asie-Pacifique, enregistrent des progrès remarquables, même si des difficultés persistent, surtout en milieu rural. On est toutefois loin d'avoir atteint l'objectif fixé à l'échelle mondiale

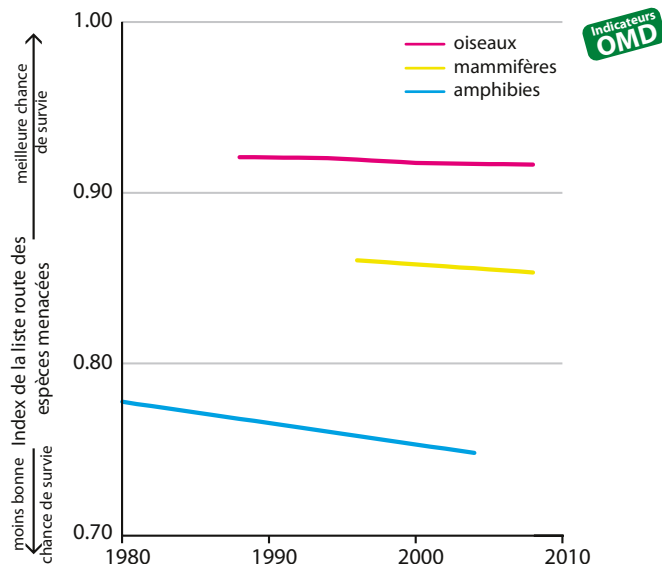


Figure 18 : Liste rouge des espèces menacées. Les oiseaux, mammifères et amphibiens sont de plus en plus menacés. Bien que les données soient insuffisantes, il semble que d'autres groupes d'espèces connaissent un sort semblable, sinon pire. Source : UICN 2011.

pour l'accès à un meilleur système d'assainissement (OMS/UNICEF 2012). Même si des progrès sont signalés dans toutes les régions du monde, environ la moitié de la population des régions en développement n'utilise pas d'installations d'assainissement améliorées. Dans ce domaine également, les villes sont mieux équipées que les campagnes, bien que les disparités tendent à s'atténuer (OMS/UNICEF 2012).

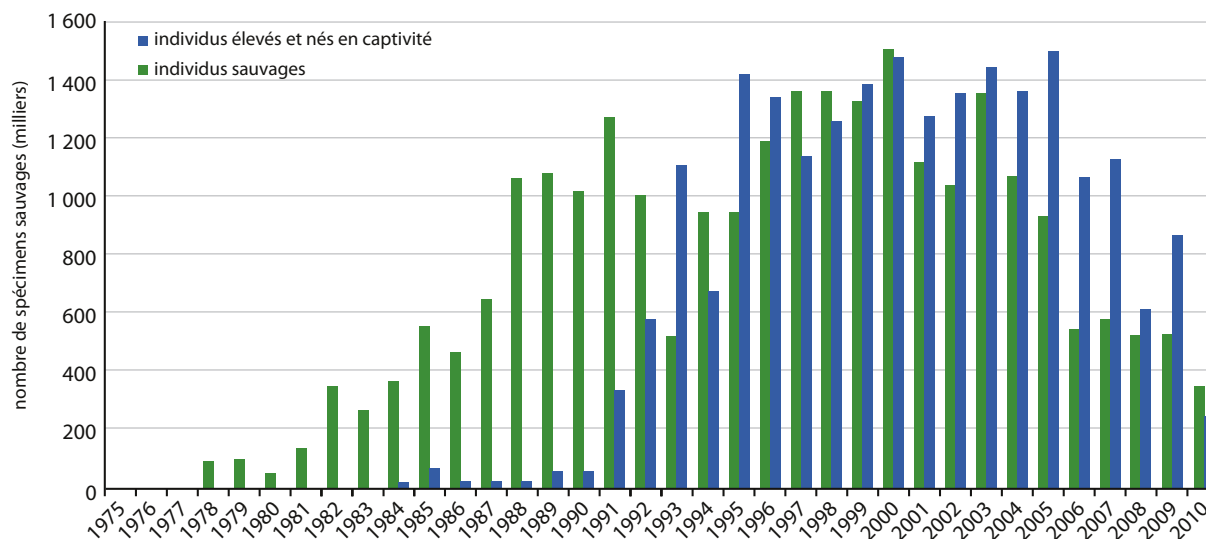


Figure 19 : Commerce d'individus nés et élevés en captivité par rapport au commerce d'individus sauvages, 1975-2010. La réglementation et la déclaration de données sur les échanges d'animaux vivants se sont considérablement renforcées. Ces dernières années, le commerce d'animaux élevés en captivité dépasse le commerce d'animaux sauvages. Source : CITES (2012)

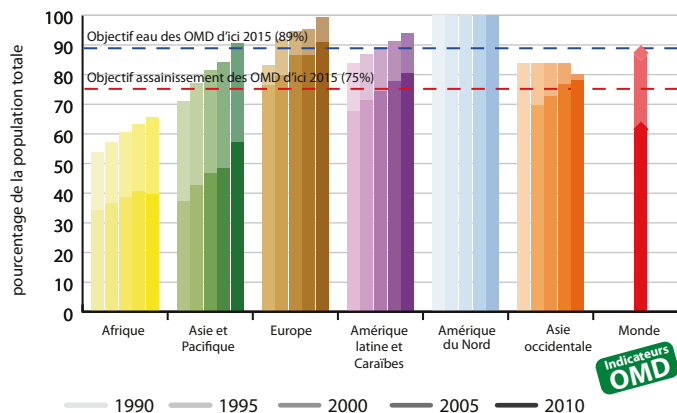


Figure 20 : Proportion de la population ayant un accès durable à une source d'eau et un assainissement améliorés (données préliminaires pour 2010). L'objectif mondial des OMD pour l'eau potable sera dépassé d'ici 2015 mais ne sera pas atteint pour l'assainissement. Les défis demeurent, surtout en zone rurale dans les régions en développement. Source : GEO Data Portal, établi d'après OMS/UNICEF (2012)

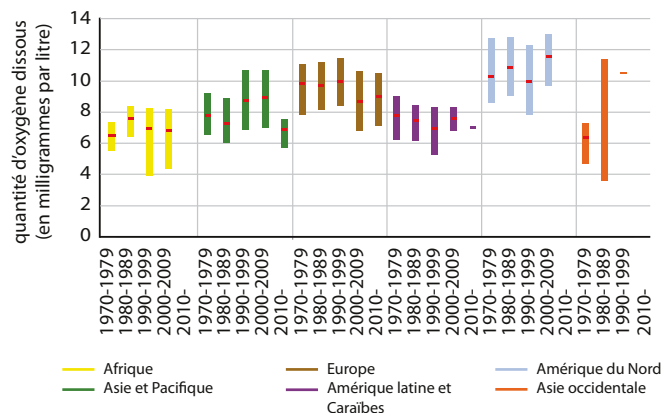


Figure 21 : Niveaux d'oxygène dissous dans les eaux de surface. Selon les données disponibles, il semble qu'ils se situent généralement dans les limites couramment acceptées : entre 6 mg/l dans l'eau chaude et 9,5 mg/l dans l'eau froide, norme fixée en Australie, au Brésil et au Canada, par exemple. On notera toutefois que ces données ne sont pas représentatives de toutes les eaux dans les différentes régions ni de chaque décennie analysée ici. Source : PNUE-GEMS/Eau (2011)

