



Avant



Après

# L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : UNE OPTION FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE ?

Cette brochure présente les interventions effectuées le 15 décembre 2014 dans les locaux d'AgroParisTech à Paris lors du 8<sup>e</sup> colloque du Groupe des acteurs de l'Ingénierie écologique (Gaié), organisé en partenariat avec l'Institut d'Écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), Natureparif et le GIS Climat-Environnement-Société. Elle a été réalisée par Natureparif, dont vous pouvez retrouver l'ensemble des publications sur [www.natureparif.fr/connaitre/publications](http://www.natureparif.fr/connaitre/publications).

Pour connaître le programme des Rencontres organisées par Natureparif : consultez [www.natureparif.fr/fr/manifestations/rencontres](http://www.natureparif.fr/fr/manifestations/rencontres) ou inscrivez-vous à notre newsletter [www.natureparif.fr/fr/publications/newsletters](http://www.natureparif.fr/fr/publications/newsletters)

---

Réalisation : Gilles Lecuir et Marc Barra, Natureparif

Retranscription : Laurent Bonnafous | 06 98 51 83 00

Crédits photos : les intervenants et leur structure (sauf mention), couverture : SiAH, réouverture d'une rivière urbaine à Sarcelles (95).

Mise en Page : Frédérique Piegad | [frederique.piegad@gmail.com](mailto:frederique.piegad@gmail.com) | 06 23 28 92 01

Édition réalisée dans le cadre des activités de Natureparif, agence régionale pour la Nature et la biodiversité en Île-de-France, dirigée par Julie Collombat-Dubois et présidée par Liliane Pays, Présidente (et donc directrice de la publication).

Paris, novembre 2015.

# Sommaire

## PRÉSENTATION DES PARTENAIRES DU COLLOQUE

- Nathalie FRASCARIA-LACOSTE, Laboratoire d'écologie, systématique et évolution (ESE), université Paris-Sud  
présidente du Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique (Gaié)  
Sébastien BAROT, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris),  
Institut de recherche pour le développement (IRD), secrétaire de Gaié  
Chantal PACTEAU, directrice adjointe du Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société (GIS CES),  
Centre national de la recherche scientifique (CNRS)  
Marc BARRA, écologue, Natureparif ..... 4

## CONFÉRENCES INTRODUCTIVES

### Changement climatique, les enjeux et les voies de l'adaptation

- Alexia LESEUR, Chef de pôle recherche Actions Climatiques Territoriales, CDC Climat ..... 8

### La rétroaction des organismes sur le changement climatique : définition de l'ingénierie écologique

- Luc ABBADIE, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris),  
université Pierre et Marie Curie ..... 11

## EAU, SOLS ET FORÊTS

### Séquestration du carbone et usage durable des terres en savane ouest-africaine : synergie ou antagonisme ?

- Raphaël MANLAY, équipe Gestion environnementale des écosystèmes et forêts tropicales (GEFFT),  
AgroParisTech, Montpellier ..... 15

### Ingénierie écologique et autres moyens contre les proliférations de cyanobactéries dans les écosystèmes aquatiques continentaux

- Jean-François HUMBERT, Institut national de la recherche agronomique (INRA) ..... 16

### La migration assistée comme stratégie d'adaptation pour les socio-écosystèmes forestiers : anticipation ou manipulation ?

- Roxane SANSILVESTRI, équipe Trajectoires écologiques et société (TEES), Laboratoire d'écologie,  
systématique et évolution (ESE), université Paris-Sud ..... 19

## INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET MILIEUX URBAINS

### De l'ingénierie technique à l'ingénierie écologique : applications dans les villes

- Marc BARRA Natureparif, agence régionale pour la nature et la biodiversité en Île-de-France..... 21

### Toitures végétalisées et espaces verts pour la lutte contre les îlots de chaleur en milieu urbain

- Laura ALBARIC, Observatoire départemental de la biodiversité urbaine (ODBU) et  
Stephan GREGORIUS, Direction de l'Eau et de l'Assainissement, Conseil départemental de Seine-Saint-Denis..... 24

### Multifonctionnalité des écosystèmes urbains dans la lutte contre le changement climatique

- Jean-Christophe LATA, Institut d'écologie des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris),  
université Pierre et Marie Curie ..... 26

## RÉGLEMENTATION

### Cadre réglementaire en sciences pour l'utilisation des organismes en ingénierie écologique

- Jean-Patrick LE DUC, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) ..... 28

## CLIMAT, ART ET BIODIVERSITÉ

### L'exemple du prix COAL Art et Environnement

- Alice AUDOUIN, présidente d'Art of Change 21 ..... 30

## TABLE-RONDE ..... 33

# PRÉSENTATION DES PARTENAIRES DU COLLOQUE

*Organisée autour d'une charte d'objectifs qui lie ses adhérents, l'association Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique (Gaié) est née en 2012. Elle regroupe des acteurs de l'ingénierie écologique venus de tous horizons et vise à promouvoir le savoir et les techniques de l'ingénierie écologique.*

*L'Institut d'écologie et des sciences de l'Environnement (iEES Paris) regroupe des laboratoires de recherche en écologie autour d'objectifs de modélisation et de sciences de l'environnement prédictives.*

*Le groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-société rassemble quant à lui de nombreux laboratoires des domaines de la recherche climatique, mais aussi des sciences de l'environnement et des sciences humaines, pour étudier le changement climatique et ses impacts humains sur un mode transdisciplinaire. Il soutient et anime en ce sens de nombreux programmes de recherche au niveau local, national et international.*

*Natureparif est l'agence francilienne pour la nature et la biodiversité : elle assure un travail de veille sur l'état de la biodiversité en Île-de-France, favorise les prises de décisions favorables à son renforcement et joue enfin un rôle d'information publique sur ces thématiques.*

*Ces quatre organismes se sont réunis pour organiser le présent colloque portant sur les liens actuels et potentiels entre l'ingénierie écologique et le changement climatique.*

---

## Nathalie FRASCARIA-LACOSTE

Laboratoire d'écologie, systématique et évolution (ESE), université Paris-sud, présidente du Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique (Gaié)

**G**aié est une association regroupant des personnes physiques et morales et œuvre pour l'émergence de l'ingénierie écologique en associant les porteurs d'innovations aux chercheurs scientifiques et non scientifiques, aux étudiants, aux décideurs et aux praticiens. Gaié vise à utiliser tous les moyens légaux pour favoriser la connaissance et la reconnaissance de l'ingénierie écologique, qui se développe en France depuis quelques années, et organise l'échange des savoirs (notamment entre opérations de terrain et recherche scientifique) entre ses membres et ses partenaires en France et l'étranger.

Gaié est membre du réseau français AIGECO notamment aux côtés du réseau REVER et de l'AFIE, organise une veille réglementaire et juridique, et agit en tant que force de proposition auprès des autorités publiques en France, dans le cadre de la mise en place de la filière du génie écologique. L'échange d'information entre les membres fait appel à des formules telles que ce colloque, mais aussi à d'autres moyens de communication visant à relier actions de terrain et recherche : liste de discussion, participation à des commissions techniques, mise en ligne d'un site Internet, organisation de sessions de formation, veille réglementaire. L'association Gaié est constamment ouverte à de nouvelles adhésions de

personnes physiques et morales pour asseoir sa représentativité et pour partager prises de relais et expériences, mais aussi pour se financer. L'adhésion concerne des personnes liées professionnellement à l'ingénierie écologique et suppose la signature d'une charte d'objectifs.

## Sébastien BAROT

Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), Institut de recherche pour le développement (IRD), secrétaire de Gaié

**L'**Institut d'écologie et des sciences de l'Environnement - iEES Paris - regroupe environ 210 personnes dont 153 chercheurs, enseignants, techniciens, ingénieurs et administratifs, organisés en 13 équipes de recherche et 4 départements scientifiques. Ses objectifs généraux consistent à analyser et modéliser l'organisation, le fonctionnement et l'évolution des systèmes écologiques pour une écologie et des sciences de l'environnement prédictives, à contribuer à l'innovation en gestion durable de la biodiversité, des écosystèmes et des ressources biologiques et à l'élaboration des stratégies d'adaptation aux changements planétaires et à former aux avancées récentes de l'écologie, des

sciences de l'environnement et de l'ingénierie écologique. En matière d'ingénierie écologique, iEES Paris étudie les moyens d'orienter le fonctionnement de systèmes écologiques naturels et artificiels dans le but d'en améliorer les performances et la durabilité. Il élabore des indicateurs de qualité de ces systèmes dans une perspective d'aide à la décision et d'évaluation de la pertinence de leurs modes de gestion. Les recherches portent essentiellement sur le vivant et la biodiversité en tant que déterminants majeurs des caractéristiques de l'environnement.

## Chantal PACTEAU

Centre national de la recherche scientifique (CNRS), directrice adjointe du Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société<sup>1</sup>

Le GIS Climat-Environnement-Société a été créé en 2007 avec l'objectif de développer et de renforcer les recherches interdisciplinaires autour des mécanismes impliqués dans l'évolution du climat et les conséquences de cette évolution sur l'environnement et la société ; il s'agissait aussi de renforcer la visibilité nationale et internationale des recherches dans le domaine et d'être un point focal d'expertise en matière de politique d'atténuation et d'adaptation au changement climatique (CC). Le GIS est né d'un accord entre organismes de recherche (CNRS et CEA), universités (Paris 6 et Versailles Saint-Quentin,) l'X et l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), sous l'égide du ministère de la Recherche et celui de l'Environnement. .

Ses missions, le GIS les mène en s'appuyant sur dix-sept laboratoires franciliens, allant des sciences du climat aux sciences humaines et sociales, en passant par les sciences du vivant (santé et écologie<sup>2</sup>). Outre les projets interdisciplinaires qu'il a lancés, le GIS s'est considérablement investi dans l'animation scientifique, identifiée comme un outil essentiel, un « lieu de rencontre » pour faire émerger de nouvelles idées et motiver des projets transversaux. Plusieurs outils ont été mis en œuvre : séminaires, conférences et ateliers de recherche, papiers concepts, soutien de projets « en incubation »...

Parmi les projets soutenus par le GIS, ceux dédiés aux interactions entre CC, biodiversité et fonctionnement des écosystèmes ont permis de mieux comprendre et de modéliser les impacts du CC, par exemple, sur la

dynamique du carbone dans les sols agricoles ou encore sur la répartition spatiale des espèces et la gestion des forêts...

Le GIS a aussi soutenu des projets sur les questions climatiques en milieu urbain. Le projet *Climat et trames vertes* a mobilisé des chercheurs en sciences sociales, sciences de l'atmosphère et écologie afin d'examiner les relations entre les espaces verts urbains et l'adaptation au CC (adaptation des modèles atmosphériques pour l'étude des interactions climat-végétation ; rôle des interactions sol-plante dans le climat urbain...). Ce projet a aussi permis de confronter les points de vue des chercheurs avec ceux des praticiens et des citoyens.

Avec le projet « *Toit urbain : défis climatiques, énergétiques et écosystémiques d'un nouveau territoire* »<sup>3</sup>, publié aux Presses universitaires de Laval (2015), la question posée était celle de savoir si cet « épiderme aérien des villes » (*Roofscape*) pouvait contribuer à formuler des réponses d'atténuation et d'adaptation au CC (toits végétalisés, toits blancs...) et à résoudre des problèmes nécessitant le rétablissement d'un lien fort avec la nature, comme par exemple, la restauration de la biodiversité. Les contextes de trois villes - Chicago, Montréal et Paris - ont été interrogés. *Roofscape* a permis co-construire des passerelles entre recherche et stratégies d'aménagement. Il a aussi permis, dans un contexte d'engagement croissant des villes dans la lutte contre le CC et en faveur de la biodiversité, de co-organiser avec les autorités locales des symposiums internationaux à Paris et Montréal, ou encore des forums, comme celui de Montréal qui a réuni près d'une centaine d'intervenants de tous horizons (chercheurs, architectes, autorités locales, acteurs associatifs, législateurs...).

Ce chantier urbain a amené le GIS à participer à des comités d'organisation tels que celui du sommet mondial de la ville durable (Écocity 2013, Nantes), ou encore à contribuer à des synthèses sur la question des villes face au CC, en France pour l'ouvrage de l'ONERC *Villes et adaptation au changement climatique* (2009) ; ou dans le monde entier pour le *Second UCCRN Assessment Report on Climate Change and Cities*, réalisé par l'*Urban Climate Change Research Network*, dont le résumé aux décideurs a été lancé au Sommet des élus locaux pour le climat à Paris le 4 décembre 2015, pendant la COP21.

<sup>1</sup> <http://www.gisclimat.fr>

<sup>2</sup> Les laboratoires d'écologie membres du GIS, iEES et l'ESE, sont partenaires de Gaié.

<sup>3</sup> Lancé par le ministère français de la culture dans le cadre du programme *Ignis mutat res* - 2011-2015 - en partenariat avec le ministère de l'écologie et l'Atelier international du Grand Paris, et coordonné par l'université du Québec à Montréal.

## Marc BARRA

écologue, Natureparif

Créée en 2008, Natureparif est l'une des premières agences régionales entièrement dédiées à la nature et à la biodiversité. L'agence joue un rôle d'observatoire régional francilien de la biodiversité, publie des états des lieux depuis 2010 et s'efforce de prendre désormais en compte la dynamique fonctionnelle des écosystèmes franciliens. Natureparif vise par ailleurs à évaluer les interventions des acteurs du territoire (entreprises, collectivités, etc.) et de les tourner vers des pratiques plus favorables à la biodi-

versité. Enfin, l'agence joue un rôle de communication et de pédagogie vis-à-vis d'acteurs dont l'écologie n'est pas le métier.

Natureparif s'efforce de faire le lien entre la recherche en ingénierie écologique et les acteurs susceptibles de se saisir de ces nouveaux moyens d'action. Aux côtés des chercheurs, l'agence s'efforcera de faire en sorte que les sciences de l'écologie soient prises en compte fin 2015 dans le cadre des négociations climatiques de la COP 21. Natureparif prévoit donc de promouvoir tout au long de l'année, et dès le présent colloque, les solutions s'appuyant sur le vivant pour l'adaptation au changement climatique, voire pour son atténuation.



Le changement climatique affectera tout le territoire français, en ville, sur le littoral et en montagne, en raison du réchauffement de la température moyenne et de la modification du régime des précipitations. Les sécheresses seront plus importantes et le régime des fleuves sera modifié.

# CHANGEMENT CLIMATIQUE, LES ENJEUX ET LES VOIES DE L'ADAPTATION

---

*Alors que les enjeux globaux du changement climatique sont précisés par les rapports successifs du GIEC, ses effets s'expriment de façon locale par des phénomènes tels que la hausse du niveau de la mer, l'augmentation des pics de chaleur et la variation des précipitations, qui s'accroîtront à l'avenir. Le cycle de l'eau, la production agricole et les conditions de vie urbaines sont et seront ainsi affectées dans de nombreuses régions du monde. L'adaptation au changement climatique nécessite une gouvernance adaptée permettant de faire évoluer les systèmes économiques et financiers, ainsi que la planification des politiques publiques, en permettant d'investir dès aujourd'hui pour minimiser les coûts d'adaptation et renforcer la résilience des écosystèmes. Pour cela, il est possible, en faisant appel au savoir scientifique, de faire appel à des solutions « dures » mais aussi aux solutions « douces » s'appuyant sur le vivant, qui doivent être évaluées. Pour cela, le recours à l'analyse économique peut apporter des outils. CDC Climat est une filiale de la Caisse des dépôts et consignations consacrée à l'économie du changement climatique et de la transition énergétique. Elle vient en particulier de rendre en 2014 une étude sur l'intérêt économique et multifonctionnel de la végétalisation des villes.*

---

**Alexia LESEUR** Chef de pôle recherche Actions Climatiques Territoriales, CDC Climat

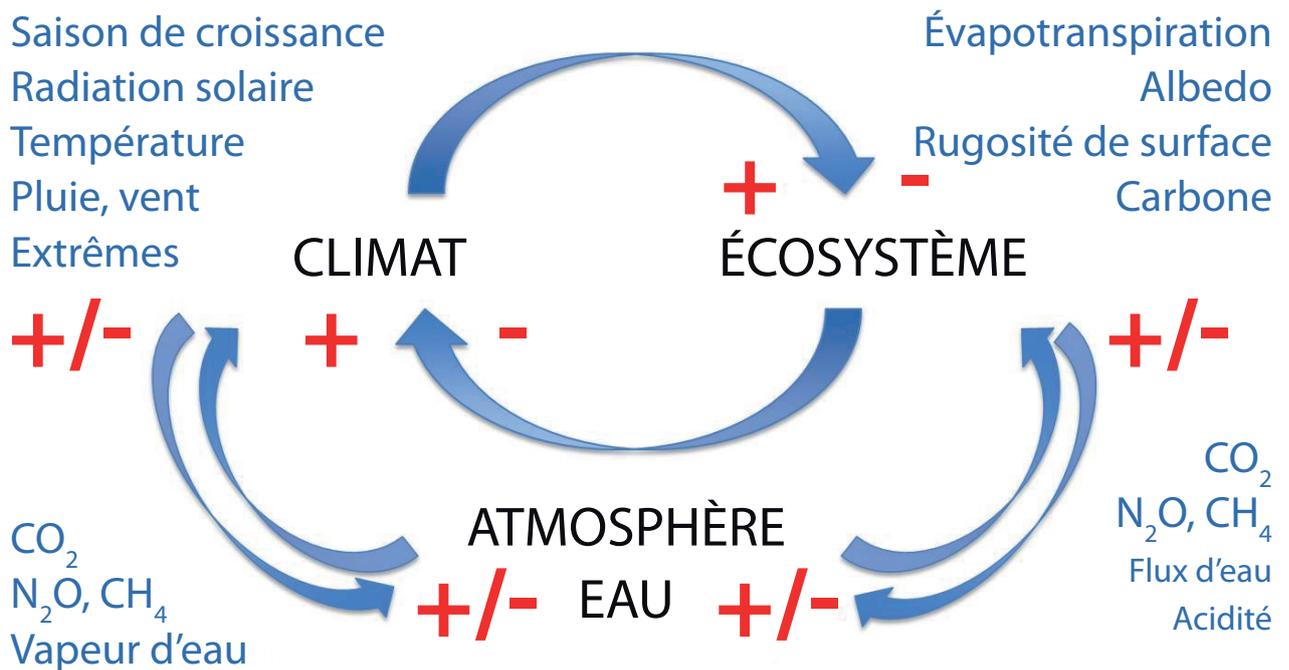
**C**DC Climat est une filiale à 100 % de la Caisse des Dépôts et est entièrement consacrée à l'économie du changement climatique et de la transition énergétique. Ses services de recherche sont répartis en trois pôles : marchés du carbone et de l'énergie, investissement climat et aide à la décision, actions climatiques territoriales.