Les déversements incontrôlés d'eaux usées dans les eaux de surface ont un impact direct sur la qualité de l'eau. Les taux d'oxygène dissous constituent un bon indicateur des conditions environnementales de la vie aquatique. Ceux-ci peuvent augmenter suite à une eutrophisation ou à un enrichissement excessif en nutriments résultant d'une productivité accrue du phytoplancton ou diminuer sous l'effet d'un accroissement de la demande d'oxygène liée à la présence de polluants organiques (**figure 21**). Bien que les effets aient souvent une ampleur locale, l'impact cumulatif sur la qualité des cours d'eau et des lacs est considéré comme un problème majeur d'envergure mondiale (PNUE 2012a). Des systèmes de surveillance de la qualité de l'eau sont établis

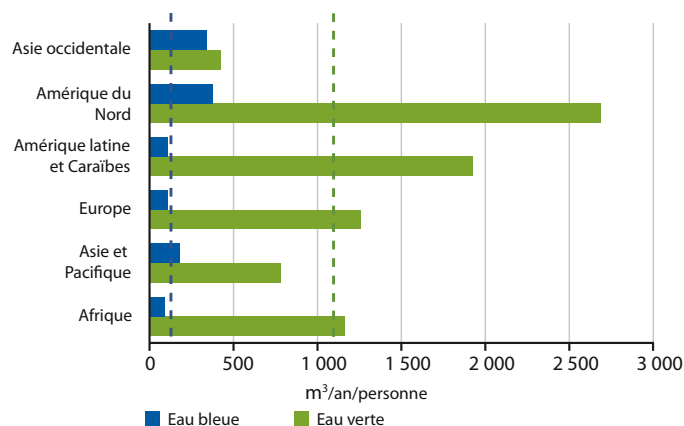


Figure 22 : Empreinte hydrique, bleue et verte. L'empreinte en eau d'un pays est le volume total d'eau douce utilisé pour produire les biens et services consommés par sa population. L'empreinte en eau bleue, liée à la consommation des eaux de surface et souterraines, est la plus importante en Amérique du Nord, en Amérique latine et aux Caraïbes. L'empreinte en eau verte, qui concerne l'utilisation des eaux de pluie, est la plus importante en Amérique du Nord et en Asie occidentale. Source : Mekonnen et Hoekstra (2011)

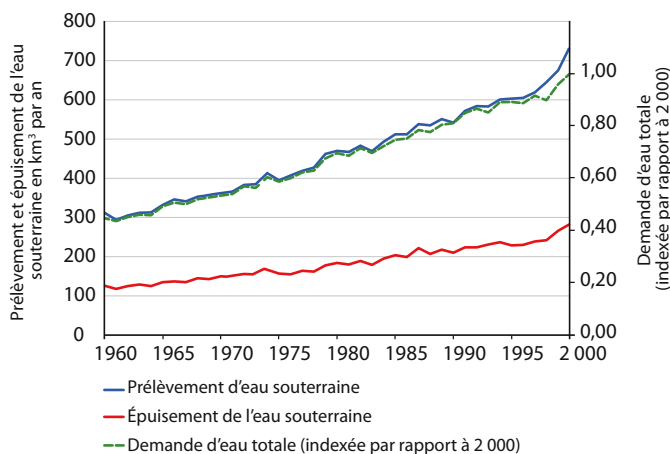


Figure 23 : Prélèvement et épuisement de l'eau souterraine en km³ par an, 1960-2000. Le taux d'épuisement a augmenté régulièrement au cours des dernières décennies en même temps que la demande et les prélèvements, comme l'indiquent les données modélisées. Source : Wada et al. (2010)

depuis longtemps dans certaines régions mais ce type de contrôle devrait être amélioré dans d'autres. Il est difficile de fournir une évaluation globale de la qualité de l'eau, principalement en raison de lacunes dans les données, d'un accès limité aux statistiques ainsi que de capacités et ressources restreintes.

L'empreinte hydrique totale d'un pays est le volume total d'eau douce utilisé pour produire les biens et les services consommés par sa population. Cette eau peut provenir partiellement d'un lieu situé en dehors du pays (**figure 22**). Indispensable pour la consommation

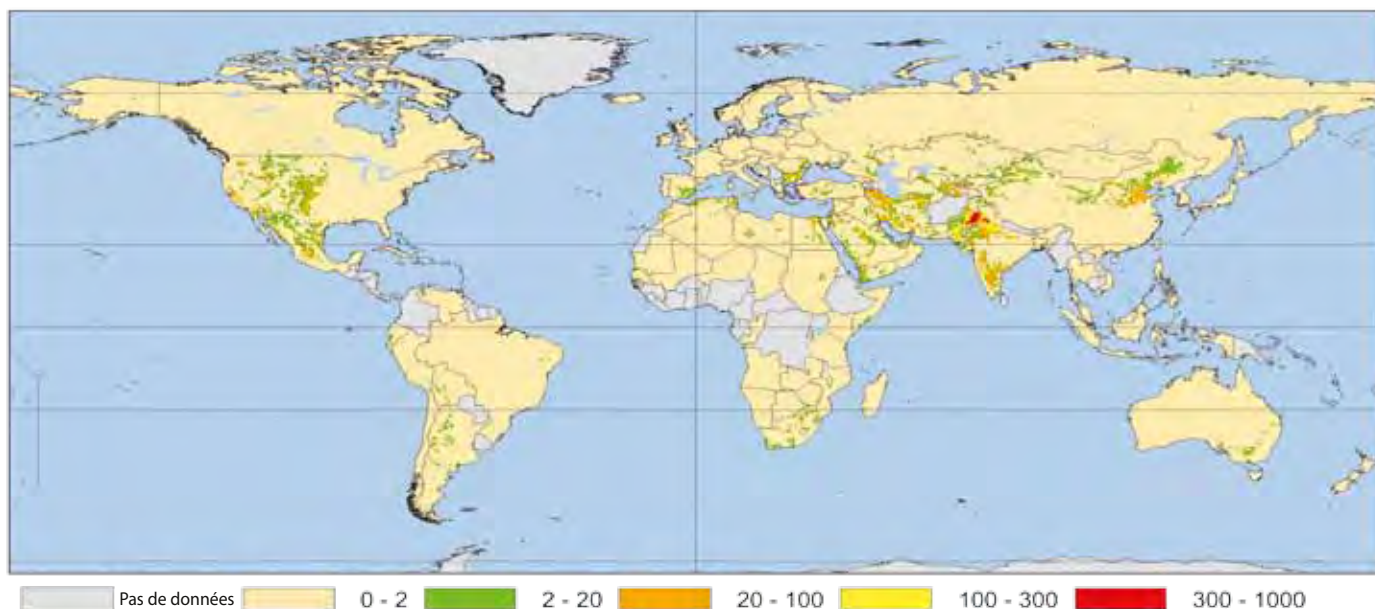


Figure 24 : Carte mondiale de l'épuisement des eaux souterraines, en mm par an pour l'année 2000. L'épuisement des nappes phréatiques est observé principalement dans certaines régions de l'Asie et du Pacifique ainsi qu'en Asie occidentale et en Amérique du Nord. Source : Wada et al. (2010)

humaine (l'« eau bleue »), l'eau sert également à maintenir les écosystèmes et les services qu'ils fournissent à la société (l'« eau verte »). Dans bien des régions, l'empreinte hydrique totale s'accroît. De nombreux pays l'externalisent en important des biens dont la

production exige de grandes quantités d'eau, soumettant ainsi à de fortes pressions les ressources en eau des régions exportatrices (Mekonnen et Hoekstra 2011). Le secteur agricole est le principal consommateur d'eau, suivi du secteur industriel et des ménages.