La conférence des parties de Lima s'est conclue par un accord obtenu à l'arrachée, et les pays en développement ont au cours de la négociation mis en avant la question de l'aide à l'adaptation au changement climatique aux côtés des dispositifs d'atténuation. L'adaptation au changement climatique est une problématique locale, et c'est dans ce contexte que la CDC Climat vient de terminer une étude sur la place et les rôles du végétal en ville, mais aussi sur l'organisation et le montage de projets en la matière. L'enjeu consiste à conjuguer actions d'atténuation et d'adaptation.

Le GIEC rend un rapport mondial tous les sept ans, le cinquième venant d'être publié. Chacun possède trois parties consacrées aux avancées de la science du climat, aux impacts et adaptations au changement climatique, et aux scénarios socio-économiques d'atténuation. La température moyenne du globe a augmenté de 0,75 °C en un siècle, avec une accéléra-

tion très rapide depuis 1950 (les extrêmes pouvant être beaucoup plus importants). Le niveau de la mer a augmenté en moyenne de 19 cm sur le dernier siècle, ce qui est conséquent, et la probabilité de la responsabilité humaine de ce réchauffement est de 95 %. Les températures ont très fortement augmenté depuis l'ère industrielle, et le réchauffement atmosphérique devrait selon les scénarios RCP être contenu entre 1 °C et 3,7 °C en moyenne en 2100 par rapport à 2005, la hausse moyenne du niveau des mers devant être comprise entre 40 et 63 cm. Ces changements sont beaucoup plus rapides que ceux connus par la Terre dans le passé. Les variations de température seront particulièrement importantes sur les pôles.

Les écosystèmes terrestres et marins sont d'ores et déjà touchés et le seront davantage au fil du réchauffement. Le cycle de l'eau est affecté (fonte des glaciers, raréfaction de la ressource), tout comme les systèmes agricoles et la fréquence des événements extrêmes. Les sécheresses seront accrues autour de l'Équateur et renforceront les problèmes de stress hydrique des plantes et de pollution agricole, qui sont déjà très importants. Les ressources hydriques augmenteront au contraire près des pôles, compte tenu du dégel des glaces et du permafrost. L'intensité des ouragans sera



Au niveau local et global, les interactions entre écosystèmes, climat et atmosphère sont multiples et très complexes.

aussi en hausse en Amérique centrale et les risques d'inondation seront accrus au nord de l'Europe, dans une partie de l'Afrique et en Asie. Les rendements agricoles devraient diminuer dans de nombreuses régions et les cartes de répartitions de plusieurs maladies sont appelées à évoluer. Plusieurs types d'écosystèmes sont menacés et la répartition de la production halieutique sera modifiée.

L'adaptation au changement climatique suppose des systèmes de gouvernance adaptés et le développement de systèmes économiques et financiers permettant d'investir, ce qui constitue des avantages pour les pays les plus développés. Les conséquences seront importantes en France. Les grandes villes seront très sensibles au changement climatique en raison des vagues de chaleur et des inondations. En montagne, les domaines skiables se réduiront et les risques érosifs et d'éboulements seront en hausse. Les littoraux connaîtront des risques d'inondation et d'érosion accrus. Les températures augmenteront beaucoup dans le sud de la France, où les sécheresses seront plus nombreuses. La pluviométrie augmentera dans le nord du pays. Les crues fluviales seront plus fortes, ce qui crée notamment des risques pour les centrales nucléaires et l'industrie en général.

Les scénarios socio-économiques permettent de penser les mesures d'adaptation. Les modifications les plus importantes affecteront le cycle de l'eau et varieront selon les régions. Le GIEC a défini les mesures d'adap-

tation en 2001 comme « l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques ». Cet ajustement peut être spontané ou assez simple (déplacement de la date des récoltes, par exemple), mais il est très souvent nécessaire d'adapter la planification des politiques publiques. Le GIEC a par ailleurs introduit dans son rapport 2014 le concept de résilience, c'est-à-dire « la capacité d'un système social ou écologique à faire face à des perturbations de manière à maintenir ses fonctions essentielles, son identité et sa structure » : il s'agit alors de définir les trajectoires résilientes.

Dans ce contexte, les plans nationaux d'adaptation se multiplient, notamment en Europe et aux États-Unis. On distingue adaptations réactive et anticipative et adaptations dure (infrastructures) et douce : dans ce dernier cas, l'action est moins coûteuse et les pouvoirs publics interviennent sur les systèmes organisationnels. Par ailleurs, l'adaptation verte s'appuie sur les solutions naturelles. Un récent rapport du Programme des Nations unies pour l'Environnement (PNUE) actualise l'étude des coûts d'adaptation et les évalue à près de 150 milliards de dollars par an d'ici à 2030, et à environ 500 milliards par an d'ici à 2050. Actuellement, les ressources disponibles ne dépassent pas quelques centaines de millions de dollars chaque année avant l'abondement du Fonds vert, qui devrait faire augmenter ce total.

L'adaptation est difficile, car les incertitudes sont nombreuses. L'ampleur des impacts climatiques est mal connue à grande échelle et est très peu évaluable à petite échelle. Les incertitudes socio-économiques, socio-biologiques et organisationnelles sont fortes. Mais de nombreuses études, dont le rapport Stern, montrent qu'il est préférable d'agir maintenant que plus tard, notamment en faisant appel aux solutions « sans regrets » et flexibles dans le temps. Ces décisions supposent d'abord d'identifier les impacts climatiques, de les situer dans le temps et dans l'espace, puis de définir les mesures d'adaptation prioritaires après les avoir évaluées, souvent à partir d'une analyse multicritères. Il faut ensuite les financer pour les mettre en place, puis en suivre les effets sur le long terme afin d'adapter les solutions dans le temps. Dans ce contexte, l'économie peut apporter des outils d'aide à la décision. L'analyse coûts-bénéfices met en balance les avantages et les inconvénients d'une solution donnée, mais oblige à disposer de nombreuses données, de prendre en compte toutes les externalités et de définir le taux d'actualisation. En matière de changement climatique, les incertitudes sont nombreuses et la question de très long terme se pose, ce qui rend ces analyses très difficiles. D'autres méthodes économiques sont disponibles.

Globalement, les conditions climatiques ont déjà évolué et les impacts résideront avant tout dans l'amplification des phénomènes existants (sécheresses, vagues de chaleur et inondations plus fortes, notamment). L'adaptation devra être conduite à la fois au niveau international, européen et local, et devra s'appuyer sur la diffusion des connaissances à tous les niveaux (y compris en matière de retours d'expériences) tout en effectuant un travail commun sur les normes. Les impacts concerneront tous les secteurs et l'ensemble des acteurs doivent se saisir des projections existantes.

L'action doit d'abord viser à réduire la vulnérabilité actuelle tout en gérant une transition très rapide, et devra faire appel à la fois aux solutions dures, douces et vertes, mais il faut encore apprendre à hiérarchiser correctement les actions à mettre en œuvre. Il faut aussi se donner les moyens de mobiliser les acteurs et de définir une gouvernance adaptée et inclusive afin que les solutions soient acceptables et que les freins au changement soient levés. La Ville de Paris effectue par exemple un travail remarquable à travers son Plan Climat, qui est défini avec les organisations citoyennes de son territoire.

Comme l'a souligné la Stratégie européenne d'adaptation au changement climatique, la nature est l'un des

moyens d'adaptation en ville. L'étude de 2014 de la CDC Climat : « *Végétaliser la ville : quel intérêt, quel montage ?* » confirme ce potentiel. Les solutions naturelles sont moins coûteuses que les solutions dures ; elles sont aussi multifonctionnelles et permettent d'agir aussi en termes d'atténuation : il en va ainsi des solutions végétales permettant de réduire les îlots de chaleur urbains. Il est possible dans un certain nombre de cas de chiffrer à l'avance la contribution des solutions naturelles et végétales à la séquestration du carbone, à l'amélioration de la gestion de l'eau et à la réduction des îlots de chaleur, mais il faut prendre en compte les conditions précises de mise en œuvre. Il reste cependant à mieux les analyser et à les promouvoir.

# LA RÉTROACTION DES ORGANISMES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : DÉFINITION DE L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

---

*L'étude de la rétroaction des systèmes vivants sur le changement climatique est assez récente, et la question sera mise pour la première fois à l'ordre du jour de la COP 21 fin 2015. Ces interactions reposent principalement sur l'albédo, l'évapotranspiration et la rugosité de surface, mais les modifications de plusieurs cycles biogéochimiques doivent aussi être prises en compte. Les phénomènes séparés restent assez simples à étudier, mais le résultat de leurs interactions est le plus souvent difficile à prévoir. Pour cela, il faut en particulier être en mesure d'étudier et de prévoir les découplages et recouplages d'espèces associées dans les écosystèmes, et dont les niches sont amenées à se déplacer du fait du changement global. Par ailleurs, les interventions du génie écologique peuvent jouer un rôle à l'échelle locale pour orienter les systèmes vivants de façon plus ou moins massive : mais en matière de bilan climatique, les caractéristiques du comportement des forêts varient selon les régions, et l'impact des systèmes arborés sur le stockage du carbone est aussi conditionné par l'action des herbivores. Si le rôle positif du végétal est avéré en ville, il convient donc de demeurer prudents et d'utiliser avant tout le génie écologique pour accompagner les changements à l'œuvre à l'échelle locale.*

---

**Luc ABBADIE** Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), université Pierre et Marie Curie

**A**près une proposition formulée par l'université Pierre et Marie Curie, le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) et la Fondation pour la recherche sur la biodiversité, avec le soutien du CNRS, la question de la rétroaction des écosystèmes sur le changement climatique devrait faire l'objet d'une session spéciale lors de la conférence scientifique de juillet 2015 sur le changement climatique. Comme le montre l'article « *Green surprise* » publié seulement en 2003, l'étude de cette rétroaction est assez récente. L'ampleur de ces rétroactions pourrait être importante, mais celles-ci demeurent mal identifiées et encore plus mal quantifiées, ce qui pose problème pour la définition des mesures d'adaptation. C'est pourquoi la question est étudiée avec une attention de plus en plus grande.

L'impact du changement climatique sur les écosystèmes peut engendrer des rétroactions positives ou négatives. Trois processus sont principalement à l'œuvre : l'albédo de surface, l'évapotranspiration et la rugosité de surface. Ils varient selon la pluviométrie, la radiation solaire, la température, le vent, la longueur de la saison de croissance et les événements extrêmes,

que prennent en compte les modèles de l'interaction entre écosystèmes et évolution du climat. Bien entendu, les évolutions des masses d'eau et de la chimie de l'atmosphère doivent aussi être prises en compte. Les interactions sont donc très nombreuses et très variées et les systèmes à analyser sont très complexes. Les principaux flux et données à étudier sont ceux du CO<sub>2</sub>, du N<sub>2</sub>O, du CH<sub>4</sub>, de la vapeur d'eau et de l'eau, ainsi que le taux d'acidité des eaux de mer.

En matière d'évolution de l'albédo, il est par exemple possible d'évaluer les effets de l'évolution de la distribution de la forêt boréale, qui devrait gagner les latitudes plus hautes actuellement occupée par des toundras, ce qui conduira à une diminution de l'albédo du fait de la couleur de ces forêts et à une hausse des températures locales de 1,1 °C à 1,6 °C et ce, à une très grande échelle régionale. Cet effet est néanmoins calculé de façon isolée.

Il faut pour étudier l'ensemble des interactions d'un écosystème prendre en compte les traits écologiques et physiologiques (voire comportementaux) des espèces concernées. La biologie des végétaux joue

ainsi un rôle sur les flux gazeux émis par le système. Il faut aussi tenir compte des effets de la biodiversité des systèmes sur leur résilience et sur les flux, y compris en termes génétiques et d'abondance des populations. Ces effets sont assez faciles à prévoir de façon séparée, mais il n'en va pas de même de leurs interactions. Ainsi, la modification induite des réseaux trophiques et celle du milieu abiotique (du fait des organismes ingénieurs, notamment) débouche sur des effets difficilement prédictibles. Il faut aussi tenir compte de la capacité de diffusion et de sélection des espèces, et des processus évolutifs et épigénétiques qui les affectent parfois de façon rapide, notamment en réaction au changement climatique.

Selon Richard Bardget, spécialiste des interactions entre les plantes et les sols, celles-ci mettent en relation des réseaux trophiques aériens et souterrains, notamment des communautés d'espèces liées entre elles. Certaines peuvent se réorganiser en fonction des variations de leur environnement, mais d'autres subissent les effets de la disparition ou de l'apparition d'espèces. Ces différents processus se déroulent selon des échelles de temps multiples qui varient notamment selon la nature des organismes en cause, mais qui croissent selon le nombre d'espèces impliquées. Les écosystèmes répondent au changement par un découplage des relations entre espèces : il n'est par exemple en rien évident que telle espèce d'arbre, dont l'évolution de la distribution en fonction du changement climatique est bien prévisible, soit en pratique accompagnée du cortège d'espèces de micro-organismes dont dépend son développement. Il faut donc être en mesure de prédire les découplages et recouplages possibles entre espèces. Dans certains cas, les réseaux d'interaction seront maintenus. Dans d'autres cas, le découplage augmente avec le temps. Mais il est aussi possible que des recouplages s'opèrent avec des espèces nouvelles, ce qui permet aux nouveaux écosystèmes de maintenir une dynamique assez constante par rapport à la situation initiale. Ces recouplages peuvent être plus ou moins progressifs et répandent aussi des modifications évolutives des espèces considérées. La prédiction sur l'évolution des communautés d'espèces est donc très difficile.

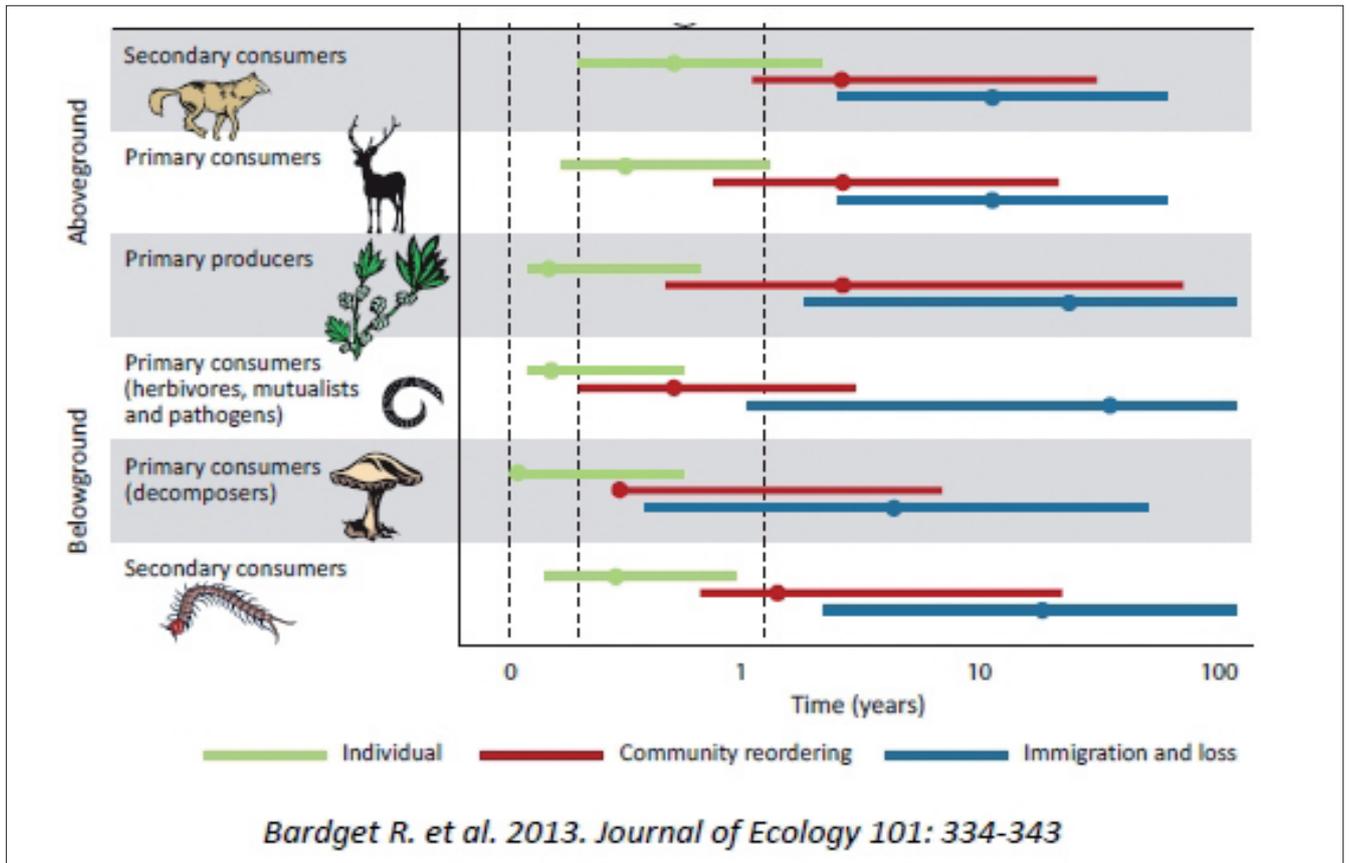
L'atténuation et l'adaptation au changement climatique au travers de l'action sur les écosystèmes par l'ingénierie écologique n'est pas réellement envisageable à l'échelle globale sans verser dans la géo-ingénierie (cf. p XXX). L'ingénierie écologique consiste à proposer une ingénierie qui utilise principalement des éléments vivants pour s'efforcer de régler les problèmes de qualité de l'environnement grâce à la capacité du vivant

d'interagir sur les éléments biotiques et abiotiques des écosystèmes. Il faut pour intervenir de la sorte être en mesure d'anticiper les effets à long terme et raisonner en se fondant sur des approches systémiques. Les techniques de génie écologique proposent en effet des interventions d'ampleur très variées. Certaines consistent à faire appel au génie civil pour reconstruire complètement des écosystèmes. D'autres peuvent être très légères et visent à faire évoluer les dynamiques des systèmes dans tel ou tel sens, en introduisant ou en renforçant par exemple une nouvelle population.