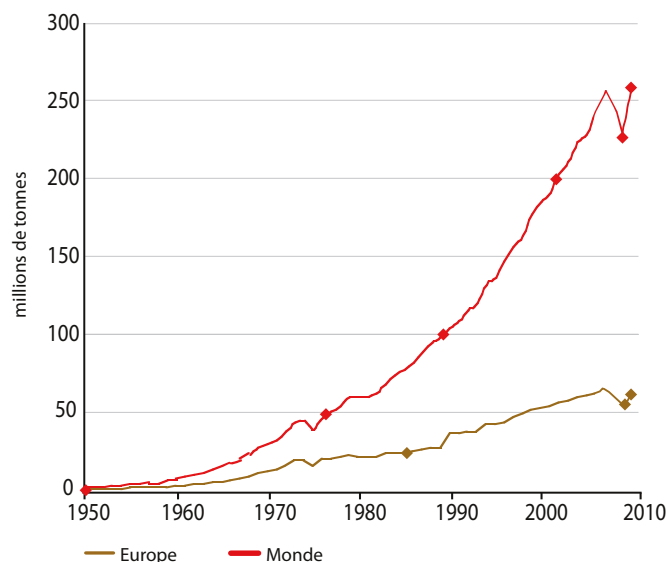


Figure 25 : Production de plastiques en millions de tonnes, 1950-2010. Après un fléchissement en 2008-2009, la production mondiale a atteint un nouveau record de 265 millions de tonnes en 2010. Les déchets plastiques dans les océans suscitent des préoccupations croissantes depuis quelques années. Source : PlasticsEurope (2011)

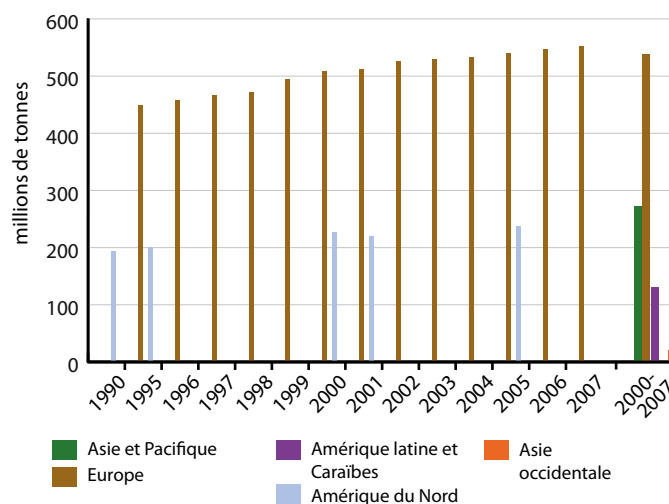


Figure 26 : collecte des déchets municipaux dans différentes régions, 1990-2007. Données disponibles insuffisantes pour l'Afrique. L'Europe enregistre le niveau de collecte le plus élevé, devant l'Asie et le Pacifique et l'Amérique du Nord. Les données fiables sur la production, la collecte et le traitement des déchets dangereux et autres restent très fragmentaires pour la plupart des régions du monde. Source : GEO Data Portal, établi d'après UNSD (2011), EPA (2012).



À Dharavi (Inde), le plus grand bidonville de l'Asie, près de 80 % des déchets secs - tels que plastiques, papiers et ferraille - sont triés pour être recyclés. Photo : Cristen Rene

L'accroissement de l'empreinte hydrique humaine se reflète également dans les volumes d'eau prélevés. La consommation d'eau souterraine a connu une augmentation constante entre 1960 and 2000 (**figure 23**). La carte de l'épuisement des eaux souterraines pour l'année 2000 indique les zones où les volumes extraits dépassent la réalimentation, entraînant l'épuisement des nappes (**figure 24**). L'abaissement du niveau des nappes phréatiques et l'insuffisance des flux souterrains risquent d'assécher les écosystèmes dépendant des aquifères et de nuire aux fonctions de régulation et à d'autres services écosystémiques.

Produits chimiques et déchets

La quantité et le nombre de produits chimiques et de déchets rejetés dans notre environnement augmentent. Comme on l'a vu dans la précédente édition de l'*Annuaire du PNUE*, les déchets plastiques dans

les océans deviennent une préoccupation croissante en raison d'incidences possibles sur le plan chimique (PNUE 2011d). La production de plastique permet d'évaluer indirectement la quantité de débris plastiques susceptibles de se retrouver dans les cours d'eau et les océans (**figure 25**). La solution à ce problème et au rejet incontrôlé d'autres déchets réside dans l'amélioration de la gestion des déchets. On dispose malheureusement de très peu de données fiables et comparables sur la production, la collecte et la gestion des déchets et celles-ci varient fortement entre les régions et au sein d'une même région. On note cependant certains progrès concernant les données relatives aux déchets dangereux mais il est impossible de dégager des tendances certaines pour les différentes régions et l'ensemble du monde. Le volume des déchets collectés par les municipalités (**figure 26**) permet d'établir, à titre indicatif, une comparaison entre les régions, sauf pour l'Afrique. L'Europe enregistre le volume de déchets collectés le plus élevé, avec une augmentation constante jusqu'à 552 millions de tonnes en 2007. Compte tenu des moyennes établies pour la période 2002-2009, les quantités collectées dans les autres régions sont moins importantes. Pour l'Afrique, on ne dispose pas de données sur les déchets à l'échelle régionale.

Gouvernance de l'environnement

La gouvernance internationale de l'environnement se retrouve au premier plan des débats sur le développement durable. Dans la perspective de l'établissement d'un cadre institutionnel pour le développement durable, cette question devrait être abordée à la Conférence des Nations Unies sur le développement durable qui doit se tenir en 2012 à Rio de Janeiro (Rio+20). Parmi les principaux instruments mondiaux figurent les accords multilatéraux sur l'environnement qui couvrent le climat, la biodiversité, les produits chimiques et d'autres questions. Le nombre de Parties à ces accords et conventions a considérablement augmenté (**figure 27**).

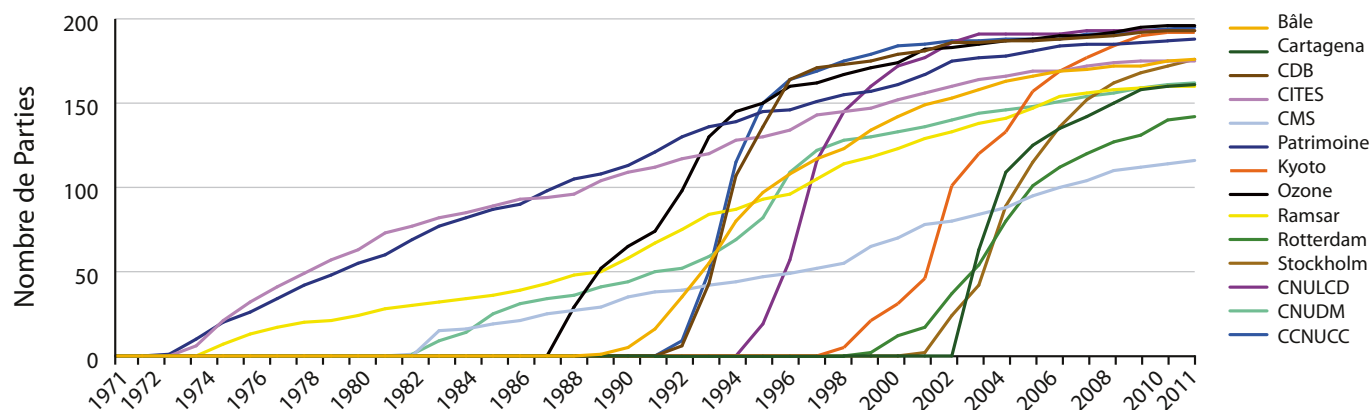


Figure 27 : Nombre de Parties aux accords multilatéraux sur l'environnement, 1971-2011. Un grand nombre de ces conventions atteignent le nombre maximum de pays signataires. Globalement, les 14 accords représentés ici regroupaient, en 2011, 89 % du nombre total de Parties. L'instauration et la signature de tels accords constituent un premier pas important mais ne signifient pas que les problèmes environnementaux traités seront immédiatement résolus. Sources : Établi selon les données fournies par divers secrétariats d'accords multilatéraux (voir liste de référence).

La signature et la ratification d'un accord ou protocole international n'entraînent pas nécessairement la mise en place de mesures ou la résolution d'un problème environnemental dans un avenir proche. Ces démarches reflètent une prise de conscience et un engagement à traiter des questions importantes. Plusieurs accords mondiaux multilatéraux, comme le Protocole de Montréal sur l'appauvrissement de la couche d'ozone, ont produit d'excellents résultats. La majorité des pays du monde sont aujourd'hui Parties à plusieurs accords de ce type, dont certains approchent du nombre maximum de signataires avec près de 200 pays. Globalement, les 14 accords multilatéraux considérés dans la figure ont vu le nombre de Parties atteindre 89 % en 2011, contre 69 % lors de l'entrée en vigueur du dernier accord (le Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques) en 2003.

Sur un plan plus commercial, on peut examiner l'évolution de la certification de la gestion environnementale (**figure 28**). ISO 14001, par exemple, codifie les pratiques et les normes que devraient appliquer les entreprises et organisations pour réduire le plus possible les effets nuisibles de leurs activités sur l'environnement et améliorer leurs performances environnementales. Une certification indique le degré de conformité d'une entreprise par rapport à la politique de protection de l'environnement qu'elle s'est fixée. Elle ne reflète pas nécessairement une amélioration de la performance ou une réduction de l'impact sur l'environnement. La forte augmentation du nombre de certifications ISO 14001, avec 18 fois plus de certifications en 2010 qu'en 1999, traduit un engagement

croissant de la part d'entreprises et organisations à adopter un système de gestion de l'environnement.

La période à venir

Ces 20 dernières années ont vu se produire des changements notables dans les modes de production économique et de consommation, le commerce international et les technologies de l'information et de la communication. Dans le domaine de l'environnement également, des bouleversements majeurs ont eu lieu, avec l'accumulation de données confirmant l'évolution du climat et ses incidences au niveau planétaire, l'appauvrissement rapide de la biodiversité, l'extinction de nombreuses espèces, la dégradation continue des terres et des sols et la détérioration des eaux intérieures et des océans. Divers indicateurs, environnementaux notamment, nous permettent de suivre constamment l'état de l'environnement. Ils seront utilisés lors de la prochaine Conférence des Nations Unies pour le développement durable à Rio de Janeiro (Rio+20) pour évaluer les progrès accomplis depuis le premier sommet de Rio, la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) en 1992 (PNUE 2011c).

Depuis 1992, certains progrès ont été enregistrés, notamment une réduction importante de l'utilisation des substances appauvrissant l'ozone, l'adoption accrue d'énergies renouvelables (de systèmes solaires et éoliens principalement) et l'introduction de nouveaux mécanismes comme le commerce du carbone et la certification de produits. Pourtant, cet ensemble d'indicateurs clés ne nous présente pas une image très positive. Sur le plan des changements climatiques, de la biodiversité, de la fonte des glaciers et des pêches, par exemple, la tâche reste énorme : traiter les causes profondes et inverser les tendances.

Pour pouvoir progresser en matière de durabilité environnementale, il est crucial de renforcer la gouvernance de l'environnement. Cet effort intersectoriel s'impose à tous les niveaux si l'on veut répondre rapidement et efficacement aux nouveaux défis écologiques et s'attaquer aux priorités convenues. On détecte certains signes positifs à cet égard, notamment dans la lutte contre l'érosion de la couche d'ozone, la création d'aires protégées et l'instauration de mécanismes commerciaux et de systèmes de certification, qui placent les questions d'environnement au cœur de la réflexion économique et de la prise de décision.

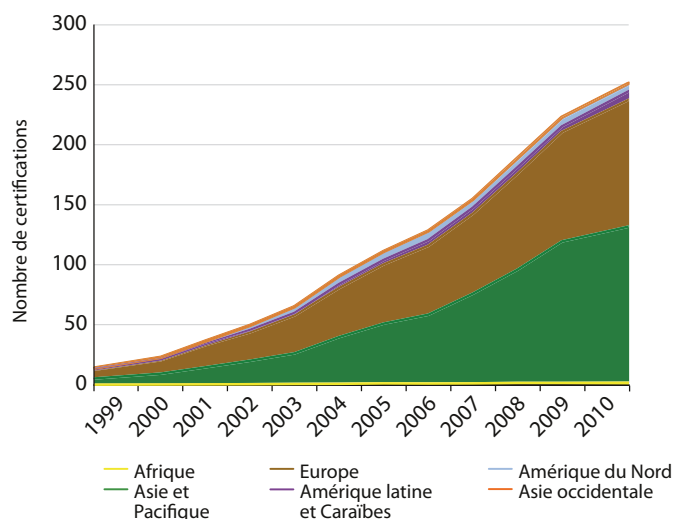


Figure 28 : Nombre de certifications de gestion de l'environnement ISO 14001, 1998-2010. Cette certification ISO est attribuée aux entreprises et organisations qui ont adopté des systèmes de gestion de l'environnement, conformément à leurs propres politiques de gestion. En 2010, on dénombrait plus de 250 000 certifications, les parts les plus importantes étant enregistrées dans la région Asie-Pacifique et en Europe. Source : ISO (2011)



Des progrès ont été faits depuis 1992 avec, entre autres, le recours accru aux énergies renouvelables et l'instauration de nouveaux mécanismes comme l'échange de quotas de carbone ou la certification de produits. *Photo: FSC - Allemagne*

données disponibles ou de carences au niveau de leur qualité, notamment faute de données régionales ou de résultats de suivis à long terme. Pour certaines questions, en l'absence de données actualisées, il n'a pas été possible de présenter de nouvelles informations.