À l'échelle régionale, il s'agit de faire appel au vivant pour modifier les effets et les variables du changement climatique. Mais c'est concrètement surtout à l'échelle locale que l'ingénierie écologique peut être utilisée pour s'adapter au changement climatique, essentiellement à travers des actions de reforestation proposées notamment par des entreprises spécialisées dans la compensation Carbone. Or, les forêts ne sont pas toutes équivalentes du fait de leurs caractéristiques évaporatives et de leurs albédos, dont les effets jouent en sens inverse : il faut alors dresser des bilans de la contribution climatique de différents types de forêts. Mais ces bilans ne sont pas clairs, à l'exception de la forêt tropicale, dont la capacité de séquestration du carbone est élevée. Les bilans des forêts tempérées et boréales sont quant à eux incertains.

Les forêts mettent en œuvre une séquestration de long terme (de cent à mille ans) dans les sols. Les nombreuses études effectuées tendent à montrer que la hausse de la teneur en CO<sub>2</sub> aérien débouche sur celle de la séquestration du carbone par les sols, mais la variabilité est forte et les études existantes ne sont pas totalement conclusives du point de vue statistique. Un article publié en 2014 a néanmoins montré que les forêts chinoises ont en moyenne connu une hausse du carbone stocké dans les sols des années 80 à 2000 à un rythme assez élevé, à l'exception des forêts de feuillus. Le stockage est aussi plus fort dans les régions argileuses.

Par ailleurs, une étude du réseau trophique simplifié de la forêt nordique de bouleaux montre que les résultats obtenus pour l'albédo et pour la masse végétale varient selon l'activité des grands animaux. Dans la région où les caribous sont présents tout au long de l'année, le milieu est beaucoup plus ouvert et l'albédo est plus élevé de 5 % que dans une autre région où ces animaux sont présents seulement en hiver. La prise en compte de la contribution de l'herbivorie par des invertébrés complique les comparaisons.



Le réchauffement climatique entraîne un besoin de déplacement des espèces plus ou moins rapide selon les groupes, ce qui peut déstructurer le fonctionnement de nombreux écosystèmes.

En Afrique de l'Ouest, les systèmes de savane sont variés : stades à petites plantes herbacées annuelles et stades à grandes plantes herbacées pérennes se succèdent en fonction des pratiques agricoles. Les zones les moins cultivées connaissent un équilibre entre les deux types de végétation, qui dépend néanmoins du rôle joué par les herbivores. La production de biomasse augmente dans le cas des plantes pérennes, la répartition de l'azote (pertes par nitrates) diffère selon la couverture végétale, ainsi que les émissions de  $N_2O$  et de  $NO$ . Globalement, l'équilibre entre ces différents paramètres dépend de l'intensité de la consommation par les herbivores. La densité en vaches affecte donc le système biogéochimique dans son ensemble, ce qui donne une valeur importante à cet élevage.

En ville, les systèmes qui s'appuient sur la nature sont très efficaces. Une densité de trois arbres par bâtiment de quatre étages permet d'économiser de 5 % à 10 % d'énergie en raison de la baisse du recours à la climatisation et au chauffage. La végétalisation de tous les toits à Manchester abaisserait de 7,6 °C la température en cas de vague de chaleur, ce qui permettrait

d'éviter des milliers de morts prématurées. L'ingénierie écologique est donc un instrument de la politique sanitaire. Il est aussi démontré que la végétalisation des toits a un impact important sur la maîtrise des inondations en ville.

La dynamique des organismes et de leurs interactions est donc modifiée par le changement climatique à toutes les échelles de temps et d'espace et l'ensemble des écosystèmes se reconfigurent. Le vivant est un levier d'action très efficace en termes d'adaptation et d'atténuation du changement climatique, mais est difficile à contrôler. Il faut donc étudier les systèmes de façon intégrée pour agir à bon escient et fonder une déontologie de l'ingénierie écologique selon laquelle il est préférable d'accompagner les changements plutôt que d'intervenir massivement. Le vivant apparaît avant tout être un outil pertinent à petite échelle, car il est difficile de prévoir les effets des actions à large échelle.

# SÉQUESTRATION DU CARBONE ET USAGE DURABLE DES TERRES EN SAVANE OUEST-AFRICAINE : SYNERGIE OU ANTAGONISME ?

*Les savanes d'Afrique de l'Ouest couvrent une surface très importante et pourraient concourir à la fois à la production agricole locale et à une séquestration du carbone à vaste échelle. Pour étudier ces potentialités, une étude a été menée au Burkina-Faso en testant l'impact de différentes formes de fertilisation, mais les résultats de ces tests sont ambigus. Des études ont aussi été conduites pour augmenter le stockage de carbone des systèmes d'agroforesterie de la zone en implantant plusieurs espèces d'arbres dans les jachères : celui-ci dépend des espèces implantées et suppose une modification des systèmes existants. Il est également envisageable d'intensifier les systèmes agraires existants afin de diminuer la déforestation et d'éviter ainsi les émissions de carbone qu'elles engendrent, tout en maintenant la faible intensité en émission de carbone des modes de production actuels : ceci notamment en augmentant la part de biomasse alimentaire, ainsi que la productivité du travail, qui reste faible. Mais le lien entre qualité environnementale locale de la production agricole et émissions de gaz à effet de serre est incertain. En outre, il semblerait opportun de rémunérer les paysans africains pour leur faible contribution au changement climatique. Enfin, les modifications envisageables des systèmes de production sont dans tous les cas tributaires de changements sociaux.*

**Raphaël MANLAY** équipe Gestion environnementale des écosystèmes et forêts tropicales (GEFFT), AgroParisTech, Montpellier

Le lien entre séquestration du carbone et usage des sols en Afrique de l'Ouest a déjà donné lieu à une présentation en 2006 devant le Congrès mondial de sciences du sol, et remise à jour pour ce colloque. Selon Bernoux *et al.* (2006), la notion de séquestration mesure l'écart net entre le stockage de carbone lié à un scénario de référence et celui lié à une intervention donnée, en tenant compte des émissions dues à la réalisation du projet.

Les écosystèmes de la savane ouest-africaine couvrent environ six fois la surface de la France, associent des systèmes herbacées, et arborés et leurs faciès de végétation sont fortement pilotés par la pluviosité annuelle.

Deux points de vue se confrontent : pour les petits paysans, le carbone est consommé sous la forme de la production agricole et sert aussi fondamentalement de moyen de production (matière organique du sol, fourrage, construction, chauffage). Des études scientifiques menées au Nord montrent que les ressources carbonées des sols nécessaires notamment au fourrage des animaux (tiges de mil, notamment) sont

de plus en plus rares. La société planétaire se soucie quant à elle de plus en plus de développer des cultures « climato-intelligentes », selon la définition de l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) : une conférence internationale aura lieu à ce sujet au printemps 2015 à Montpellier. Ces cultures sont destinées à atténuer le changement climatique et à s'y adapter, tout en augmentant leur productivité. Le concept est très débattu et les ONG de développement le rejettent pour des raisons politiques.

Les savanes de l'Afrique de l'ouest pourraient jouer un rôle important en termes d'atténuation en raison de leur très vaste superficie, mais les contextes climatique et démographique invitent à une certaine prudence, et les enjeux sont aussi importants en termes d'adaptation. Cependant, l'impact du changement climatique sur le rendement, du sorgho par exemple, ne sera pas uniforme : celui-ci sera négatif pour la partie Ouest du Sahel et sera assez neutre à l'Est.

Plusieurs auteurs considèrent que les approches des paysans locaux et de la communauté internationale

sont compatibles, mais il est loin d'être certain que la durabilité de l'agriculture locale contribue systématiquement à la lutte contre le changement climatique. La lutte contre le changement climatique est assez faible en Afrique de l'Ouest pour des raisons politiques, mais le potentiel des savanes de cette région est de toute façon assez faible en la matière pour des raisons biophysiques.

Trois compartiments majeurs (biomasse arborée et herbacée, matières organiques du sol) stockent le carbone dans ces savanes. Dans ce contexte, deux schémas d'intensification sont fréquemment promus : l'augmentation de la fertilisation organominérale des cultures et l'agroforesterie. Quatre types de traitements agricoles ont en particulier été testés pendant 40 ans à Saria, au Burkina-Faso : fertilisation organominérale du sol, fertilisation minérale légère, fertilisation minérale plus importante, absence de fertilisation.

Les résultats de cette expérimentation sont saisissants. Il en ressort que la fertilisation uniquement minérale conduit à relarguer du carbone dans l'air et que le bilan environnemental de la fertilisation organominérale dépend de l'intégration (ou non) de l'élevage dans le système de culture. L'impact négatif de l'élevage dépasse en effet largement le stockage de carbone dans le sol, mais les animaux sont nécessaires en nombre assez élevé pour fertiliser suffisamment les parcelles. Les sols d'origine ferrugineux sont en effet très pauvres en matières organiques et stockent très peu de carbone quels que soient les modes cultureux. En revanche, la fertilisation organominérale permet d'accroître les rendements ; mais elle oblige à mobiliser la ressource végétale pour l'élevage, alors que celle-ci peut recevoir d'autres usages, et a des effets sociaux. Et il est très difficile d'évaluer le stockage de carbone selon les zones en raison d'une forte hétérogénéité des sols selon les lieux qui oblige à multiplier les études, ce qui est coûteux.

L'agroforesterie est aussi encouragée en tant qu'agriculture « climatiquement intelligente ». Elle utilise des produits ligneux et non ligneux pour augmenter la biomasse végétale et modifier les propriétés du sol. Dans la zone sahélienne, un système traditionnel de ce type est en extension, par exemple au Nord du Burkina-Faso, dans le parc Faidherbia Albida : ce système permet de fixer l'azote essentiellement dans les feuilles d'une espèce d'arbre locale. D'autres systèmes s'appuient sur des rotations entre parcelles cultivées et jachères boisées. Dans ce cas, les évolutions du stock de carbone concernent essentiellement la biomasse aérienne et souterraine (racines des arbres),

alors que les stocks de carbone du sol n'augmentent pas de façon significative dans les jachères.

Des tests ont été menés pour améliorer la hausse de la fertilité des jachères en y plantant des arbres de quatre espèces différentes. Le stockage de carbone supplémentaire par rapport à la jachère classique est très variable selon les espèces et l'efficacité-carbone des jachères est globalement très difficile à évaluer. En dehors de ses avantages, l'agroforesterie implique une compétition pour la ressource en espace et nécessite des réformes foncières pour que les paysans s'engagent dans les activités de plantation. Elle suppose aussi un très fort contrôle des risques d'incendie.

Les études mentionnées ci-dessus sont peu encourageantes en termes de lutte contre le changement climatique, mais d'autres approches favorables à l'atténuation peuvent être envisagées sur la base de techniques économes. Un bilan en azote et en phosphore a ainsi été dressé à l'échelle du village agrosylvo-pastoral de Sare Yorobana (sud du Sénégal) montre que la moitié du phosphore circulant est perdu dans les fosses septiques et que celui-ci pourrait être réinjecté dans le système agricole avec profit, ce qui oblige à modifier les représentations culturelles ; mais le gain climatique lié à la récupération de l'azote et du phosphore de ces fosses est faible. Par ailleurs, la plupart des paysans africains investissent les surplus agricoles sous forme d'animaux de cheptel qui représentent une forme d'épargne traditionnelle en l'absence de réel système bancaire. Mais ceux-ci émettent du  $\text{CH}_4$  et du  $\text{N}_2\text{O}$ , et il serait donc intéressant d'inciter les paysans à investir dans les systèmes de cultures plutôt que dans les troupeaux. Pour autant, il faut conserver les races locales qui émettent très peu de gaz à effet de serre (GES) par rapport aux races laitières d'Europe, par exemple.

Les discussions actuelles sur la limitation de la destruction de forêts tropicales et sur les émissions de GES évitées correspondantes sont très difficiles, mais il est envisageable de comptabiliser également les émissions de GES évitées grâce à une intensification des systèmes agricoles qui évitent de porter atteinte aux forêts ou aux savanes proches. Les travaux menés montrent que le recours à l'agroforesterie ne modifie que très peu ce bilan, mais que le rôle positif de l'amélioration des rendements grâce à la fertilisation est meilleur. Ce raisonnement est défendu par plusieurs instances internationales, mais est très controversé, car un paysan qui produit de façon plus intensive n'est pas forcément découragé d'occuper une surface supérieure : les habitants de l'Afrique de l'Ouest sont très

mobiles et utilisent couramment les zones forestières lorsque les savanes sont devenues insuffisantes.

En revanche, les instances internationales s'intéressent peu à l'efficacité de l'utilisation de l'espace. Actuellement, la productivité-biomasse du village du Sud du Sénégal cité ci-dessous représente environ la moitié de celle d'un agriculteur européen en moyenne. Or, seule une partie de cette biomasse est comestible : les cannes de mil, en particulier, mesurent de 3 à 4 mètres de haut et portent un seul épi, alors que les céréales européennes sont de taille moindre. En revanche, les pailles de mil alimentent le bétail qui permet de fertiliser le système et d'apporter la force de travail. Bien que les études soient contradictoires à ce sujet, la quantité d'énergie nécessaire pour produire 1 kJ de nourriture est à peu près équivalente au sud du Sénégal et aux États-Unis, et les émissions de GES nécessaires pour produire 1 kg de nourriture sont moindres dans le village africain qu'aux États-Unis. La productivité de la main d'œuvre est en revanche très faible en Afrique de l'Ouest, ce qui cantonne les paysans dans la pauvreté.

En conclusion, il existe une relation inverse entre les avantages environnementaux et agricoles de la fertilisation, mais il n'est pas possible de savoir si la qualité environnementale de l'utilisation des terres et la séquestration du carbone sont corrélés ou antagonistes, car le cycle du carbone reste mal connu à l'échelle de la parcelle, et parce que le bilan à l'échelle de l'exploitation et du territoire villageois dépend de choix

d'intensification qui supposent de lever des barrières culturelles.

Plus généralement, il faut, pour penser correctement l'atténuation du changement climatique, conserver la prise en compte des mesures conventionnelles discutées dans les conférences climatiques, et prendre en compte la déforestation évitée, en étant conscients des incertitudes qui pèsent en la matière. Il faut enfin soutenir l'agriculture des petits paysans, notamment en Afrique de l'Ouest, pour la rendre plus efficace en termes d'utilisation de la main d'œuvre sans augmenter les émissions de carburant fossile liées à la mécanisation et à la fertilisation chimique. Pour cela, plusieurs pratiques agro-écologiques traditionnelles peuvent être améliorées. Il faut aussi modifier les façons de considérer les situations : un paysan sénégalais émet aujourd'hui environ une tonne de CO<sub>2</sub> par an contre près de 20 tonnes pour un Américain moyen. Il faut donc se mettre en situation de rémunérer les paysans africains en raison de leurs faibles émissions de GES en prenant en compte les responsabilités historiques des émissions passées par les États ou par les régions.

Par ailleurs, les sociétés rurales du Sud sont généralement plus sensibles au changement climatique que celles du Nord, qui sont quant à elles plus sensibles à l'état des marchés mondiaux. Comme le montre Neumayer, les vulnérabilités au changement climatique sont donc très multiples selon les lieux et les types de sociétés.



Station de Saria (Burkona-Faso). L'école AgroParisTech y a mené une étude pour tester l'impact de différentes formes de fertilisation sur la séquestration de carbone.

# INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE ET AUTRES MOYENS CONTRE LES PROLIFÉRATIONS DE CYANOBACTÉRIES DANS LES ÉCOSYSTÈMES AQUATIQUES CONTINENTAUX

---

*Le surdéveloppement des cyanobactéries est l'un des symptômes de l'eutrophisation des eaux douces, causée essentiellement par la surcharge des milieux en azote et en phosphore. Il est aussi conditionné par la température et sera donc sensible au changement climatique. L'envahissement des systèmes par ces bactéries peut causer la mortalité des poissons et l'impossibilité de produire de l'eau potable. Les stratégies de lutte consistent d'abord à limiter la charge en nutriments minéraux, ce qui a conduit à l'interdiction des phosphates dans les lessives dans les pays du Nord. Il est aussi possible de favoriser le piégeage de ces nutriments par la végétation et de limiter les remontées du phosphore contenu dans les sédiments. Dans les systèmes de petite taille, le brassage des eaux permet de favoriser les compétiteurs (algues) des cyanobactéries, du moins jusqu'à une concentration en phosphore d'environ 50 µg/l, au-delà de laquelle celles-ci l'emportent en raison de la baisse de la transparence de l'eau. La lutte peut enfin être menée en favorisant les poissons carnassiers qui éliminent une partie des consommateurs de zooplancton, lequel consomme alors une plus grande part du phytoplancton, dont les cyanobactéries. Ces moyens de lutte demeurent souvent expérimentaux et permettent de maintenir les usages locaux de l'eau, mais ne peuvent en aucun cas remplacer l'action sur la concentration en nutriments.*

---

**Jean-François HUMBERT** Institut national de la recherche agronomique (INRA), Paris

Les cyanobactéries sont naturellement présentes dans les écosystèmes aquatiques continentaux, mais peuvent proliférer dans certaines conditions, comme cela est observé dans de nombreux écosystèmes aquatiques continentaux dans le monde entier. Ces proliférations sont l'un des avatars de l'eutrophisation des eaux continentales, c'est-à-dire de leur enrichissement excessif en nutriments minéraux (phosphore et azote, notamment). Ce phénomène a été maximal entre les années 60 et 80 dans les pays du Nord, mais il se déplace actuellement au Sud – par exemple dans le lac Victoria (Afrique orientale) et dans de nombreuses régions émergentes d'Asie.