Plusieurs initiatives et réseaux internationaux ont été lancés pour analyser les principaux indicateurs environnementaux et les problèmes sous-jacents liés à la disponibilité des données afin d'améliorer la situation. Il s'agit notamment des actions menées pour suivre les progrès vers les objectifs du Millénaire pour le développement (OMD), du Groupe sur l'observation de la Terre et son système des systèmes, des divers systèmes d'observation de la Terre, du Groupe de travail intersecrétariats sur les statistiques de l'environnement et bien d'autres encore. La Division des statistiques de l'ONU entreprend des efforts très concrets, en coopération avec le PNUE, pour « combler les lacunes dans les données environnementales » en recueillant auprès des pays, par le biais d'un questionnaire biennal, des données sur des questions environnementales en complément du travail déjà effectué par d'autres institutions internationales et en établissant un lien avec le renforcement des capacités en matière de collecte de données dans les régions en développement (**encadré 1**).

Ces interventions en faveur de la collecte des données aident dans une large mesure à maintenir l'environnement sous surveillance continue. L'*Annuaire du PNUE* continuera de fournir, chaque année, les dernières informations disponibles pour appuyer la prise de décisions et favoriser la détection rapide des tendances. Pour faciliter les références, un tableau contenant les principaux indicateurs et les statistiques les plus récentes est présenté à la fin de ce chapitre (**tableau 1**).

Encadré 1 : Le questionnaire UNSD/PNUE sur les statistiques environnementales

Ce questionnaire biennal permet de recueillir des données par pays sur des questions relatives à l'eau et aux déchets. Pour éviter tout double emploi, il est soumis aux pays ne répondant pas au Questionnaire commun OCDE/Eurostat et porte sur des questions d'environnement qui ne sont pas traitées par d'autres agences des Nations Unies ou organisations internationales.

Le dernier questionnaire (2010) a été envoyé à 172 pays et territoires. Au total, 87 pays (51 %) y ont répondu, parmi lesquels 5 ont indiqué ne pas disposer de données. Les meilleurs taux de réponse ont été obtenus en Europe de l'Est (79 %), aux Amériques (62 %) et en Asie (57 %). En Afrique, le taux de réponse a été de 44 % et aucune réponse n'a été obtenue en Océanie. Parmi les 82 pays ayant fourni des données, 66 ont soumis des statistiques sur les deux sections – eau et déchets – du questionnaire et 16 uniquement sur l'une de ces sections.

Après un processus rigoureux de validation fondé sur la qualité et la couverture géographique, l'UNSD a sélectionné certaines statistiques relatives à l'eau et aux déchets (complétées par des données OCDE/Eurostat), qu'elle publie dans les pages Indicateurs environnementaux et Profils de pays de son site Internet (UNSD 2012a, b). Les données complètes et notes de bas de page figurent dans la rubrique Dossiers de pays (UNSD 2012c). Le PNUE incorpore ces données, accompagnées d'agrégations régionales et sous-régionales, dans le portail GEO Data (PNUE 2012b). Certaines statistiques concernant la gestion de l'eau et des déchets sont également actualisées dans le point d'accès d'« Une seule ONU » (Nations Unies 2012).

Pour pouvoir dégager des tendances claires sur l'eau et les déchets aux niveaux mondial et régional, il est essentiel de disposer de statistiques fiables. Toutefois, la collecte de données sur ces deux secteurs demeure problématique, notamment en raison d'un manque de capacités dans les pays. Le prochain exercice de collecte de données environnementales UNSD/PNUE aura lieu en 2012.

Références

- AIE (2011a). Energy balances for OECD and non-OECD countries (édition 2011). Agence internationale de l'énergie, Paris. http://data.iaea.org/iaestore/product.asp?dept_id=101&pf_id=309
- AIE (2011b). Renewable Information (2011 edition). Agence internationale de l'énergie, Paris. http://data.iaea.org/iaestore/product.asp?dept_id=101&pf_id=309
- Bâle (2012). Convention sur le contrôle des mouvements transfrontières de déchets dangereux et de leur élimination. <http://www.basel.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesSignatories/tabid/1290/Default.aspx>
- Banque mondiale (2011). État et tendances du marché du carbone 2011. Washington, D.C
- Boden, T.A., Marland, G. et Andres, R.J. (2011). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/tre_coun.html
- Caldeira, K. et Wickett, M.E. (2003). Anthropogenic Carbon and Ocean pH. *Nature*, 425, 365
- Cartagena (2012). Protocole de Cartagena sur la prévention des risques biotechnologiques à la Convention sur la diversité biologique <http://bch.cbd.int/protocol/>
- CDB (2010). Une nouvelle ère de vie en harmonie avec la nature est née au Sommet de Nagoya. Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique, Montréal
- CDB (2012). Convention sur la diversité biologique. <http://www.biodiv.org/world/parties.asp>
- CCNUCC (2012). Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. http://unfccc.int/essential_background/convention/status_of_ratification/items/2631.php
- CITES (2012). Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction. <http://www.cites.org/eng/disc/parties/>
- CMS (2012). Convention sur la conservation des espèces migratrices appartenant à la faune sauvage. http://www.cms.int/about/part_1st.htm
- CNUDM (2012). Convention des Nations Unies sur le droit de la mer. http://www.un.org/Depts/los/reference_files/chronological_lists_of_ratifications.htm#The United Nations Convention on the Law of the Sea
- CNULCD (2012). Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification dans les pays les plus gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique. <http://www.unccd.int/convention/ratif/doeif.php>
- Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 847-855
- FAO (2010). Évaluation des ressources forestières mondiales 2010 (FRA). Principales conclusions. FAO, Rome.
- FAO (2011a). Situation mondiale des pêches et de l'aquaculture. FAO, Rome
- FAO (2011b). Département des pêches et de l'aquaculture : Collections statistiques mondiales. FAO, Rome. <http://www.fao.org/fishery/statistics/en>
- FAO (2011c). Base de données FAO Stat. FAO, Rome. <http://faostat.fao.org>
- Feely, R.A., Doney, S.C. et Cooley, S.R. (2009). Ocean Acidification: Present Conditions and Future Changes in a High-CO₂ World. *Oceanography*, 22(4), 36-47
- FSC (2012). Global FSC certificates. Conseil de protection des forêts. <http://www.fsc.org/facts-figures.html>
- Hoffmann, M., Hilton-Taylor C., Angulo A. et al. (2010). The Impact of Conservation on the Status of the World's Vertebrates. *Science*, 330(6010), 1503-1509
- ISO (2011). Étude ISO des certifications 2009. Organisation internationale de normalisation, Genève. http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/management_standards/certification/the_iso_survey.htm
- JRC/PBL (2010). Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.2. Joint Research Centre (JRC)/PBL Agence d'évaluation environnementale des Pays-Bas. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>
- Kyoto (2012). Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. http://unfccc.int/essential_background/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php
- Manney, G.L., Santee, M.L., Rex, M., Livesey, N.J., Pitts, M.C., Veefkind, P., Nash, E.R., Wohltmann, I., Lehmann, R., Froidevaux, L., Poole, L.R., Schoeberl, M.R., Haffner, D.P., Davies, J., Dorokhov, V., Gernandt, H., Johnson, B., Kivi, R., Kyrö, E., Larsen, N., Levelt, P.F., Makshtas, A., McElroy, C.T., Nakajima, H., Parrondo, M.C. et al. (2011). Unprecedented Arctic ozone loss in 2011. *Nature*, 478, 469-475
- Mekonnen, M.M. et Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1577-1600.
- Nations Unies (2012). « Une seule ONU » point de saisie des données (<http://data.un.org/>). Dernière consultation : 20 janvier 2012
- OMM (2009). 2000-2009, the warmest decade, Press release no. 869. Organisation météorologique mondiale. <http://reliefweb.int/node/336486>
- OMS (2006). Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air : particules, ozone, dioxyde d'azote et dioxyde de soufre. Mise à jour mondiale 2005. Synthèse de l'évaluation des risques.
- OMS (2011). Base de données sur la pollution atmosphérique dans les villes. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/
- OMS/UNICEF (2012). Programme conjoint de surveillance de l'eau et de l'assainissement <http://www.wsinfo.org/>
- Ozone (2012). Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone et son Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone (Ozone). http://ozone.unep.org/new_site/en/vienna_convention.php
- Patrimoine (2012). Convention concernant la protection du patrimoine mondial, naturel et culturel (Patrimoine mondial). <http://whc.unesco.org/en/statesparties/>
- PEFC (2012). Système de reconnaissance des certifications forestières : superficies forestières certifiées par pays. <http://www.pefc.org/resources/webinar/item/801>
- PlasticsEurope (2011). Plastiques 2010 : faits et chiffres. Analyse de la production, de la demande et de la valorisation des matières plastiques (mis à jour le 4 novembre 2011).
- PNUE (2010). *Fisheries Subsidies, Sustainable Development and the WTO*. Earthscan, Oxford. PNUE.
- PNUE (2011a). Production and Consumption of Ozone Depleting Substances under the Montreal Protocol. UNEP, Ozone Secretariat, Nairobi. http://ozone.unep.org/Data_Reporting/Data_Accss/
- PNUE (2011b). HFCs: A Critical Link in Protecting Climate and the Ozone Layer.
- PNUE (2011c). Keeping track of our changing environment: from Rio to Rio+20 (1992 to 2012).
- PNUE (2011d). Global Trends in Renewable Energy Investment 2011: Analysis in Trends and Issues in the Financing of Renewable Energy.
- PNUE (2011e). *Annuaire du PNUE 2011: Questions émergentes concernant notre environnement mondial*. PNUE, Nairobi
- PNUE (2012a). 21 Issues for the 21st Century: Result of the UNEP Foresight Process on Emerging Environmental Issues. Alcamo, J. et Leonard, S.A. (éd.).
- PNUE (2012b). GEO Data Portal (<http://geodata.grid.unep.ch>). Dernière consultation : 20 janvier 2012
- PNUE-GEMS/Eau (2011). GEMStat. Système mondial de surveillance continue de l'environnement pour les eaux. <http://www.gemstat.org/default.aspx>
- PNUE-WCMC (2011). Base de données mondiale sur les aires protégées. Centre mondial de surveillance continue de la conservation de la nature (PNUE-WCMC), Cambridge. <http://www.wdpa.org/Statistics.aspx>
- Ramsar (2012). Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau http://www.ramsar.org/cda/en/ramsar/about-parties-contracting-parties-in-201715/main/ramsar/1-36-123%E20715_4000_0_
- REN21 (2011). Rapport mondial sur les énergies renouvelables 2011. Réseau mondial de promotion des énergies renouvelables pour le XXI^e siècle, Paris
- Rotterdam (2012). Convention de Rotterdam sur la procédure de consentement préalable en connaissance de cause applicable à certains produits chimiques et pesticides qui font l'objet d'un commerce international. <http://www.pic.int/Countries/Parties/tabid/1072/language/en-US/Default.aspx>
- Stockholm (2012). Convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants. <http://www.pops.int/documents/signature/signstatus.htm>
- Tans, P. et Keeling, R. (2011). National Oceanic and Atmospheric Administration: Earth System Research Laboratory and Scripps Institute of Oceanography. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- UICN (2011). Liste rouge de l'UICN des espèces menacées (version 2010.4). Union internationale pour la conservation de la nature. <http://www.iucnredlist.org/about/summary-statistics>
- UNSD (2011). Environmental indicators: Waste. Division de statistique des Nations Unies, New York. <http://unstats.un.org/unsd/environment/municipalwaste.htm>
- UNSD (2012a). UNSD Environmental Indicators (<http://unstats.un.org/unsd/environment/qindicators.htm>). Dernière consultation : 20 janvier 2012
- UNSD (2012b). Country Snapshots webpage (http://unstats.un.org/unsd/environment/Questionnaires/country_snapshots.htm). Dernière consultation : 20 janvier 2012
- UNSD (2012c). Country Files webpage (<http://unstats.un.org/unsd/environment/Questionnaires/index.asp>). Dernière consultation : 20 janvier 2012
- US EPA (2012). Municipal Solid Waste (MSW) in the United States: Facts and Figures. Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/msw99.html>
- van Donkelaar, A., Martin, R.V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C. et Villeneuve, P.J. (2010). Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter
- Wada, Y., van Beek, L.P.H., van Kempen, C.M., Reckman, J.W.T.M., Vasak, S., et Bierkens, M.F.P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37
- WGMS (2008). *Global Glacier Changes: facts and figures*. Zemp, M., Roer, I., Kääb, A., Hoelzle, M., Paul, F. and Haeberli, W. (eds.). UNEP/World Glacier Monitoring Service, Zurich.
- WGMS (2011). Glacier mass balance data 1980-2010, World Glacier Monitoring Service, Zurich. <http://www.wgms.ch>

Tableau 1 : données relatives aux principaux indicateurs environnementaux

Indicateur clé	Année la plus récente	Monde	Afrique	Asie et Pacifique	Europe	Amérique latine et Caraïbes	Amérique du Nord	Asie occidentale	Unité de mesure
Consommation de substances appauvrissant la couche d'ozone	2010	43 292	2 559	29 971	103	5 199	2 165	3 295	millions de tonnes de potentiel d'appauvrissement
Émissions d'HFC – tous les gaz	2008	651 748	2 146	237 395	140 251	14 882	255 602	1 471	gigagrammes
Émissions de dioxyde de carbone	2008	32,11	1,14	13,69	6,61	1,65	6,01	1,04	milliards de tonnes de CO ₂
Émissions de dioxyde de carbone par habitant	2008	4,8	1,2	3,5	8,0	2,9	17,4	8,3	tonnes de CO ₂ par habitant
Évolution nette du couvert forestier	2005-2010	5,6	-3,4	0,5	0,9	-3,9	0,4		millions d'hectares par an
Aires protégées pour le maintien de la biodiversité par rapport à la superficie	2010	12,0	10,1	9,9	10,2	19,3	9,5	17,1	pourcentage de la superficie territoriale
Collecte des déchets municipaux	2000-2007			271,2	537,9	130,8		20,2	millions de tonnes
Empreinte hydrique par habitant de la production nationale – bleue	1996 -2005	167	94	181	109	110	380	345	m ³ par an par personne
Empreinte hydrique par habitant de la production nationale – verte	1996 -2005	1 087	1 167	780	1 259	1 924	2 689	426	m ³ par an par personne
Accès à une installation d'assainissement	2010	61,0	39,9	57,4	90,9	80,1	100,0	78,3	pourcentage de la population totale
Nombre de certifications ISO 14001	2010	251 000	1 700	131 700	103 700	7 231	5 500	1 200	nombre de certifications