Si l'eutrophisation est le processus majeur dans le déterminisme des proliférations de cyanobactéries, le réchauffement climatique actuel joue également un rôle dans ce phénomène. En effet, l'augmentation des

températures de l'eau stimule le taux de croissance des cyanobactéries et la durée de la stratification de la colonne d'eau des plans d'eau, ce qui favorise les cyanobactéries au détriment de certains de leurs compétiteurs.

Les proliférations des cyanobactéries affectent le fonctionnement des écosystèmes de multiples façons. Elles provoquent une diminution importante de la diversité dans les communautés phytoplanctoniques du fait de la domination d'une seule espèce et perturbent les réseaux trophiques aquatiques car les espèces proliférantes sont très peu consommées par le zooplancton. Par ailleurs, les quantités importantes de matière organique produites lors de ces phases de prolifération s'accompagnent d'une diminution drastique des concentrations en oxygène lorsque cette biomasse est dégradée par les bactéries, ce qui peut



*Eutrophisation d'un lac d'Afrique du fait du surdéveloppement de cyanobactéries. Ces microorganismes naturellement présents dans les eaux sont favorisés notamment par la hausse des températures.*

parfois provoquer en quelques heures la mortalité de tous les poissons dans un plan d'eau. Enfin, de nombreuses espèces de cyanobactéries fabriquent des toxines dangereuses pour la santé humaine et animale, ce qui peut déboucher sur de fréquentes interdictions de baignade et de production d'eau potable. Durant l'été 2014, il a ainsi fallu alimenter la ville de Toledo (États-Unis) en bouteilles d'eau minérale, car il n'était plus possible de produire une eau de qualité satisfaisante en raison des toxines produites par les cyanobactéries. L'Australie évalue les dommages causés par les cyanobactéries à environ 250 millions de dollars australiens par an.

Depuis quelques années, des mesures ont donc été prises pour tenter de limiter ces proliférations. La stratégie la plus commune et la plus efficace vise à maîtriser les concentrations en nutriments minéraux, en limitant les apports en azote et phosphore. Dans les pays du Nord, cela s'est traduit par l'interdiction des phosphates dans les lessives (qui n'est toujours pas totale) et par l'amélioration du traitement des eaux usées. Le piégeage du phosphore et de l'azote est aussi possible grâce au développement de bandes enherbées le long des rivières. Une expérience de ce type a été menée sur le site de Rampillon de l'IRSTEA : elle consiste à faire transiter les eaux d'une vaste zone

agricole dans une zone de lagunage végétalisée qui permet de réduire la teneur en pesticides grâce à l'action de la lumière et de bactéries, mais aussi de favoriser la dénitrification et l'émission d'azote atmosphérique. Ces actions expérimentales commencent à se généraliser dans certaines régions.

Il est aussi possible de limiter les apports internes. Une grande partie du phosphore est stockée dans les sédiments qui recueillent les éléments minéraux provenant de la dégradation de la biomasse. Ce phosphore est généralement piégé avec le fer et est peu disponible, sauf en cas d'état anoxique du système : la réduction du fer libère alors le phosphore. Il est donc possible d'intervenir pour éviter l'anoxie au fond des systèmes et pour éviter certaines espèces de poissons fouisseurs qui remettent les sédiments en suspension dans l'eau. Ce type d'actions se révèle assez efficace dans les pays du Nord. L'Agence européenne de l'environnement a établi que le taux de phosphore des rivières et des lacs européens a beaucoup diminué de 1992 à 2008. En revanche, la dynamique reste inverse dans les pays du Sud.

Une autre stratégie consiste à favoriser les compétiteurs des cyanobactéries (micro et macro algues). Le lac Taihu (Chine) couvre 2 500 km<sup>2</sup> et connaît des proliférations récurrentes de *Microcystis*. Cette cyanobactérie comporte des vésicules à gaz qui lui assurent une flottabilité, ce qui lui permet d'occuper la surface des plans d'eau et ainsi d'éliminer les autres espèces photosynthétiques du phytoplancton lorsque la lumière devient le facteur limitant. Des systèmes de lutte visent alors à créer un courant vertical pour mettre en place des vortex qui brassent la colonne d'eau et réduisent ainsi l'avantage des cyanobactéries au profit d'algues qui ont tendance à sédimenter. Le brassage limite aussi l'anoxie dans les zones profondes, ce qui permet de réduire le relargage du phosphore des sédiments. L'action des aérateurs mécaniques ou des systèmes de bullage peut être efficace dans les systèmes de petite taille, mais il se révèle parfois insuffisant lors de périodes très chaudes, qui devraient se multiplier avec le réchauffement climatique. Ce type d'intervention doit être couplé avec le contrôle des apports en nutriments.

La transparence de l'eau est un facteur déterminant du développement des plantes aquatiques, qui sont en compétition avec le phytoplancton dans les systèmes peu profonds. Or cette transparence diminue généralement lorsque les concentrations en phosphore augmentent et qu'elles permettent de générer des biomasses importantes en phytoplancton. Au-delà d'un seuil de 50 µg/l environ, la communauté phytoplancto-

rique l'emporte et le phénomène s'accélère du fait du recul des plantes aquatiques. En deçà de ce seuil, il peut exister des phases d'alternance entre domination des plantes et du phytoplancton dans des étangs de faible profondeur. Plusieurs expériences ont tenté de favoriser des macrophytes submergées, d'abord avec un certain succès dans des systèmes de taille modeste, et des enclos de plusieurs hectares ont été développés en Chine afin de protéger les macrophytes des poissons, ce qui permet de piéger une partie du phosphore. Ces systèmes restent expérimentaux.

Enfin, il est aussi possible d'essayer de favoriser le contrôle du phytoplancton et des cyanobactéries par la prédation. Plusieurs expériences très intéressantes ont été menées en Chine par l'équipe danoise de Jeppesen. Ainsi, l'introduction de carnassiers qui exercent une prédation sur les poissons consommateurs de zooplancton favorise une plus grande abondance de ce zooplancton consommateur de phytoplancton, donc de cyanobactéries. Ceci étant, certaines espèces telles que la Perche jouent un double rôle, car elle consomme le zooplancton lorsqu'elle est jeune, alors qu'elle chasse les poissons planctonophages à l'âge adulte. Ce type d'action est praticable dans des systèmes de petite taille. Une synthèse a montré que la réduction des populations de cyprinidés joue un rôle efficace dans des systèmes de petite taille au Danemark. La réduction du nombre de poissons fouisseurs par leurs prédateurs limite aussi le relargage du phosphore des sédiments.

Pour autant, aucune stratégie ne sera efficace durablement sans limitation des charges en nutriments. Dans les systèmes de petite taille, le fait de combiner le contrôle des communautés de poissons et le développement de la biomasse des macrophytes permet d'obtenir des solutions de compromis réellement intéressantes pour des gestionnaires souhaitant maintenir des usages de baignade, par exemple. Ils permettent aussi d'éviter des interventions toxiques telles que l'usage de sulfate de cuivre ou d'algicides. Mais il est illusoire de prétendre contrôler la situation dans les systèmes de taille importante par ces moyens. Enfin, la lutte contre les cyanobactéries entraîne la mise sur le marché de solutions farfelues, voire dangereuses. Des entreprises proposent de répandre des colorants aptes à filtrer la lumière pour prétendument empêcher le développement des bactéries. D'autres préconisent l'utilisation de l'eau oxygénée, ce qui est beaucoup plus inquiétant.

# LA MIGRATION ASSISTÉE COMME STRATÉGIE D'ADAPTATION POUR LES SOCIO-ÉCOSYSTÈMES FORESTIERS

---

*Depuis les années 2000, le concept de migration assistée s'est développé pour déplacer par des moyens humains des espèces dont la vitesse de déplacement spontanée est inférieure à celle du déplacement de leurs niches lié au changement climatique. Il peut alors s'agir d'introduire de nouvelles essences dans des forêts où elles sont actuellement absentes, mais surtout de mettre en contact des patrimoines génétiques potentiellement plus adaptés aux conditions actuelles et futures. Les risques écologiques sont supérieurs dans le premier cas, surtout si l'on implante une espèce hors de son aire de répartition actuelle. Les incertitudes sont nombreuses, car les caractéristiques du changement climatique sont en partie imprévisibles, parce que les espèces associées aux arbres peuvent créer des déséquilibres. En tout état de cause, la gestion forestière est toujours une gestion à très long terme et représente ainsi un pari sur le futur.*

---

**Roxane SANSILVESTRI** équipe Trajectoires écologiques et société (TEES),  
Laboratoire d'écologie, systématique et évolution (ESE), université Paris-Sud

L'ingénierie écologique se développe dans le cadre d'un mouvement de réconciliation homme-nature, qui se traduit par l'apparition de disciplines telles que l'écologie urbaine ou l'agro-écologie. Les scientifiques intègrent de plus en plus le facteur humain comme une composante des socio-écosystèmes, l'homme jouant un rôle d'ingénieur de son environnement : les choix politiques et économiques doivent donc être intégrés dans l'analyse des systèmes complexes. Dans ce cadre, les changements sociaux et écologiques sont interdépendants.

De ce point de vue, les systèmes forestiers français sont particulièrement intéressants : l'histoire des forêts est très liée à celle des besoins sociaux, la filière Bois est économiquement importante et l'attachement des populations au patrimoine forestier est très fort.

La matrice sociale comprend notamment les modalités de gouvernance, les attentes sociales et les flux économiques liés à la filière Bois. La matrice écologique est constituée par la biodiversité, la physiologie et les relations systémiques et fournit un certain nombre de services écosystémiques à la société. En retour, celle-ci assure sa gestion qui découle des processus de décision et qui affecte les caractéristiques biotiques, abiotiques, génétiques et physiologiques de la matrice écologique afin d'obtenir les services écosystémiques

souhaités. Ce concept de socio-écosystème est très adapté pour penser l'ingénierie écologique, qui repose sur l'utilisation des savoirs scientifiques, sur les mécanismes biologiques et sur la manipulation des dynamiques écologiques pour gérer les milieux naturels, les ressources et les services écosystémiques en favorisant le maintien de l'auto-entretien des écosystèmes. Il s'agit ainsi de mettre en place une symbiose entre l'ingénieur et l'écologue pour piloter les systèmes.

En Europe, le cadre actuellement développé met en valeur la multifonctionnalité des forêts, ce qui exige la mise en place d'une gestion complexe afin de produire du bois, de préserver la biodiversité, de participer à la gestion de l'eau, de limiter l'érosion et de proposer un cadre agréable pour les loisirs. Dans ce contexte, le changement climatique affecte à la fois la matrice sociale et écologique et rend le socio-écosystème vulnérable sans qu'il soit possible de prévoir précisément l'ensemble de ses impacts. L'ingénierie écologique peut intervenir dans les choix de gestion pour réduire cette vulnérabilité et réduire les impacts écologiques pour maintenir les services écosystémiques.

Le concept de migration assistée est né dans les années 2000. Un article de Loarie *et al.* (2009) a fait grand bruit, car il a établi la vitesse de déplacement

des espèces nécessaire pour qu'elles retrouvent des niches écologiques adaptées. Or, certaines espèces ne possèdent pas intrinsèquement les moyens de se déplacer à la vitesse qui serait requise par le changement climatique : c'est le cas des arbres, dont les plus rapides se déplacent par reproduction à une vitesse moyenne de 10 m par an. La migration assistée vise alors à compenser les impacts néfastes potentiels du changement climatique en déplaçant humainement certaines espèces. Celle-ci a jusqu'ici été pratiquée à très petite échelle pour des espèces menacées ; mais désormais, les flux de gènes spontanés entre arbres de massifs différents et isolés sont moins rapides que le changement climatique et la migration graduelle des écosystèmes est devenue impossible. L'ingénierie écologique propose alors d'aider la migration d'arbres afin que l'adaptation des forêts soit possible.

Il est possible de déplacer des espèces vers des milieux où il est espéré qu'elles puissent survivre à l'avenir, mais aussi d'apporter des éléments aux écosystèmes soumis au changement climatique pour les renforcer et les rendre plus robuste. Dans le cas des forêts, il est envisageable de déplacer des essences nouvelles dans des forêts en dépérissement, ce qui représente une intervention assez forte et coûteuse, ou d'introduire dans des forêts en difficulté des sujets d'espèces déjà présentes, mais porteurs d'un patrimoine génétique jugé plus adapté aux nouvelles conditions. Ces interventions comportent des risques : en effet, les scénarios climatiques comportent des incertitudes, l'adaptabilité des essences forestières reste souvent mal connue, et la nature des essences à déplacer selon les régions et les sites l'est également. D'autres incertitudes portent sur le rôle des espèces d'arbres dans leurs nouveaux écosystèmes. Par ailleurs, il existe aussi un aléa social, car les techniques de migration assistée sont très controversées et souvent refusées. Les risques d'invasion biologique et de pollution génétique sont par ailleurs réels, et il faut compter également avec les possibilités d'échec des programmes.

La migration assistée est une technique d'ingénierie écologique visant à renforcer l'écosystème receveur face au changement climatique, en introduisant des essences possédant une valeur sociale, notamment économique, mais aussi écologique – par exemple en permettant de remplacer une espèce-clé de voûte menacée dans le système concerné. L'ingénierie écologique peut intervenir sur les risques en amont et en aval. Il faut toutefois rester vigilant face à un pilotage des massifs forestiers principalement fondé sur des objectifs économiques (production de bois) et non en fonction d'objectifs de sauvegarde du patrimoine biologique.

Les risques écologiques de la migration assistée sont variables. Ils sont faibles lorsque l'on déplace une espèce au sein de son aire de répartition, plus élevés lorsque des populations génétiquement très différentes sont mises en contact, et importants lorsque l'on tente d'implanter une espèce hors de son aire de répartition de départ. À ces risques s'ajoutent des contraintes politiques, notamment en ce qui concerne le marché international de graines forestières. Les contraintes juridiques existent également : il est impossible d'introduire de nouvelles espèces dans une zone Natura 2000, par exemple.

Les forêts ne sont pas uniquement constituées d'arbres, mais aussi des espèces qui y sont associées. Le fait de déplacer une essence doit le cas échéant entraîner le déplacement du cortège d'espèces du sol qui y est associé et ces déplacements peuvent modifier l'écosystème d'accueil. L'introduction de nouvelles essences a aussi des impacts sociaux et économiques sur la filière Bois locale. Contrairement à d'autres écosystèmes, les interventions en forêt concernent généralement des échelles très larges et sur une échelle temporelle d'au moins 50 ans, alors que des incertitudes pèsent sur les caractéristiques du changement climatique et sur ses effets sur les mécanismes qui seront à l'œuvre demain dans ces écosystèmes.

Dans le contexte forestier, l'ingénierie écologique est donc confrontée à une forte complexité et à de fortes responsabilités de la part des gestionnaires. Elle doit dans tous les cas tenir compte du rôle économique de la production de bois et des attentes sociales en termes récréatifs, voire thérapeutiques, et demeure un lieu de référence symbolique délicat à modifier. L'ingénierie écologique est aussi confrontée à l'évolution des dynamiques forestières liées aux évolutions climatiques futures, qui induit une perte de référentiels de gestion. Elle doit donc viser à maintenir non pas la perpétuité, mais à favoriser l'adaptabilité des socio-écosystèmes afin que ceux-ci restent fonctionnels dans le futur en proposant de nouvelles trajectoires. En forêt, il ne s'agit pas seulement de mener des actions de sauvegarde, mais de maintenir et d'accroître la capacité productive alors que la demande de bois augmente, ce qui ne bénéficie pas forcément à la qualité des écosystèmes forestiers. Il faut alors arbitrer entre un pilotage accru et des actions de préservation du fonctionnement des écosystèmes, et savoir qui décide en la matière.

# DE L'INGÉNIERIE TECHNIQUE À L'INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE : APPLICATIONS DANS LES VILLES

---

*La science écologique ne s'intéresse que depuis une période récente au milieu urbain. Alors que les approches actuelles de la « ville durable » sont avant tout axées sur une vision étroite de l'efficacité énergétique, Natureparif a vocation à promouvoir des solutions fondées sur la biodiversité. Dans ce contexte, il faut réussir à réconcilier l'urbanisme et l'aménagement avec la prise en compte de toutes les composantes du vivant : vie des sols, circulation des espèces, gestion des eaux, production agricole et lutte contre les îlots de chaleur urbains. Ceci d'autant plus que ces solutions sont le plus souvent moins coûteuses que leurs alternatives technologiques classiques et qu'il s'agit de choix « sans regrets » de plus en plus étudiés et retenus par les pouvoirs publics. Ces systèmes naturels doivent cependant être adaptés aux conditions locales. De nombreuses expériences montrent qu'il est aussi possible d'utiliser le vivant pour gérer l'eau en ville à des coûts moindres qu'avec les infrastructures grises classiques.*

---

**Marc BARRA** Natureparif, agence régionale pour la nature et la biodiversité en Île-de-France

La ville est le socio-écosystème dans lequel l'intervention humaine est maximale, puisque c'est essentiellement l'ingénierie civile qui donne forme au milieu. Les écologues s'intéressent depuis assez peu de temps à la ville, alors que ce milieu progresse de façon très rapide dans le monde entier : les surfaces urbanisées ont ainsi crû de 19 % en 10 ans en France selon l'INSEE. Cette tendance devrait se poursuivre, puisque le gouvernement entend construire 500 000 logements par an à partir de 2017, et 70 000 logements par an pendant 10 ans en Île-de-France dans le cadre du Grand Paris, alors que la dernière loi Valls prévoit un accès facilité à la construction.