Commerce des espèces 2010 Nombre d'animaux sauvages (millions)	
Individus nés et élevés en captivité	321,2
Individus sauvages	344,5

Indice d'approvisionnement en énergies renouvelables 2009 (1990 = 100)	
Solaire (photovoltaïque)	86 650
Solaire (thermique)	674
Éolien	7 033
Biocarburants - bio-essence et bio-gazole	6 347

Approvisionnement en énergies primaires 2009 Équivalent pétrole (milliards de tonnes)	
Pétrole brut et matières premières	4,10
Charbon et produits du charbon	3,30
Gaz	2,54
Combustibles renouvelables et déchets	1,24
Nucléaire	0,70
Hydraulique	0,28
Géothermique	0,06
Solaire/éolien/autre	0,04
Approvisionnement total	12,26

Accords multilatéraux sur l'environnement 2011 Nombre de Parties	
Bâle	176
Cartagena	161
CDB	193
CITES	175
CMS	116
Patrimoine	188
Kyoto	192
Ozone	196
Ramsar	160
Rotterdam	142
Stockholm	176
Désertification	193
Droit de la mer	162
Changements climatiques	195

Remerciements

Faits saillants de l'année



Auteurs :

Sarah Abdelrahim, PNUE, Nairobi (Kenya)

Tessa Goverse, PNUE, Nairobi (Kenya)

Réviseurs :

Susanne Bech, ONU-Habitat, Nairobi (Kenya)

Sophie Bonnard, PNUE, Paris (France)

John Christensen, Centre Riso de PNUE sur l'énergie, le climat et le développement durable, Roskilde (Danemark)

Anna Donners, PNUE, Nairobi (Kenya)

Robert Höft, Convention sur la diversité biologique, Montréal (Canada)

Ben Janse van Rensburg, Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction, Genève (Suisse)

Sunday Leonard, PNUE, Nairobi (Kenya)

Julie Marks, PNUE, Genève (Suisse)

Richard Munang, PNUE, Nairobi (Kenya)

Martina Otto, PNUE, Paris (France)

Pascal Peduzzi, PNUE, Genève (Suisse)

Mark Radka, PNUE, Paris (France)

Andrea Salinas, PNUE, Panama (Panama)

John Scanlon, Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction, Genève (Suisse)

Muralee Thummarukudy, PNUE, Genève (Suisse)

Frank Turyatunga, PNUE, Nairobi (Kenya)

Kaveh Zahedi, PNUE, Paris (France)

Jinhua Zhang, PNUE, Bangkok (Thaïlande)

Les effets bénéfiques du carbone du sol



Auteurs :

Reynaldo Victoria (chair), Université de São Paulo, São Paulo (Brésil)

Steven Banwart, University of Sheffield, Sheffield (Royaume-Uni)

Helaina Black, James Hutton Institute, Aberdeen (Royaume-Uni)

John Ingram, Environmental Change Institute, Oxford University Centre for the Environment, Oxford (Royaume-Uni)

Hans Joosten, Institut de botanique et d'écologie des paysages, Université Ernst-Moritz-Arndt de Greifswald, Greifswald (Allemagne)

Eleanor Milne, Colorado State University/University of Leicester, Leicester (Royaume-Uni)

Elke Noellemeyer, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, La Pampa (Argentine)

Rédacteur scientifique :

Yvonne Baskin, Bozeman (États-Unis)

Réviseurs :

Asma Ali Abahussain, Université arabe du Golfe, West Riffa (Royaume de Bahreïn)

Mohammad Abido, Université de Damas (Syrie)

Niels Batjes, ISRIC – Système mondial d'information sur les sols, Wageningen (Pays-Bas)

Martial Bernoux, Institut de recherche pour le développement, Montpellier (France)

Zucong Cai, Université de Nanjing, Nanjing (Chine)

Carlos Eduardo Cerri, Université de São Paulo, São Paulo (Brésil)

Salif Diop, PNUE, Nairobi (Kenya)

Roland Hiederer, Centre commun de recherche de la Commission européenne, Ispra (Italie)

Jason Jabbour, PNUE, Nairobi (Kenya)

Nancy Karanja, University of Nairobi, Nairobi (Kenya)

Fatoumata Keita-Ouane, PNUE, Nairobi (Kenya)

Rattan Lal, Ohio State University, Columbus (États-Unis)

Newton La Scala Jr., Universidade Estadual Paulista, São Paulo (Brésil)

Erika Michéli, Université Szent István, Godollo (Hongrie)

Budiman Minasny, University of Sydney, Sydney (Australie)

Patrick M'mayi, PNUE, Nairobi (Kenya)

Bedrich Moldan, Université Charles, Centre pour l'environnement, Prague (République tchèque)

Luca Montanarella, Centre commun de recherche de la Commission européenne, Ispra (Italie)

Walter Alberto Pengue, Universidad Nacional de General Sarmiento, Buenos Aires (Argentine)

Jörn Scharlemann, PNUE-WCMC, Cambridge (Royaume-Uni)

Mary Scholes, University of the Witwatersrand, Johannesburg (Afrique du Sud)

Darrell Schulze, Purdue University, West Lafayette (États-Unis)

Gemma Shepherd, PNUE, Nairobi (Kenya)

Steve Twomlow, PNUE, Nairobi (Kenya)

Ronald Vargas Rojas, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome (Italie)

Ernesto F. Viglizzo, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, La Pampa (Argentine)

Fermeture et démantèlement de centrales nucléaires



Auteurs :

Jon Samseth (chair), SINTEF Matériaux et Chimie, Université norvégienne des sciences et technologies, HIOA, Trondheim (Norvège)

Anthony Banford, University of Manchester, Manchester (Royaume-Uni)

Borislava Batandjieva-Metcalf, Bureau de conseil Borislava Batandjieva, Vienne (Autriche)

Marie Claire Cantone, Université de Milan, Milan (Italie)

Peter Lietava, Département de la gestion des déchets radioactifs et du combustible usé, Service national de sûreté nucléaire, Prague (République tchèque)

Hooman Peimani, Energy Studies Institute, National University of Singapore (Singapour)

Andrew Szilagyi, U.S. Department of Energy, Washington, DC (États-Unis)

Rédacteur scientifique :

Fred Pearce, Londres (Royaume-Uni)

Réviseurs :