Dans ce contexte, Natureparif a vocation à faire dialoguer le monde du BTP et de l'aménagement urbain avec celui de l'écologie scientifique, de l'ingénierie écologique et de la protection de la nature. Actuellement, les projets urbains se fondent presque exclusivement sur la transition énergétique grâce à l'application de la RT 2012 et des labels BBC ou BEPOS. Or, le bilan Carbone global de ces bâtiments est le plus souvent négatif si l'on tient compte de l'ensemble de leur cycle de vie. Ce type d'aménagements ne répond donc pas aux enjeux climatiques, et encore moins aux défis du vivant en termes de végétalisation, de prise en compte de la vie des sols et du cycle de l'eau, etc. Les bâtiments « durables » actuels sont loin d'être conçus selon l'ingénierie écologique et c'est

pourquoi la COP 21 de novembre 2015 est une très bonne occasion d'imposer l'ingénierie écologique comme l'un des moyens de défendre les solutions inspirées du vivant à des fins d'adaptation et d'atténuation et de faire en sorte que les mesures qui seront prises seront compatibles avec le respect du vivant.

Les mesures d'adaptation en milieu urbain doivent privilégier les solutions vivantes pour permettre à la ville de répondre aux vagues de chaleur et aux écarts précipitatifs qui seront plus fréquents et plus marqués qu'actuellement, tout en permettant la migration des espèces. Le milieu urbain apparaît être le lieu idéal pour tester l'ingénierie écologique et pour mettre en place des mesures « sans regret » car l'état de référence n'existe pas en ville. Différents degrés d'intervention humaine peuvent être expérimentés et proposés aux collectivités et aux entreprises. Pour favoriser ce mouvement, Natureparif met en valeur les bénéfiques multifonctionnels des solutions inspirées de la nature, en faisant valoir leurs propriétés régulatrices et épuratrices s'appuyant sur le cercle vertueux entre le cycle de l'eau, la vie des sols et la végétation.

Les bénéfices de ces solutions sont multiples en termes de bien-être, de santé, de cadre de vie et au renforcement du lien social, ce qui est établi par un nombre croissant d'études. Ces solutions présentent aussi des coûts très faibles et des effets indésirables minimes. Elles intéressent de plus en plus les pouvoirs

publics : la Ville de Paris prévoit ainsi d'augmenter la surface de ses espaces verts de 30 hectares d'ici à 2020, celle de ses murs et toitures végétalisés de 100 hectares, et de planter 20 000 nouveaux arbres. Les écologues s'interrogent bien entendu sur les espèces qui vont être implantées, et sur les méthodes qui seront retenues : car les projets peuvent aller d'un simple verdissement jusqu'à de réels projets d'ingénierie écologique en ville.

Il est possible, pour lutter contre les îlots de chaleur urbains locaux, de faire appel à des solutions techniques : 100 000 m<sup>2</sup> de toits ont ainsi été peints en blanc à New York. Chicago a préféré végétaliser un certain nombre de toitures, ce qui permet d'obtenir des baisses de température des toits importantes. L'efficacité de ces deux types de mesure est comparable, à ceci près qu'il faut émettre une forte quantité de GES pour fabriquer la peinture, que le bénéfice local amplifie l'effet d'albédo global, et que cette solution ne permet pas de bénéficier des autres avantages liés à la végétalisation : isolation des bâtiments, tamponnement du ruissellement, prolongation de la durée de vie des étanchéités, accueil de la biodiversité, usages sociaux.

Les solutions végétales doivent cependant être hiérarchisées, et le plus souvent, les murs végétaux actuels sont gourmands en ressources (eau, substrats, engrais chimiques) et en entretien (remplacement de plantes inadaptées aux conditions locales). De la même façon, 95 % du marché français de la végétalisation des toitures est livré clés en mains et repose sur le système associant pouzzolane et sédums sur de très faibles épaisseurs, déployées partout, quelles que soient les conditions locales. Quant à la plus grande toiture végétalisée de Paris (celle du centre commercial Beaugrenelle), elle repose, elle, sur une épaisseur de substrat de 40 cm riche en pouzzolane sur une surface de près de 7 000 m<sup>2</sup>, mais le système est irrigué et ne comporte que trois espèces horticoles, alors que certaines toitures comptent plus d'une centaine d'espèces de plantes qui se sont installées spontanément.

Ce type de projets possède une forte valeur pédagogique, mais il est parfaitement possible de s'adapter aux spécificités des environnements locaux et de proposer des systèmes utilisant la terre et les espèces locales. Cela obligera à mettre en œuvre, le plus rapidement possible, des normes de végétalisation afin de favoriser une bonne diversité biologique, un auto-entretien et un degré élevé de multifonctionnalité. Natureparif incite ainsi le Conseil régional d'Île-de-France à modifier les subventions régionales en la matière afin qu'elles deviennent progressives en fonc-

tion de la qualité écologique des toitures. Il est aussi possible de favoriser les systèmes de murs végétalisés reposant sur les plantes grimpantes très peu coûteuses et non sur les systèmes modulaires riches en intrants et nécessitant un entretien intensif. Les plantes grimpantes exigent cependant du temps pour se développer, ce qui amène à travailler pour faire évoluer les perceptions des promoteurs.

En matière de gestion de l'eau, le modèle classique mobilise des infrastructures grises de collecte, de transport et de traitement des précipitations. Il existe à présent des asphaltes perméables qui permettent de transmettre une part importante des pluies au sol, mais il serait préférable de retenir des solutions inspirées du vivant, telles que pavés drainants et dalles enherbées associées à des noues et/ou à des jardins de pluie. L'efficacité de ces systèmes est incomparablement meilleure que celle des systèmes techniques en cas de fortes pluies et sont beaucoup moins coûteux pour les aménageurs. Pour récupérer les eaux de pluie et restaurer le cycle de l'eau, Natureparif promeut également les mares et bassins au lieu des systèmes de cuves enterrées, dont l'installation dégrade les sols. Les systèmes de phytoépuration pourraient aussi être développés en ville pour traiter les eaux grises et eaux noires, comme le montre l'exemple d'un écoquartier hollandais qui traite de cette façon toutes ses eaux *in situ*. Il faut donc adapter le système réglementaire français à ces solutions.

Ces quelques exemples montrent qu'il est possible de développer l'ingénierie écologique en ville, y compris pour l'appliquer au bâti : choix des matériaux de construction, végétalisation qualitative et réversibilité, respect de la vie du sol grâce à des systèmes de pilotis... Il faut aussi rappeler que le meilleur aménagement urbain écologique est celui qui n'a pas lieu sur des terres agricoles ou naturelles. Les urbanistes doivent désormais sanctuariser les espaces naturels et agricoles rélictuels présents en ville. C'est le minéral et stérile qui doit faire l'objet de renaturation, de restauration des fonctions écologiques élémentaires, afin de contribuer à rendre la ville plus résiliente face aux événements que le changement climatique ne manquera pas de produire.



© L. Pagès

*Marais urbain. Les infrastructures vertes apportent des bénéfices multiples (tamponnement des précipitations, épuration, espaces de loisir, accueil de la biodiversité) et sont souvent moins coûteuses que leurs homologues « grises ».*

# TOITURES VÉGÉTALISÉES ET ESPACES VERTS POUR LA LUTTE CONTRE LES ÎLOTS DE CHALEUR EN MILIEU URBAIN

*Initialement riche en milieux humides et comprenant de nombreux marais, la Seine-Saint-Denis est un département aujourd'hui très urbanisé. Plusieurs de ses territoires se sont engagés de façon précoce dans la mise en place de Plans Climat énergie Territoriaux. Si le rôle de la végétation urbaine est bien établi pour la gestion de l'eau, et si les projets menés en la matière sont d'ores et déjà nombreux en Seine-Saint-Denis, l'impact des infrastructures vertes sur les îlots de chaleur reste à préciser. C'est pourquoi le Département de la Seine-Saint-Denis a commandé une étude pour évaluer cet impact à l'université d'Aix-Marseille. Les travaux menés montrent qu'au-delà du renforcement global de l'effet d'îlot lié au rapprochement du centre de l'agglomération, les variations locales sont très sensibles à la présence de la végétation et à l'existence de canyons urbains (couloirs d'ombre formés par les rues). Les effets de la végétation locale peuvent être forts, mais l'impact des ombres urbaines est aussi important bien qu'il ne soit pas modélisable. Les grands parcs jouent un rôle globalement faible sur la température des zones proches. L'étude débouche sur des résultats opérationnels et préconise notamment les matériaux à fort albédo, l'arrosage des surfaces et une végétalisation favorisant la biodiversité. Le Département de la Seine-Saint-Denis prévoit de mettre en place une plateforme spécifique pour favoriser ces solutions qui nécessitent une communication adaptée auprès des habitants.*

**Laura ALBARIC** Observatoire départemental de la biodiversité urbaine (ODBU)

**Stephan GREGORIUS** Direction de l'Eau et de l'Assainissement, Conseil départemental de Seine-Saint-Denis

La Seine-Saint-Denis est l'un des départements de la première couronne parisienne. Ce territoire est au départ riche en marécages drainés pour laisser place à l'urbanisation. Sa surface est réduite, mais il est aussi l'un des départements les plus peuplés de France, puisqu'il a été urbanisé (et initialement industrialisé) de façon croissante du XIX<sup>e</sup> siècle aux années 2000, au détriment des surfaces agricoles et des forêts patrimoniales.

Le Plan Climat Énergie Territorial de la Seine-Saint-Denis a été réalisé en 2010, avant celui de la région Île-de-France. Ce contexte réglementaire et stratégique a conduit le Département de la Seine-Saint-Denis à s'intéresser aux îlots de chaleur urbains dans le cadre de ses politiques d'adaptation, de lutte contre le réchauffement climatique et d'évaluation, car il est estimé qu'un été sur deux sera comparable à la canicule de 2003 autour de 2050. Le Département a donc commandé une étude en ce sens à l'université d'Aix-Marseille.

La représentation classique des îlots de chaleur urbains considère que les maximums de température se situent au centre des villes pour s'abaisser progres-

sivement en allant vers la périphérie, mais cette vision apparaît très globale, car il existe des effets locaux très marqués, notamment en Seine-Saint-Denis, où l'urbanisation est très disparate. Les centres anciens des communes constituent en effet d'importants îlots de chaleur potentiels en cas de températures élevées, et il apparaît que le lien entre les surfaces végétalisées et la modération des températures est très forte. Ainsi, la température d'un jardin urbain de 100 m<sup>2</sup> peut être inférieure de 1 °C à celle des rues proches et une augmentation de 10 % de l'emprise verte au sol se traduit par une baisse des températures de 0,8 °C. Ces différences peuvent paraître anodines, mais l'on estime que des températures supérieures de 1 °C à celles constatées durant l'été 2003 auraient aggravé les risques sanitaires de 80 %.

Dans une des rues étudiées, le développement des arbres d'alignement observé dépend strictement du volume des fosses de pieds d'arbres et de leur raccordement au système hydrologique (présence ou non de noues). Différents aménagements ont été réalisés en

s'appuyant sur ce constat. Des fosses de pieds d'arbres plus larges pouvant servir de réserves d'eau, avec des substrats adaptés. À Stains, toutes les eaux pluviales du quartier des Trois rivières sont désormais traitées à la parcelle. La cité Floréal de Saint-Denis a été équipée d'une zone végétalisée qui peut être inondée sans empêcher le déplacement des riverains.

La Direction de l'Eau et de l'Assainissement met en œuvre ce type de projets, en premier lieu pour ralentir l'écoulement de l'eau en cas de précipitations importantes. La Direction s'est aperçue que ces systèmes peuvent présenter d'autres avantages, dont le rafraîchissement lié au développement des surfaces végétalisées, ce qui a été démontré grâce au partenariat avec l'université Aix-Marseille. Celle-ci avait déjà mené le même genre de travail sur les agglomérations de Lyon et de Bordeaux.

La caractérisation et la cartographie des îlots de chaleur urbains s'est appuyée dans un premier temps sur la modélisation, à partir des données socio-urbaines, sur les travaux de Stewart et Oke, et sur les données CORINE-Land Cover. Elle a permis de cibler les zones propices au développement d'îlots de chaleur, ainsi qu'un certain nombre de canyons urbains. Sur cette base, plusieurs territoires ont été équipés de capteurs de température pendant deux étés – en particulier à Montreuil et à Saint-Denis. Des équipements alternatifs de captation d'eaux pluviales et des toitures végétalisées ont été équipés de capteurs. Les boîtiers de mesure ont été conçus par le chercheur pour éviter l'effet du rayonnement solaire sur les capteurs. Le vandalisme a été très faible, ce qui a permis de recueillir une masse considérable de données.

Les premiers résultats de l'étude confirment pour l'essentiel le savoir existant, et apportent des connaissances sur le territoire de la Seine-Saint-Denis. Les îlots de chaleur apparaissent comme des phénomènes très locaux. La température peut être ainsi plus élevée sur une place minérale de Villepinte que dans un parc situé au cœur de Paris. La grande concentration des points chauds à Paris provoque bien sûr la répartition radiale des températures à partir du cœur de l'agglomération, mais les solutions locales apparaissent adaptées dans les territoires des villes du département. Les mesures confirment que les températures relevées sont très liées à l'environnement local, à quelques exceptions près.

La distribution des points chauds et des points froids varie au cours du temps de façon non linéaire. Ainsi, il faut tenir compte de l'exposition au soleil dans le cas d'une station située au cœur d'un parc entièrement végétalisé, ce que montre la forte baisse des tempé-

tures durant les nuits. Il faut globalement tenir compte de l'effet des ombres portées notamment par les bâtiments et le feuillage, qui n'est pas modélisable : cet effet joue notamment dans les canyons urbains, mais de façon différenciée selon la hauteur des bâtiments et la largeur des rues. Par ailleurs, les toitures végétalisées ponctuelles ont une très faible influence sur les températures locales au sol, ce qui n'exclut pas que les grandes surfaces de toits végétalisés puissent avoir un effet sur la surface des rues. À Rosny-sous-Bois, des capteurs ont été disposés sur des toits minéraux et des toits végétalisés de même hauteur et de même exposition, entre lesquels des différences de 0,2 °C à 0,3 °C ont été relevées : même en tenant compte des marges d'erreur, il est imaginable que les surfaces végétalisées de grande surface puissent entraîner des variations du rayonnement issu des toitures. Les grands parcs ont un effet sur les îlots, mais assez peu sur les habitants, sauf lorsqu'ils les fréquentent en journée. Les petits parcs intégrant des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales ont une incidence sur les quartiers, les rues et les bâtiments proches à une échelle assez réduite mais significative.

L'étude a débouché sur des propositions opérationnelles. Elle préconise l'utilisation, dans les canyons urbains, de matériaux à fort albédo, l'arrosage des surfaces (afin de favoriser l'évaporation), et la végétalisation des sols et des façades. Elle soutient donc la création de grands parcs et de rues ombragées, la réouverture et la renaturation de rus jusqu'ici enterrés, la création de zones de gestion alternative des eaux pluviales, le développement de toitures végétalisées de qualité, mais aussi, de façon générale, une gestion légère et adaptée favorisant la biodiversité. Ces mesures ont l'avantage de concourir au renforcement des trames vertes et bleues urbaines, à condition, notamment, de faire appel à des espèces locales adaptées. L'étude recommande aussi une communication adaptée afin que les habitants intègrent le changement.



*La cité Floréal de Saint-Denis a été équipée d'une zone végétalisée qui peut être inondée sans empêcher le déplacement des riverains. Grâce à l'évapotranspiration, elle participe à la lutte contre l'îlot de chaleur urbain, qui est un phénomène très local.*

# MULTIFONCTIONNALITÉ DES ÉCOSYSTÈMES URBAINS DANS LA LUTTE CONTRE LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

---

*Les travaux scientifiques sur les liens entre climat et écosystèmes en ville sont pour la plupart récents. Une méta-analyse récente montre que les effets locaux de la végétalisation contre les îlots de chaleur sont établis, mais qu'il n'est pas possible pour autant de proposer des recommandations de portée générale. Il demeure aussi difficile de proposer une analyse et des propositions pour des aménagements urbains aptes à délivrer conjointement des services écosystémiques multiples, car les villes forment des écosystèmes très différenciés pouvant intégrer des parts très variées de surfaces végétales ou de surfaces consacrées à l'industrie. Par ailleurs, une étude pointe le fait que les incertitudes sont fortes quant aux impacts de la végétalisation sur les émissions de GES et sur la pollution de l'air et de l'eau. L'iEES Paris a aussi mené plusieurs études notamment sur la fonctionnalité des sols urbains, sur l'impact des fortes chaleurs urbaines sur le développement des arbres et sur l'impact des toitures végétales sur le stockage de carbone et sur le rafraîchissement. D'autres études en cours cherchent à proposer des cartographies et des indicateurs opérationnels aux décideurs et aux aménageurs. Les résultats de ce type d'étude sont le plus souvent complexes et incitent à effectuer des choix de gestion nuancés en fonction des compromis recherchés.*

---

**Jean-Christophe LATA** Institut d'écologie des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), université Pierre et Marie Curie

Les relations entre climat, écosystèmes et villes sont extrêmement complexes et nécessitent encore de nombreux travaux scientifiques. Certains travaux sont néanmoins assez anciens. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le médecin new-yorkais Stephen Smith avait déjà identifié une surmortalité durant les excès de chaleur et déposé dès 1899 un projet de loi proposant la végétalisation en tant que remède face aux chaleurs urbaines estivales, sans en négliger les avantages ornementaux.

De nombreuses publications scientifiques sont disponibles sur les îlots de chaleur urbains, notamment en Europe et en Amérique du Nord, mais non exclusivement. Les effets locaux sont désormais bien connus, tout comme le fait qu'il est possible de remédier en partie à ces effets à travers la végétalisation. Une méta-analyse de Bowler *et al.* (2010) a ainsi établi que les parcs urbains peuvent rafraîchir la température locale par rapport à la température urbaine moyenne, mais qu'en revanche, ces études concernent un petit nombre de sites répartis dans des villes aux climats variés (tropical, tempéré, désertique, etc.) et qu'elles ne permettent donc pas de proposer des recommandations spécifiques. L'état de la connaissance est donc

complexe, tout comme les effets étudiés. Une thèse portant sur la réaction des sols franciliens face à la multiplication future des événements climatiques extrêmes a comparé les réactions de sols de systèmes agricoles raisonnés sous couvert végétal permanent et celles de sols intensifs, et a fait ressortir que les premiers sont moins résistants aux sécheresses et aux pluies intensives et qu'il relarguent plus de GES, ce qui est loin d'être intuitif.

Compte tenu du fait que les villes hébergent désormais la majorité de la population mondiale, de nombreux auteurs les considèrent comme des laboratoires du développement durable, les écosystèmes urbains devant être de plus en plus aptes à fournir des services aux populations. Ces fonctions rappelées par le *Millennium Ecosystems Assessment* sont néanmoins diverses – régulation de la biodiversité, des ressources hydriques, du microclimat, séquestration du carbone, production alimentaire, éducation des citoyens – et les chercheurs considèrent qu'il faut à présent intégrer les processus à l'œuvre pour étudier comment mettre en place des compromis multifonctionnels entre services écosystémiques : c'est notamment l'objet de l'article de Lovell *et al.* (2013). Cette approche multifonctionnelle est pour

l'instant surtout appliquée aux agroécosystèmes, et il faut à présent développer des stratégies de recherche pour développer ces approches en ville, ce qui s'annonce difficile pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les écosystèmes urbains sont très diversifiés. Les surfaces végétalisées représentent ainsi 20 % de la surface de la ville à Paris et 40 % à Londres, et varient beaucoup selon les villes des États-Unis. Il en va de même du tissu industriel, qui peut être intégré à la ville de façon plus ou moins forte – et dont la présence est majeure par exemple dans les villes sibériennes. Dans ce dernier cas, les mesures d'atténuation du changement climatique peuvent aussi jouer un rôle sur le microclimat et sur les pollutions urbains. À Tomsk et à Blagovetchensk (Sibérie), les prélèvements de sol et de plantes permettent de mesurer l'impact des polluants selon l'orientation par rapport aux cheminées d'usines, donc d'effectuer des préconisations en matière de végétalisation et de réduction des émissions de polluants.

À Stockholm, une étude a été menée sur les composantes vivantes (arbres d'alignement, forêts, lacs...) et sur les services associés, qui diffèrent selon les surfaces et le type de composantes, ce qui permet de penser une gestion fonctionnelle de la ville. De façon générale, il faut être en mesure d'appréhender les services, les disservices et les compromis envisageables. Ainsi, l'utilisation de l'eau pour favoriser la végétation produit de nombreux services en ville (rafraîchissement, tamponnage des eaux, bénéfiques esthétiques, etc.), mais réduit la part d'eau disponible alors que la ressource tend à se raréfier. C'est pourquoi Pataki *et al.* ont, en 2011, établi un bilan des services et disservices écosystémiques urbains pour un ensemble de villes, ainsi que le niveau des incertitudes, qui sont élevées notamment quant à la production des GES et à l'atténuation de la pollution atmosphérique et de l'eau. L'article souligne qu'il faut donc multiplier les études fonctionnelles pour réduire le niveau d'incertitude, notamment en termes de biogéochimie et de microbiologie urbaine.

Ramirez *et al.* ont, en 2014, étudié la richesse en micro-organismes des sols de Central Park de New York, et ont montré que ceux-ci sont similaires à la biodiversité globale des sols d'une prairie naturelle située autour de la ville. Il reste à déterminer si ce parc stocke ou dégage du carbone, et à quel niveau. L'iEES Paris a également mené plusieurs études en écologie urbaine. L'une d'elle s'est intéressée à l'évolution des systèmes arbre-sol liés aux arbres d'alignement de Paris, et a porté sur des Tilleuls argentés situés intra-muros et

âgés de 10 ans environ à un siècle. Elle montre que les sols des arbres anciens sont très fonctionnels, stockant carbone, azote et nutriments, bien qu'ils accumulent des polluants inorganiques (Zinc, notamment) dans le temps. Une deuxième étude vise à connaître l'utilisation de l'eau liée à la croissance des arbres parisiens, à connaître les réponses des arbres face au changement climatique, aux maladies et aux pollutions, et à cerner le rôle positif ou négatif de ces réponses sur le rafraîchissement. Toujours en étudiant les tilleuls, cette étude dendroclimatologique a pour but d'étudier le lien entre le développement des arbres et les épisodes de fortes chaleurs, et son impact sur les services d'évapotranspiration. L'iEES Paris a par ailleurs testé l'impact des toits verts afin de savoir s'ils sont efficaces, s'il faut mettre en œuvre des compromis entre services écosystémiques, et s'il est possible de les améliorer en utilisant des sols naturels et en testant l'impact de leur profondeur : il ressort de cette étude que le stockage de carbone est maximal pour les sols artificiels profonds, mais que le potentiel de rafraîchissement est obtenu avec des sols naturels peu profonds. Il faudrait donc définir un compromis entre ces deux services (au moins), en tenant compte des coûts.

Ce type d'études portant sur l'intrication des services et disservices écosystémiques vise à fournir des indicateurs applicables dans les décisions d'urbanisme. Certains sont déjà disponibles : un article de Lovell *et al.* (2013) a associé des indicateurs fonctionnels approximatifs à différents types de paysages urbains. Mais il faut encore aller plus loin, notamment en utilisant des modèles s'appuyant sur l'analyse des cycles de vie et sur celle des émissions régionales, qui permettent de développer des cartographies portant plusieurs indicateurs. Il est ainsi possible de dresser les cartes de hausse du risque de cancer et d'écotoxicité liées plusieurs types d'émissions de polluants, ce qui permet de préconiser des actions préventives et curatives. Il est aussi envisageable de créer des cartes d'émission de respiration des sols, de stockage de carbone, de dépollution de l'eau, etc., pour chiffrer les effets. Enfin, de nombreux projets se développent pour soutenir l'intrication du vivant et de la ville, mais la plupart d'entre eux ne reposent pas sur de réelles mesures des fonctions, alors que l'iEES a déjà pris des initiatives concrètes en ce sens. Cela semble de plus en plus important pour défendre la pertinence des projets.

Ces démarches rigoureuses introduiront bien entendu de la complexité. Ainsi, il semble globalement favorable d'introduire des arbres pour rafraîchir les villes, mais l'article de Dusza *et al.* (2014) indique que les arbres ralentissent les vents, donc la dilution des polluants aériens !

# CADRE RÉGLEMENTAIRE EN SCIENCES POUR L'UTILISATION DES ORGANISMES EN INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE

---

*Du point de vue juridique, le développement durable repose essentiellement sur les principes de prévention et de précaution, la majorité de la réglementation reposant sur la transposition des textes du droit international de l'environnement, tels que la Convention sur la diversité biologique ou la Convention sur les changements climatiques. En France, ces textes sont complétés par la Charte de l'environnement et par les Codes de l'Environnement, de l'Urbanisme ou de la Santé publique. Dans ce contexte, les interventions en ingénierie écologique doivent respecter des réglementations variées concernant les lieux de prélèvement, les espèces prélevées, les conditions de transport des organismes vivants, et également celles de leur introduction expérimentale ou opérationnelles dans le milieu naturel. à toutes ces étapes, il convient de procéder à une analyse des risques dont les méthodes mériteraient d'être harmonisées, mais qui doit être rendue publique. Le non-respect de la réglementation expose à des sanctions civiles voire pénales ainsi qu'au versement de réparations. La réglementation internationale interdit par ailleurs de façon de plus en plus stricte les interventions globales en matière de géo-ingénierie.*

---

**Jean-Patrick LE DUC** Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN)

Les aspects réglementaires peuvent paraître rébarbatifs, mais ils sont essentiels, en particulier pour les aménageurs. Le cadre juridique ne vise pas uniquement à contraindre et à poser des limites à l'action, mais aussi à protéger les scientifiques, les populations et l'environnement. Les deux principes à l'œuvre sont ceux de la prévention et de la précaution. Le premier a été adopté formellement en 1972, lors de la conférence de Stockholm et consiste à éviter les problèmes plutôt que d'avoir à les réparer. Le second a été formalisé à Rio en 1992. Alors que le principe de prévention concerne des risques connus, le principe de précaution s'applique lorsque le risque est inconnu. Le développement durable repose sur ces deux principes auxquels s'ajoutent la préservation des ressources naturelles et la participation de la population aux choix qui les affectent.

L'utilisation d'organismes vivants dans le cadre de l'ingénierie écologique nécessite le plus souvent de prélever, de transporter des organismes et parfois de les manipuler avant de les relâcher dans le milieu après les avoir reproduits ou non.

Le prélèvement est soumis à la réglementation du lieu d'origine, et rencontre donc les droits du propriétaire,

dont il faut généralement obtenir l'autorisation. Certains lieux tels que les terrains militaires possèdent une réglementation spécifique, mais il faut surtout tenir compte des statuts de protection (restrictions d'accès, de prélèvement) à l'œuvre par exemple dans les parcs nationaux et réserves naturelles ou au nom des arrêtés de biotope, des zones Natura 2000, etc. Il faut aussi, dans certains cas, tenir compte des coutumes locales, notamment dans les DOM-TOM en France. D'autres réglementations sont liées à l'espèce à prélever, qui peut faire l'objet d'une protection totale ou partielle. En matière de reproduction des organismes (culture ou élevage), il faut respecter les réglementations sanitaires et celles sur le bien-être animal.

Le transport des organismes vivant est strictement réglementé, y compris pour des animaux tels qu'insectes ou coquillages. La *Live animal regulation* s'applique en cas de transport aérien dans le monde entier. En cas de manipulation *ex situ*, il faut respecter le droit sur les agents pathogènes, qui classe les risques de sécurité biologiques des niveaux P1 à P4. Il convient aussi de tenir compte de la sécurité des personnes et de la prévention des risques d'évasion et de dissémination hors du laboratoire. Enfin, le relâcher en milieu plus ou moins naturel peut être accidentel ou volontaire,

mais dans ce dernier cas peut être expérimental ou non et nécessite dans le premier cas des autorisations.

À toutes les étapes de ce type de projets, l'évaluation des risques est fondamentale, mais s'avère très difficile en pratique. À ce jour, les méthodologies appliquées sont très variées, non harmonisées, et reposent rarement sur des certitudes. Les évaluations sérieuses doivent faire l'objet d'une revue par les pairs et nécessitent des équipes pluridisciplinaires (biologie, écologie, économie, sciences humaines, etc.). Cette analyse de risques doit aussi être partagée publiquement, surtout si l'analyse a été financée sur des deniers publics. Ceci n'est pas simple, car ces documents sont techniques et peuvent être mal interprétés, y compris par la presse, par le grand public et par les décideurs : il faut donc utiliser un langage adapté aux différents types de publics. En matière d'ingénierie écologique, les risques sont d'ampleur locale, mais pour le moment, leur évaluation reste très rare. Celle-ci semble pourtant nécessaire, car si l'ingénierie écologique intervient pour l'essentiel sur des milieux artificialisés, les écosystèmes ne sont pas isolés et des impacts potentiels existent donc pour les milieux naturels.

Le non-respect de la réglementation peut entraîner des sanctions financières, mais aussi pénales, et le droit prévoit aussi la réparation des dommages, qui est le plus souvent bien plus élevée que les amendes. Les dommages pris en compte sont ceux subis par les personnes, par les activités économiques et par l'environnement.

La plupart des législations nationales reposent sur la transposition de textes internationaux. Les cinq principales conventions en vigueur sont la Convention sur la diversité biologique, la Convention sur les changements climatiques, la Convention sur le commerce international des espèces de faune et de flore sauvages menacées d'extinction (CITES), la Convention sur le droit de la mer et la Convention d'Aarhus.

La Convention sur la diversité biologique (CDB) vise à préserver la biodiversité, à permettre l'utilisation durable de ses éléments et à assurer un partage juste et équitable des revenus résultant de l'exploitation des ressources génétiques. Elle a été adoptée par 168 pays du monde à l'exception notable des États-Unis, du Pakistan et de l'Andorre, et est assortie du protocole de Carthagène, qui a pour but de prévenir les risques biotechnologiques, bien que la réglementation hors législation des organismes génétiquement modifiés (OGM) soit généralement très faible. Un protocole supplémentaire définit les manières d'assumer les responsabilités et de réparer les éventuels dommages. Le protocole de

Nagoya, signé par 53 États, concerne quant à lui l'accès et le partage des avantages résultant de l'utilisation des ressources génétiques. La CDB prévoit notamment que l'utilisation des biotechnologies doit prendre en compte les risques d'effets défavorables sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité.

Hormis ces textes, les conférences des parties prennent un certain nombre de décisions, qui concernent de plus en plus la géo-ingénierie. La décision 9-16 affirme qu'en application du principe de précaution, la fertilisation des océans ne sera pas mise en œuvre en l'absence de fondement scientifique, à l'exception de recherches scientifiques devant être justifiée et accompagnée d'une évaluation préalable et approfondie des risques potentiels. La décision 10-33 reprend ces principes et affirme qu'aucune activité de géo-ingénierie liée au changement climatique ne pourra être entreprise tant qu'il n'existera pas de base scientifique, en prévoyant des dérogations très encadrées à des fins de recherche. La décision 11-20 définit précisément la géo-ingénierie liée au changement climatique et prévoit les mesures spécifiques à mettre en place en la matière en coopération avec le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), la définition apportée étant actuellement précisée par des groupes de travail conjoint CDB-GIEC pour affiner les contours du moratoire prononcé. Cette décision ajoute aussi, entre autres, que la façon dont les services écosystémiques pourraient être affectés par les projets de géo-ingénierie est inconnue, tout comme leurs effets voulus et non-voulus, et prend acte de l'absence de mécanismes de contrôle et de réglementation scientifique en ce domaine. Plusieurs textes de l'Assemblée générale des Nations unies se réfèrent aussi au principe de précaution en ce qui concerne la géo-ingénierie.

En France, les textes-sources sont la Charte et le Code de l'Environnement, mais aussi le Code de la Santé ou de l'Urbanisme. La première est adossée à la Constitution et établit en droit français l'obligation de prévention des effets négatifs, constitutionnalise le principe de précaution et met d'accent sur le rôle des scientifiques pour étudier et proposer des solutions adaptées en matière d'environnement.

Malgré ces avancées, beaucoup reste à faire en matière d'analyse et d'évaluation des risques, notamment en termes de méthodologie, de façon à harmoniser les démarches et à être ainsi plus efficaces. Il faut mettre en place des législations nationales pour pouvoir appliquer le droit, et mettre en place des procédures de contrôle effectives. Il faut aussi former les personnels juridiques et techniques à l'environnement.

# L'EXEMPLE DU PRIX COAL ART ET ENVIRONNEMENT

---

*Depuis une dizaine d'années, Alice Audouin s'est investie dans plusieurs initiatives en faveur du lien entre art et développement durable, par exemple à travers la remise du prix COAL Art et Environnement, qui est décerné en présence de scientifiques. Ces derniers sont très sensibles au rôle que les artistes peuvent jouer dans la propagation des messages sur la situation et les risques écologiques. à travers des moyens variés, de nombreux artistes font désormais le lien entre leurs démarches créatives et l'alerte du public sur les problèmes environnementaux locaux et globaux – notamment les créateurs impliqués dans Art of Change 21. Par ailleurs, le projet Art of Change 21, soutenu par le ministère des Affaires étrangères et par l'ADEME, réunit 21 artistes ainsi que des experts et des entrepreneurs post-carbone. Les artistes concernés se sont réunis pendant deux jours en conclave pour proposer finalement l'action « What can you do to positively fertilize Cop 21? ». Ces initiatives illustrent le fait qu'il est impossible et nuisible d'opposer nature et culture, les êtres humains étant caractérisés par leur double dimension intrinsèquement biologique et culturelle. Les actions artistiques favorisant une prise de conscience publique peuvent donc être particulièrement efficaces.*

---

**Alice AUDOUIN** présidente d'Art of Change 21

**D**epuis une dizaine d'année, Alice AUDOUIN est investie en faveur du lien entre art et développement durable, essentiellement en ce qui concerne les problématiques de la biodiversité et du climat. En 2004, elle a organisé le colloque international de l'Unesco « L'artiste, partie prenante », qui a réuni des artistes qui travaillaient sur les répercussions des modes de vie et de production actuels. En 2008, elle a cofondé puis présidé l'association Coalition pour l'art et le développement durable (COAL), qui décerne en France le prix COAL Art et Environnement, et qui a organisé de nombreuses expositions, dont la dernière, Vivre, portait sur le thème de l'alimentation vu par les artistes. Luc Abbadie est intervenu comme d'autres scientifiques lors de la remise du prix COAL 2014, pour mettre en perspective la ville de Paris sous un angle environnemental, ce qui a beaucoup marqué les artistes. Luc Abbadie a notamment fait valoir que les scientifiques se sentaient impuissants pour faire saisir l'ampleur des changements en cours, et que les artistes étaient indispensables pour s'adresser à la société. D'autres scientifiques tels que Nathalie Frascaria-Lacoste sont très intéressés par des approches transfrontières et par les façons multiples de sensibiliser le public sur les enjeux écologiques. Et pour la première fois, le quotidien *Libération* a ainsi mis à sa une le titre « *Climat, les artistes, s'engagent* ».