John Ahearne, Sigma Xi, Research Triangle Park (États-Unis)

Attila Aszódi, Institut des technologies nucléaires, Université des technologies et de l'économie de Budapest, Budapest (Hongrie)

Yasmin Aziz, PNUE, Washington (États-Unis)

Malcolm Crick, Comité scientifique des Nations Unies sur les effets des rayonnements atomiques, Vienne (Autriche)

Sascha Gabizon, Femmes en Europe pour un avenir commun, Munich (Allemagne)

Bernard Goldstein, Graduate School of Public Health, University of Pittsburgh, Pittsburgh (États-Unis)

José Luis González Gómez, Empresa Nacional de Residuos Radiactivos, Madrid (Espagne)

Christina Hacker, Institut pour l'environnement de Munich, Munich, Allemagne

Peter Kershaw, Centre for Environment, Fisheries and Aquaculture Science, Lowestoft (Royaume-Uni)

Michele Laraia, Agence internationale de l'énergie atomique, Vienne (Autriche)

Sunday Leonard, PNUE, Nairobi (Kenya)

Con Lyras, Australian Nuclear Science and Technology Organisation, Kirrawee (Australie)

Oleg Nasvit, Institut national d'études stratégiques (sous l'égide du président de l'Ukraine), Kiev (Ukraine)

Charles Negin, Project Enhancement Corporation, Germantown (États-Unis)

Hartmut Nies, Agence internationale de l'énergie atomique (Monaco)

Thiagan Pather, National Nuclear Regulator, Centurion (Afrique du Sud)

Nora Savage, U.S. Environmental Protection Agency, Washington (États-Unis)

Ashbindu Singh, PNUE, Washington (États-Unis)

Anita Street, U.S. Department of Energy, Washington (États-Unis)

Principaux indicateurs environnementaux



Auteurs :

Márton Bálint, Budapest (Hongrie)

Andrea de Bono, PNUE/GRID-Europe, Genève (Suisse)

Tessa Goverse, PNUE, Nairobi (Kenya)

Jaap van Woerden, PNUE/GRID-Europe, Genève (Suisse)

Réviseurs et collaborateurs :

Barbara Clark, Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (Danemark)

Anna Donners, PNUE, Nairobi (Kenya)

Hans-Martin Füssel, Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (Danemark)

Kelly Hodgson, Programme des Nations Unies pour l'environnement-Système mondial de surveillance continue de l'environnement /Programme Eau, Burlington (Canada)

Robert Höft, Convention sur la diversité biologique, Montréal (Canada)

Eszter Horvath, Division de statistique des Nations Unies, New York (États-Unis)

Rolf Luyendijk, UNICEF, New York (États-Unis)

Roberta Pignatelli, Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (Danemark)

Richard Roberts, Programme des Nations Unies pour l'environnement-Système mondial de surveillance continue de l'environnement/Programme Eau, Burlington (Canada)

Reena Shah, Division de statistique des Nations Unies, New York (États-Unis)

Marcos Silva, Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction, Genève (Suisse)

Ashbindu Singh, PNUE, Washington (États-Unis)

John van Aardenne, Agence européenne pour l'environnement, Copenhague (Danemark)

Frank van Weert, Centre international d'évaluation des ressources en eaux souterraines, Delft (Pays-Bas)

Michael Zemp, World Glacier Monitoring Service, Zurich (Suisse)

Photos de l'Annuaire 2011 :

Márton Bálint, Arbre avec branches

JJ Cadiz, Oiseau

Harvey Croze, Wangari Maathai

United States Geological Survey, Navire de surveillance

Ron Prendergast, Tortue mangeant un sac

National Aeronautics and Space Administration, Cyclone

National Aeronautics and Space Administration, Planète

Équipe de production de l'Annuaire du PNUE 2012

Rédacteur-en-chef :

Tessa Goverse, PNUE, Nairobi, (Kenya)

Équipe de projet :

Sarah Abdelrahim, **Peter Gilruth**, **Tessa Goverse**, **David Kimethu**, **Christian Lambrechts**, **Brigitte Ohanga**, PNUE, Nairobi (Kenya), **Márton Bálint**, Budapest (Hongrie)

Contrôle rédactionnel :

John Smith, Austin (États-Unis)

Centre collaborateur (questions émergentes) :

Véronique Plocq-Fichelet et **Susan Etienne Greenwood**, Comité scientifique sur les problèmes de l'environnement (SCOPE), Paris (France)

Réviseur scientifique (questions émergentes) :

Paul G. Risser, University of Oklahoma, Norman (États-Unis)

Graphiques et images :

Márton Bálint, Budapest, Hongrie, **Audrey Ringler**, PNUE, Nairobi (Kenya) (maquette couverture)

Collaborateur spécial :

Nick Nuttall, PNUE, Nairobi (Kenya)

Questionnaire

Vous pouvez aussi faire part de vos observations à l'adresse suivante :

www.unep.org/yearbook/2012

Nous vous serions reconnaissants de bien vouloir consacrer quelques minutes à ce questionnaire. Vos commentaires nous aideront à améliorer les futures éditions de l'Annuaire du PNUE. L'édition 2012 présente les dernières découvertes scientifiques et des questions nouvelles importantes concernant notre environnement en mutation. L'Annuaire du PNUE est produit par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) en collaboration avec des experts en environnement du monde entier.

1. L'information a-t-elle été clairement présentée dans chacun des chapitres de l'Annuaire?

	Très clairement	Clairement	Pas très clairement	Pas clairement du tout	Pas d'opinion
Faits saillants de l'année					
Les effets bénéfiques du carbone du sol					
Fermeture et démantèlement de centrales nucléaires					
Principaux indicateurs environnementaux					
Autres observations sur le contenu des chapitres:					

	Très intéressante	Intéressante	Pas très intéressante	Pas intéressante du tout	Pas d'opinion
Faits saillants de l'année					
Les effets bénéfiques du carbone du sol					
Fermeture et démantèlement de centrales nucléaires					
Principaux indicateurs environnementaux					
Autres observations sur le contenu des chapitres :					

3. Aidez-nous à préparer la prochaine édition de l'Annuaire en suggérant certaines questions nouvelles qui mériteraient d'y être traitées.

--

4. Informations personnelles (facultatif) :

Type d'organisation :	Fonction :	Quel usage comptez-vous faire de l'information de l'Annuaire?	Indiquez votre région :
Gouvernementale	Ministre/Secrétaire général	Intérêt personnel	Asie occidentale
Aide au développement	Directeur	Commercial	Amérique du Nord
Non gouvernementale/société civile	Conseiller	Recherche/études universitaires	Europe
Universitaire/recherche	Scientifique/spécialiste	Élaboration de politiques	Asie et Pacifique
Internationale	Étudiant	Éducation/enseignement	Afrique
Secteur privé	Journaliste	Activités de développement	Amérique latine et Caraïbes
Presse ou média	Consultant		
Autre (préciser) :	Autre (préciser) :	Autre (préciser) :	

Veuillez envoyer vos réponses à l'une des adresses suivantes : Programme des Nations Unies pour l'environnement, P. O. Box 30552, 00100 Nairobi (Kenya) ou : year.book@unep.org