La plupart des artistes cités ci-dessous travaillent déjà en lien avec des laboratoires de recherche et sont tous très désireux de travailler avec des scientifiques. Ils

disposent déjà d'un important bagage dans les domaines des sciences de l'environnement et du vivant.

Brandon Ballengée est docteur en biologie et artiste et a notamment observé de nombreux spécimens de batraciens malformés. Il a dans un premier temps fait appel à un protocole de science participative pour identifier la cause de ces malformations, puis, après analyse des milieux, il a pu déterminer les pollutions chimiques qui en sont à l'origine. Cela a permis de faire le lien avec les pratiques agricoles, puis avec les comportements alimentaires, et d'impliquer les observateurs participants dans un cercle de responsabilité élargi leur permettant de prendre conscience des chaînes d'interdépendance à l'œuvre. Même des personnes très éloignées des questions d'écologie arrivent à être touchées par le sort de ces animaux et à faire le lien entre leurs pratiques d'achats alimentaires et l'environnement. Le recours à des images animales permet ainsi aux personnes de se projeter et d'être sensibilisées de façon très efficace à des causes qui, d'ordinaire, ne les affectent pas.

Natalie Jeremijenko est aussi une artiste reconnue et a créé le design de l'*Environmental Health Clinic* de New York, où des conseils de santé environnementale sont prescrits. Elle est initialement ingénieur et professeur à l'université de Yale, et est à présent membre du département des arts à l'université de New York. Elle a notamment mis en place des *Butterfly bridges* pour contribuer au développement des corridors

écologiques urbains, a conçu des cinémas pour les animaux nocturnes et allie de façon générale performance environnementales et effets visuels. Elle a créé les *Phenological clocks*, représentations circulaires et colorées de la production des pollens au cours de l'année dans différents lieux (par exemple en Arizona) et souhaite qu'elles soient développées sous des formes multiples : affichages urbains, montres... Elle aimerait mettre en place ce type de projet avec des scientifiques fin 2015 dans le cadre de la conférence climatique de Paris, ce qui peut contribuer à des prises de conscience des impacts du changement climatique sur la vie.

Asa Sonjasdotter est lauréate du prix COAL 2014. Elle a retracé l'histoire de la pomme de terre, veut recenser toutes ses variétés et relancer sa culture à Paris pour soutenir la résilience de la ville, en rappelant qu'elle a été plantée durant la Révolution Française et que cela a alors joué un rôle important.

Olivier Darné est artiste et apiculteur et vient d'installer une banque de reines à Paris, constatant que celles-ci vivent mal en milieu rural et qu'elles peuvent bénéficier d'une clinique en ville, où elles sont moins menacées en l'absence de l'usage de pesticides. Il produit un « miel Béton » de très grande qualité.

Zhao Renhui a développé plusieurs projets, dont l'œuvre *Half way to heaven*, installée au Colorado elle s'intéresse au papillon *Uncompahgre fritillary* (*Boloria acrocneoma*), espèce endémique des montagnes du lieu menacée par le réchauffement climatique, et dont les stations se sont élevées au fil de l'élévation des températures. Ces papillons vivent à présent au sommet des montagnes : l'artiste souligne donc que ces lépidoptères ne pourront bientôt plus aller nulle part. Barbara Kingsolver évoque ces menaces dans son roman *Dans la lumière*.

Lionel Sabatté a réalisé une sculpture d'une meute de douze loups avec de la poussière récoltée dans la station de RER Châtelet à Paris. Chacun de ces loups porte le nom du mois au cours duquel a été ramassée la poussière, qui porte des traces de pollens saisonniers. Ce sculpteur s'intéresse aux traces des organismes vivants dans l'espace (cheveux, etc.) et imagine que ces loups puissent à l'avenir transmettre de très nombreuses informations à ceux qui les découvriront et les analyseront.

Avec d'autres artistes, Lucy et Jorge Orta proposent aux détenteurs d'affiches qu'ils produisent à partir de terrains d'Amazonie de s'engager via un certificat de défense des parcelles dont elles sont issues.

L'Antarctique est une région encore non partagée par les États et représente un point de bascule fondamental pour le changement climatique. Il est possible de télécharger un *Antarctica World Passport* signé par un Lucy et Jorge Orta sur [www.antarcticaworldpassport.com](http://www.antarcticaworldpassport.com) pour défendre l'idée d'un bien commun, d'un partage des ressources soutenable et de la libre circulation des personnes dans le monde. Ce collectif proposera des actions pendant la Cop 21.

Durant cette conférence, Naziha Mestaoui proposera quant à elle de télécharger une application mobile qui permettra de planter un arbre. Celui-ci apparaîtra virtuellement sur l'édifice parisien retenu et des forêts se dessineront ainsi au fur et à mesure que les participants planteront leurs arbres. Ce projet montrera le lien entre reforestation et lutte contre le changement climatique. Il se développe en partenariat avec Purprojet, initiative de Tristan Lecomte qui prend en charge des actions de reforestation incluant notamment l'agroforesterie.

Thierry Boutonnier a travaillé avec des élèves sur le thème de l'entomophagie, et a notamment créé la recette Henry Grillon. L'objectif est de faire goûter cette nouvelle gastronomie pour susciter le débat sur l'évolution future de l'alimentation dans le cadre du changement climatique.

Le projet *Art of change 21* ([www.artofchange21.com](http://www.artofchange21.com)) s'appuie sur des artistes très impliqués sur les enjeux et les solutions de la crise environnementale, sur des entrepreneurs sociaux, sur des entrepreneurs de l'univers post-carbone et sur des jeunes qui développent des nouvelles formes de mobilisations pour le climat. Miriam Allam est ainsi en Égypte, la pilote du plus grand mouvement de jeunes du Moyen-Orient, en lien avec l'Afrique, sur le changement climatique. Benjamin Knight est en Nouvelle-Zélande le fondateur de Loomio, un des principaux logiciels actuels de démocratie participative pensé pour permettre l'intervention des citoyens à la transformation du monde. Nathalie Jeremijenko participe aussi à ce mouvement, tout comme Wans Tianju, directeur des campagnes de *Green Innovation Hub*, l'une des principales ONG de Chine. Laurent Tixador est un artiste français qui met en œuvre le Zéro Impact : il se déplace à pied, et vit des performances en s'installant sur des terrains et en y vivant le plus longtemps possible avec les moyens à sa disposition ; il se pose aussi des défis tels que le fait de passer une nuit avec cent moustiques. David Kobia met en œuvre le *Crowdsourcing* auprès d'entrepreneurs sociaux au Kenya et aux États-Unis, et Linh Do a reçu plusieurs prix environnementalistes notamment pour

avoir créé la campagne *One million bulbs*, qui a permis de lutter contre les ampoules à incandescence. Tariq Al-Olaimy est très engagé dans la campagne *Adopt a negotiator*, mais est aussi fondateur de la première société pour la biodiversité et la lutte contre le changement climatique au Bahreïn. Slater Jewell-Kemker est une jeune réalisatrice canadienne qui a réalisé le premier film sur la jeunesse et le climat, *An inconvenient youth*. Cédric Carles a inventé le *Solar sound system*, qui organise des soirées musicales alimentées par des panneaux photovoltaïques ou par des vélos. Luhui Yan est le PDG fondateur de *Carbonstop*, première entreprise développant des stratégies à bas carbone en Chine. Pierre de Vallombreuse est un grand photographe français des peuples autochtones. Yann Toma prévoit de vendre la tour Eiffel à énergie positive lors de la Cop 21. Juliette Decq est la directrice de *Cop in my city*, qui effectue des simulations des négociations du climat par et pour les jeunes.

En tout, 21 personnes sont membres de Art of change 21, qui est parrainé par Ola Olafur Eliasson et par Christian Lecomte. Il est organisé à la fois par le comité interministériel de la COP 21 et par l'ADEME, avec la conviction qu'il faut utiliser de nouveaux moyens – collaboratifs – pour parler des enjeux de demain. Il s'agit de réunir des accélérateurs du changement à partir de ce logiciel collaboratif. Ces 21 personnes ont été réunies pour réfléchir pendant deux jours en conclave, en mettant à l'œuvre une méthodologie très précise de co-création. Ensemble, ils ont mis sur pied l'action *What can you do positively fertilize COP 21?* Un comité d'experts entoure la démarche et compte notamment Sylvie Bénard, directrice de l'environnement de LVMH, Paul Ardenne, critique d'art, et François Gemenne, l'un des spécialistes de la diplomatie climatique. Une des actions se nomme Maskbook et partira de Chine, pour propager les masques anti-pollution de Pékin à l'échelle internationale. Ces actions rencontreront la biodiversité grâce à l'intervention *Bridges*, qui s'appuiera sur la construction de ponts en différents lieux, pour symboliser le pont entre les négociateurs et la société civile, et avec les poches d'innovation. *World COP* proposera d'inaugurer la COP 21 en mette en scène des jeux très comiques détournant par exemple les paris sportifs. Le projet Cal(ire) permettra à chaque citoyen d'identifier l'impact carbone et de la compenser par de multiples actions liées en particulier à la biodiversité.

De façon générale, il ne faut pas opposer nature et culture. Les êtres humains n'ont pas seulement besoin d'espaces naturels et d'objets de consommation, mais aussi de culture et d'art. Défendre la nature est

indispensable pour que les êtres humains puissent accéder à la nature et exprimer pleinement leurs capacités. Malheureusement, les crédits publics et privés disponibles pour faire le lien entre nature et culture sont très rares. La COP 21 prend pour la première fois cette relation en considération, mais les sommes en jeu sont minimales. Ceci étant dit, les actions culturelles peuvent être extrêmement efficaces si elles permettent de mobiliser les consciences et de faire évoluer les représentations de la nature, ce qui permet de s'investir pour sa protection. Pour cela, les œuvres d'art peuvent jouer un rôle considérable, en introduisant le sort d'espèces souvent négligées dans une narration commune – par exemple en utilisant le dessin animé pour rapprocher le sort des espèces animales et végétales de celles de grands héros humains. Et dans tous les cas, les artistes et les scientifiques ont besoin de se rapprocher toujours davantage pour qu'il soit possible de concevoir des œuvres et de véhiculer les messages les plus pertinents et les plus en phase avec l'état de la recherche.

# INGÉNIERIE ÉCOLOGIQUE VERSUS GÉO-INDUSTRIE

*Les participants se sont interrogés sur les origines, les présupposés et les objectifs de l'ingénierie écologique face aux projets récurrents de la géo-ingénierie, en particulier depuis les années 70. S'il s'agit dans les deux cas d'intervenir sur les trajectoires suivies par les systèmes vivants, plusieurs caractéristiques opposent les deux démarches. La géo-ingénierie vise à intervenir sur des paramètres environnementaux à l'échelle planétaire, notamment pour modifier artificiellement le climat par des moyens chimiques et physiques. L'ingénierie écologique se fonde quant à elle sur la science écologique et sur des moyens essentiellement biologiques pour orienter localement les écosystèmes selon les trajectoires souhaitées. Une grande différence apparaît donc dans la philosophie sous-jacente à ces deux démarches, la géo-ingénierie visant à prolonger l'alliance entre la science et la technique et la foi en un progrès illimité, alors que l'ingénierie écologique part du principe que les sociétés humaines font partie des écosystèmes. L'ingénierie écologique, en outre, ne prétend pas intervenir au niveau global et est très attentive aux boucles de rétroaction que les interventions humaines peuvent déclencher, alors que la géo-ingénierie ne s'appuie que sur la manipulation d'un paramètre sans faire appel à des raisonnements proprement écologiques, c'est-à-dire systémiques. Les milieux proposant les solutions de la géo-ingénierie sont en outre souvent proches des milieux climato-sceptiques des États-Unis. Les différences entre les deux approches apparaissent donc à la fois techniques, politiques et éthiques. En effet, il est inenvisageable de prendre des décisions de géo-ingénierie dans le cadre de systèmes démocratiques. Il serait en revanche souhaitable d'adapter le serment d'Hippocrate pour mettre en place une authentique déontologie de l'ingénierie écologique.*

Modératrice : Nathalie FRASCARIA-LACOSTE, Laboratoire d'écologie, systématique et évolution (ESE),  
Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique (Gaié)

**Régis BRIDAY** Centre Alexandre Koyré,  
École des hautes études en  
sciences sociales (EHESS)

La géo-ingénierie peut être définie comme l'ensemble des techniques visant à modifier intentionnellement un ou plusieurs paramètres environnementaux planétaires. Depuis les années 70, elle est évoquée au titre de technologies pour s'opposer au changement climatique, mais cela n'a pas toujours été le cas.

Dès le XIX<sup>e</sup> siècle, des textes envisagent de modifier l'environnement, surtout face aux effets de la déforestation sur le climat. Et c'est à la fin du XIX<sup>e</sup>, lorsqu'est esquissée une théorie de l'effet de serre, que se développe l'idée d'améliorer le climat à grande échelle. En 1896, Arrhenius, publie un article sur l'impact de la concentration en CO<sub>2</sub> sur la température atmosphérique globale, et juge avec Nils Ekholm, son collègue de l'Académie royale de Suède, que sa hausse permettra d'améliorer le climat sous les hautes latitudes (des pays scandinaves, notamment). En 1910, dans *L'Évolution des mondes*, Arrhenius considère plutôt favorablement la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub>.

C'est durant la guerre froide que les publications prolifèrent. Les sciences belligérantes conquièrent alors l'atmosphère, et la modification intentionnelle du climat et de la météorologie prennent une certaine importance. Si les documents militaires demeurent peu accessibles aux historiens jusqu'à nos jours, ces derniers ont en revanche accès aux revues scientifiques de l'époque. Celles-ci évoquent la possibilité de modifier le climat en disposant des miroirs géants en orbites, ou en détruisant la stratosphère à l'aide de composés chimiques, ou encore, de modifier le temps grâce à l'injection de fer dans la basse atmosphère (pour générer des nuages)... Dans un contexte de défiance entre les deux blocs, la peur règne de part et d'autre quant à la capacité de l'ennemi à développer des armes climatiques. La plupart des travaux ne sont pas publiés, mais au début des années 60, Harry Wexler, qui est proche de la présidence américaine tout en restant en relation avec certains scientifiques soviétiques, commence à publier des textes sur la dangerosité des armes climatiques. Comme la conquête spatiale, ces travaux sont un moyen de contact entre les deux blocs, qui « permettront » d'organiser l'année géophysique internationale en 1957-1958 : ce sera un événement marquant dans l'histoire des sciences globales.

Dans les années 70, les ingénieries locales et globales reculent. Durant la guerre du Vietnam, les Américains ont pratiqué l'ensemencement des nuages pour embourber les troupes ennemies, et l'on assiste à un tournant en faveur de l'environnement dans l'opinion. Le traité ENMOD est signé en 1977 et entre en vigueur en 1978 ; il interdit l'usage de toute technologie de modification du temps à visée belligérante. La thématique reflue dans la littérature dans les années 70 et 80, ce d'autant plus que la grande majorité des expériences américaines de modification du temps aient été des échecs (toutefois, certains pays dont les États-Unis continuent aujourd'hui d'ensemencer l'atmosphère dans l'espoir de provoquer des pluies bénéfiques aux agriculteurs). Enfin, au tournant des années 90, la question du changement climatique émerge véritablement dans la communauté scientifique et dans l'arène publique : on évoque alors de nouveau des solutions pour capter le CO<sub>2</sub> et pour réfléchir les rayons solaires.

**Luc ABBADIE** Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (iEES Paris), université Pierre et Marie Curie

Dans le cadre du programme interdisciplinaire de recherche Ingénierie écologique du CNRS, l'ingénierie écologique a été définie en 2008 comme l'ensemble des savoirs mobilisables pour la gestion des milieux, pour la conception, la réalisation et le suivi d'aménagements ou d'équipements inspirés de la nature ou basés sur la nature, c'est-à-dire sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques. Cette définition a été centrée sur la notion d'écologie. Il s'agissait de fonder le domaine sur une discipline scientifique et sur une démarche intellectuelle précises afin d'éviter les dérives et de fonder certaines interventions sur la nature sur un savoir scientifique, en se battant en faveur du potentiel d'innovation considérable des techniques qui peuvent y être fondées : gestion des ressources naturelles et des services écosystémiques, restauration écologique, réintroduction d'espèces, etc.

**Catherine LARRERE** université Paris 1, Panthéon-Sorbonne et Fondation de l'écologie politique

Il est crucial de préciser les définitions, car une définition trop générale de l'ingénierie écologique

pourrait inclure la géo-ingénierie, alors qu'il est tout-à-fait possible d'introduire une différence entre ces types de techniques. Une première opposition distingue les opérations locales de l'écologie de la restauration des ambitions globales des interventions sur le climat issues des projets d'origine militaire. Mais au-delà des techniques employées et du degré de scientificité, les projets philosophiques, normatifs et sociaux diffèrent profondément. D'une part, l'ingénierie écologique est apparentée aux travaux d'Odum en écologie systémique et promeut un autre type de relation à la nature : il s'agit d'intervenir sur la nature en sachant que l'homme en fait partie en s'insérant dans des processus déjà existants pour les orienter favorablement, en prêtant une grande attention aux conséquences de ces actions. D'autre part, la géo-ingénierie, présentée parfois comme une solution de dernier recours en cas d'échec des démarches internationales actuelles, vise à prolonger et à amplifier un projet de maîtrise et de domination globale et à l'appliquer au climat, la technique étant présentée comme une solution aux problèmes posés par la technique.

La géo-ingénierie peut apparaître dans un premier temps comme une forme globale d'ingénierie écologique, mais les projets sont très différents, ce que montre bien le livre de Clive Hamilton. Il met en lumière le fait que les milieux américains favorables à la géo-ingénierie sont très liés aux milieux d'affaires climato-sceptiques, ce qui est assez étrange en première analyse. Aux États-Unis, les Républicains dénie globalement la réalité du changement climatique, et se situent dans le paradigme de l'unité formée selon l'Appel de Heidelberg par la science, la technique et l'industrie, qui promeut la poursuite du mouvement économique actuel et qui est hostile à toute forme de réduction des émissions de GES. Cette collusion de fait éclaire l'existence de deux attitudes totalement différentes de la conception du rapport de l'homme à la nature.

**Régis BRIDAY**

L'ingénierie écologique entend parfois « laisser faire la nature », ce qui est assez étrange, car la mise en place de la modernité repose sur un grand partage conceptuel entre nature et culture – qui demande toujours à être précisé en pratique. Il est cependant certain qu'il apparaît compliqué de porter l'écologie de la restauration à un niveau global...

En fait, le niveau global est lui-même un concept nouveau qui est issu de la construction d'un monde

clos durant la guerre froide, grâce à la mise en place des satellites artificiels, des modèles numériques et des réseaux de mesure, ce que l'ouvrage *La Terre vue d'en haut* établit clairement : Sebastian Vincent Grevsmühl y cite notamment un article de la *Geographical review*, qui rappelle que « *les observations et études que nous avons menées lors de l'année géophysique internationale fourniront les données de base sur lesquelles seront bâties les vastes projets d'ingénierie globales du futur.* » La vue de la Terre d'en haut induit la possibilité mentale de la manipuler. Ainsi, le « géo-ingénieur » Lowell Wood a récemment écrit : « *Nous avons construit tous les autres environnements dans lesquels nous habitons, pourquoi pas la Terre ?* » : il est issu du Lawrence Livermore National Laboratory, d'origine militaire, qui a été intégré au programme Climat en 1978 aux côtés du NCAR, de la NASA, etc. Il est l'un des laboratoires qui fournit aujourd'hui le plus grand nombre de modélisations numériques du climat, mais qui continue à modéliser les effets d'interventions de géo-ingénierie et qui diffuse dans plusieurs rapports américains, et même dans les rapports du GIEC, l'idée que celle-ci pourrait être un recours. Le même type de suggestions a aussi été intégré aux rapports *Assessments of ozone depletion*.

Au-delà du monde militaire, des entrepreneurs tels que David Keith commencent à partir des années 90 à apparaître. Celui-ci a introduit la géo-ingénierie dans le rapport de 2001 du GIEC et a développé une *start-up* de capture du CO<sub>2</sub> dans l'air. Il n'est en outre guère surprenant que des *think tanks* néolibéraux et conservateurs des États-Unis commencent à s'intéresser à la question dans le contexte du climato-scepticisme. L'Union européenne ne se prononce pas véritablement jusqu'ici.

## Luc ABBADIE

L'Agence nationale de la recherche (ANR) a financé un atelier de réflexion prospective piloté par Olivier Boucher, du Laboratoire météodynamique (un des principaux organismes qui met en œuvre des modèles prédictifs). Cet atelier pluridisciplinaire a posé un état des lieux de l'ingénierie écologique et a lancé des préconisations de programmes de recherche auprès de l'ANR. Cet atelier a conclu que la géo-ingénierie est essentiellement une activité d'apprentis sorciers ambitionnant d'intervenir sur des systèmes de très haute complexité, les conséquences d'erreurs en la matière étant plus que catastrophiques. Tous les types d'actions envisagées comportent des risques d'ampleur colossale qui ne peuvent être encourus. Il faut donc adopter une vigilance extrême et ne favoriser en

aucune façon ce type d'interventions. Ces conclusions ont été unanimes.

Cependant, il faut regretter que les différences entre l'ingénierie écologique et la géo-ingénierie puissent apparaître finalement minces. Dans les deux cas, l'approche adoptée est réparatrice et vise à améliorer les services écosystémiques, et parfois à créer des systèmes totalement nouveaux pour répondre à des problèmes d'environnement. La géo-ingénierie et l'ingénierie écologique associent toutes deux des interventions sur le vivant et des interventions physico-chimiques faisant appel à la technologie pour remettre en marche des dynamiques biologiques. Il existe donc une différence de degré, donc de risques encourus, car l'ingénierie écologique agit à petite échelle alors que la géo-ingénierie souhaite intervenir à l'échelle planétaire. Il faudrait donc dans les deux cas adopter le même type de raisonnements qu'en matière de biotechnologies en général : car l'ingénierie écologique consiste à manipuler le vivant à l'échelle des populations, des communautés ou des écosystèmes, alors que d'autres manipulations concernent l'embryon ou les gènes. Les risques et problèmes éthiques et politiques sont du même ordre et doivent être abordés de la même manière. Depuis la prise de position d'Odum et de Mitch et le pacte américain d'ingénierie écologique des milieux humides, la définition de l'ingénierie écologique a été fondée sur le respect de l'approche systémique, mais aussi, sur des considérations éthiques en faveur des bénéfiques pour les êtres humains et pour la nature. Cette position parfois exprimé de façon maladroite est constante, mais elle complique le débat. L'ingénierie écologique n'est pas qu'une position technique, et ses principes éthiques implicites pourraient parfaitement constituer les bases de sa déontologie opérationnelle : il s'agirait alors de l'utiliser pour reconstruire une co-évolution entre l'homme et la nature.

## Catherine LARRERE

Je ne pense pas que la différence entre géo-ingénierie et ingénierie écologique ne soit qu'une question d'échelle. Elles se distinguent par la prise en compte (ou non) des conséquences secondaires des interventions au-delà de l'objectif visé. Les présentations de la géo-ingénierie négligent systématiquement ces risques, qui peuvent déboucher sur une situation pire que la situation initiale. Modifier l'albédo terrestre en envoyant des particules dans la stratosphère diminuerait bien le rayonnement au sol, mais les autres impacts ne sont pas pris en compte. À l'inverse,

l'ingénierie écologique adopte une approche systémique qui prend d'emblée en compte l'ensemble des effets prévisibles selon l'état de l'art. La différence ne réside pas uniquement dans l'existence de règles éthiques différentes appliquées à la manipulation du vivant, mais dans la philosophie de l'action dans laquelle prennent place ces différentes approches. Sous une appellation commune d'ingénierie écologique, les modalités d'actions dans et sur la nature diffèrent profondément et les projets techniques mobilisés sont absolument distincts.

Par ailleurs, la géo-ingénierie séduit malgré les désastres qu'elle promet, parce qu'elle semble mobiliser les systèmes économique-politiques de la façon la plus légère possible, ce d'autant plus que les actions proposées sont parfois assez peu coûteuses. À l'inverse, les méthodes moins interventionnistes de l'ingénierie écologique exigent des transformations sociales très importantes et obligent à convaincre une large partie de la population pour modifier les modes de vie.

## Luc ABBADIE

La notion de système est centrale dans ce débat, et c'est pourquoi il faut donner son plein sens au terme d'écologie, qui est une science des systèmes complexes. L'ingénierie écologique doit explicitement se référer à cette approche systémique, qui est la seule permettant d'envisager à la fois les effets recherchés et les effets collatéraux et à long terme de l'action projetée. Seule l'approche systémique permet de disposer d'une idée des trajectoires futures, donc des effets indésirables, ce qui permet de prendre des décisions en pleine responsabilité. Elle permet d'apporter un nouveau type de conscience aux décisions affectant la nature, et ce, à toutes les échelles.

## Régis BRIDAY

La notion de système est très attachée aux sciences du vivant. Dans les sciences du climat, les conceptions à l'œuvre demeurent très différentes : les deux communautés sont pourtant intervenues dans le cadre du développement de la vision environnementaliste dans les années 70. Aujourd'hui, les partisans de la géo-ingénierie souhaitent un changement total du système climatique, qui implique des interventions d'entretien sans fin, ce qui est une ineptie. Par exemple, toute incertitude sur les incidences de l'injection

d'aérosols soufrés dans la stratosphère décrédibiliserait pour toujours les processus d'expertise de l'ONU, donc les pourparlers internationaux. La différence entre ingénierie écologique et géo-ingénierie ne concerne pas seulement l'échelle des risques, mais aussi le type de décisions politiques. La géo-ingénierie ne peut être l'objet de décisions démocratiques, puisqu'elle nécessiterait un monde sans tension géopolitique et puisqu'elle semble devoir produire exclusivement des phénomènes irréversibles, alors que l'ingénierie écologique est liée à des territoires dans lesquels elle peut peut-être faire l'objet de délibération et de suivi.

## Catherine LARRERE

Ceci est d'autant plus vrai que les décisions en termes de géo-ingénierie pourraient être l'effet de la décision d'une entreprise et non d'un État.

## Raphaël CHALLIER doctorant

N'est-il pas fondamentalement dangereux de laisser les entreprises gérer les processus écosystémiques ?

## Catherine LARRERE

Pour le meilleur et pour le pire, les entreprises le font déjà. Plus généralement, s'interdire d'affecter le vivant placerait les sociétés dans des situations impossibles. Le vivant, fondamentalement, interagit avec le vivant, et il est même risqué de fixer des limites, car l'histoire montre qu'elles ont systématiquement été franchies par les sociétés. Il faut réfléchir à l'esprit des interventions humaines sur les systèmes et comparer les actions entre elles indépendamment de la notion d'interdiction. Les interventions qui reposent sur des systèmes démocratiques sont préférables à des actions reposant sur un pouvoir total armé d'une science universelle, qui ne sont ni réalistes ni souhaitables. Il faut comparer des politiques globales entre elles, et non des coûts et des avantages pensés de façon isolée. Les effets collatéraux sont inévitables et sont pensés par l'ingénierie écologique, et non par la géo-ingénierie.

## Luc ABBADIE

L'ingénierie écologique est pratiquée par les hommes depuis l'invention de l'agriculture, puis, entre autres, de la foresterie. Aujourd'hui, l'essentiel de l'ingénierie écologique relève de fait de l'initiative privée, y compris en termes de compensation écologique. Il importe donc de réviser son cadrage : aujourd'hui, l'agriculture n'est pas correctement contrôlée par la collectivité et est devenue le premier acteur de destruction de l'environnement à l'échelle planétaire. Le développement actuel de la compensation écologique résulte de l'application plus stricte de la doctrine « Éviter, réduire, compenser », définie par la loi de 1976 et remise à l'honneur par le Grenelle de l'Environnement. Elle a débouché sur la création d'une filiale spécialisée de la Caisse des dépôts et consignations, et d'autres organismes privés sont à présent en train de créer des filiales de ce type ; mais les textes n'ont pas évolué depuis les années 70 et il n'existe pas de cadrage ni de contrôle général des pratiques qui se développent sur le terrain. La question de la mise en œuvre publique ou privée serait moins aiguë si un cadre cohérente existait.

**Mona OMAR** Master 2 IBE de l'université Paris-Est-Créteil

Comment penser les critères de l'ingénierie écologique en milieu urbain ?

## Luc ABBADIE

En ville, les interventions en ingénierie écologique consistent essentiellement à créer des parcs ou des toitures végétalisées et à re-perméabiliser les surfaces pour rétablir le cycle local de l'eau, tout en réinscrivant le territoire urbain dans la dynamique régionale de la biodiversité. Prises séparément, l'efficacité des solutions vivantes urbaines par rapport à leurs alternatives techniques classiques n'est pas systématiquement meilleure pour un service donné. Mais les solutions d'ingénierie écologique sont en revanche multifonctionnelles et abordent l'environnement urbain de façon systémique. Par ailleurs, l'époque est paradoxale, car si un certain consensus se dégage pour modifier les modes de développement et redonner une place plus importante à la nature, la plus grande partie de la population est appelée à vivre en ville. C'est pourquoi il faudra développer une véritable

nature en milieu urbain si l'on souhaite réellement mettre en œuvre une logique de réconciliation. Certains groupes de BTP ont d'ailleurs d'ores et déjà décidé d'intégrer cette dimension dans leurs coûts de construction, en considérant qu'il est désormais essentiel d'intégrer les dynamiques naturelles en ville.

## Régis BRIDAY

L'usage d'un certain vocabulaire partagé par des acteurs multiples peut développer une culture propre à la gestion de l'environnement et à la définition des politiques publiques. Mais les idées du « gagnant-gagnant », des solutions « sans regret » et des « éco-bénéfiques » sont devenues très présentes dans la rhétorique libérale, par ces acteurs qui souhaitent avant tout repousser les échéances d'une véritable politique de lutte contre le changement climatique. Par ailleurs, la notion de limite (réchauffement maximal de 2 °C, notamment) est récupérée par les partisans d'intervention immédiate en géo-ingénierie – tout en étant bien sûr par ailleurs favorisée par les scientifiques souhaitant créer un sentiment d'urgence. La sémantique actuelle est ambiguë et il est plus que jamais essentiel de savoir quels sont les acteurs qui s'emparent de termes devenus courants et qui souhaitent orienter les politiques publiques en fonction de leurs intérêts.

**Manuel BLOUIN** université Paris-Est Créteil, iEES Paris

Un certain nombre de questions sur la relation entre la nature et l'homme concernent la démarche éthique et doivent être traitées par les citoyens, car elles sont insolubles du point de vue scientifique. À la façon du serment d'Hippocrate, il semble nécessaire de développer à présent une déontologie de l'ingénierie écologique, en s'appuyant sur les principes scientifiques connus. À cet égard, l'attachement à la théorie de l'évolution sépare l'ingénierie écologique et le géo-ingénierie, et est un pilier pour assurer la durabilité et l'autogestion des solutions proposées après les interventions initiales. En outre, les sciences physicochimiques reposent toujours essentiellement sur des conceptions linéaires et sur une causalité univoque des phénomènes, alors que les écologues ont sans cesse affaire à des logiques circulaires dans lesquelles causes et conséquences s'entremêlent. C'est une autre différence fondamentale entre l'ingénierie écologique et la géo-ingénierie.

## Catherine LARRERE

La référence au serment d'Hippocrate est très intéressante. D'une part, le génie écologique réfère à la science de l'ingénieur, qui travaille sur des machines et qui entend tenir les phénomènes sous contrôle. Les ingénieurs de l'aéronautique, ainsi, haïssent les propriétés émergentes. D'autre part, la science du médecin opère sur le vivant et ne fabrique pas la santé : elle aide un organisme à se réparer. Le type d'action à mener n'est pas le même selon qu'on vise le vivant ou le mécanique. L'ingénieur fait face à une obligation de résultats, et le médecin à une obligation de moyens. Ces différences semblent très pertinentes pour l'intervention sur les écosystèmes.

## Luc ABBADIE

En guise de conclusion, il semble de plus en plus illusoire de pouvoir intervenir de façon ciblée pour obtenir un résultat ciblé dans des systèmes complexes, ce d'autant plus que le changement global les déstabilise profondément et oblige à intégrer des contraintes variables aux raisonnements projectifs. Dans tous les cas, les interventions curatives sont le résultat du constat d'un échec passé. Dans ce contexte, l'ingénierie écologique doit s'inscrire dans une philosophie d'action privilégiant dans toute la mesure du possible les mécanismes spontanés, et en faisant appel en cas d'intervention à la bibliothèque de réponses emmagasinées dans les potentialités portées par les populations, les communautés et les gènes, qui ont été mises au point au cours de l'histoire évolutive des organismes et de leurs interactions. C'est en s'appuyant sur ces mécanismes que l'on peut obtenir les meilleures réponses, et c'est pourquoi la référence aux systèmes naturels spontanés est la bonne. Mais compte tenu de la nécessité croissante d'intervenir et de la dynamique accélérée des systèmes en causes, les interventions à venir risquent de s'apparenter de plus en plus à des activités d'apprentis sorciers. C'est pourquoi il faut plus que jamais multiplier les recherches en écologie afin de réduire les incertitudes.

## Régis BRIDAY

Il est devenu de plus en plus difficile à la collectivité scientifique de désigner des objectifs et de mobiliser. Face aux tentatives des tenants de la géo-ingénierie, l'attitude de la communauté scientifique française

(telle qu'elle s'incarne dans le rapport de l'ARP REAGIR) apparaît néanmoins positive, ce d'autant plus qu'elle propose un cadre essentiellement démocratique et non une approche surplombante du rôle de la science dans la société...

Mais, par ailleurs, se focaliser comme elle le fait (cf. toujours le rapport de l'ARP REAGIR) sur l'ingénierie « d'adaptation » pourrait laisser entendre que les scientifiques ont déjà dépassé l'approche « mitigation », et qu'ils se projettent dans la perspective de l'adaptation... Ce qui pourrait être dangereux si cela signifiait une démobilisation en termes de réduction d'émissions de gaz à effet de serre !

## Catherine LARRERE

L'alternative entre réduction et adaptation n'a jamais existé. Même s'il était possible de cesser d'émettre des GES, le changement climatique continuerait et l'adaptation est indispensable. Il faut néanmoins tenir bon sur la réduction des émissions. Ce débat montre que le recours à la technique est indispensable, mais que la technique n'est pas tout : son utilisation doit être encadrée par une démarche politique et éthique.



## **Gaié**

Groupe des acteurs de l'ingénierie écologique  
[www.ingenierie-ecologique.org](http://www.ingenierie-ecologique.org)



## **GIS Climat-Environnement-Société**

Groupement d'intérêt scientifique Climat-Environnement-Société  
[www.gisclimat.fr](http://www.gisclimat.fr)



## **iEES Paris**

Institut d'Écologie et des sciences de l'environnement  
[www.ieesparis.ufr918.upmc.fr](http://www.ieesparis.ufr918.upmc.fr)



## **Natureparif**

Agence régionale pour la Nature et la biodiversité en Île-de-France  
90-92 avenue du Général Leclerc, 92500 Pantin, France  
+33 (0)1 83 65 40 00  
[www.natureparif.fr](http://www.natureparif.fr)  
[contact@natureparif.fr](mailto:contact@natureparif.fr)

