

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

*« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)*



Où vont les sciences de l'environnement ?

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

*Publiées avec le soutien
de l'Institut MinesTélécom*

Où vont les sciences de l'environnement ?

03

Avant-propos
Thierry MANDON

05

Introduction
Claire TUTENUIT

L'évolution des connaissances

08

Après la Conférence de Paris, quelle science du climat ?
Hervé LE TREUT

14

Penser la convergence entre enjeux agricoles, alimentaires, écologiques et climatiques
Jean-François SOUSSANA

19

De l'écologie à l'ingénierie écologique
Luc ABBADIE et Yann DUSZA

23

Où vont les sciences de la biodiversité ?
Pierre-Edouard GUILLAIN et Jean-François SILVAIN

29

Le volet recherche du 3^{ème} Plan national Santé Environnement (PNSE 3)
Philippe HUBERT

34

La place des océans dans les sciences de l'environnement
Françoise GAILL

40

L'économiste face aux enjeux environnementaux
Christian DE PERTHUIS

45

Comment l'environnement transforme-t-il la discipline économique ?
Antonin POTTIER

Le dialogue science – société

50

Réchauffement climatique : les perspectives des rapports entre science, politique et société
Jean JOUZEL et Valérie MASSON-DELMOTTE

55

La place de l'environnement dans la Stratégie nationale de recherche
François HOULLIER

60

Les controverses scientifiques en matière de santé-environnement
Marc MORTUREUX

65

Les attentes d'une entreprise comme Veolia vis-à-vis des sciences de l'environnement
Dr Philip ABRAHAM

68

Chez Michelin, une recherche orientée par la mobilité durable
Terry GETTYS

72

Where next for global environmental research? The answer is Future Earth
Corinne LE QUÉRÉ and Asher MINNS

78

Une dramaturgie des sciences ?
David WAHL

82

Sciences environnementales et théologie : le cas exemplaire de l'encyclique *Laudato Si'*
Père Frédéric LOUZEAU

Hors-Dossier

87

Prix bas du pétrole et crise financière internationale : un couple à hauts risques
Dominique DRON et Didier PILLET

97

Le marché pétrolier à la croisée de la géologie, de l'économie et de la géopolitique
Olivier APPERT

101 Traductions des résumés

112 Biographies des auteurs

RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

ISSN : 1268-4783
Série trimestrielle • n°83 - Juillet 2016

Rédaction

Conseil général de l'Economie, de l'Industrie,
de l'Energie et des Technologies, Ministère de
l'Economie, de l'Industrie et du Numérique
120, rue de Bercy - Télédocus 797 - 75572 Paris Cedex 12
Tél : 01 53 18 52 68
<http://www.annales.org>

Pierre Couveinhes
Rédacteur en chef

Gérard Comby
Secrétaire général

Carine Chauvin
Assistante de la rédaction

Marcel Charbonnier
Correcteur

Myriam Michaux
Webmestre

Membres du Comité d'Orientation

Le Comité d'Orientation est composé des membres
du Comité de Rédaction et des personnes dont les
noms suivent :

Jacques Brégeon
Collège des hautes études de l'environnement
et du développement durable, ECP, INA P-G, SCP-EAP

Christian Brodhag
Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne

Xavier Cuny
Professeur honoraire Cnam, Conseil supérieur
de la prévention des risques professionnels

William Dab
Cnam, Professeur

Thierry Chambolle
Président de la Commission « Environnement »
de l'Académie des technologies

Hervé Guyomard
CNRA Rennes

Vincent Lafèche
Président du BRGM

Yves le Bars
Cemagref

Patrick Legrand
Inra, Vice-président de la Commission nationale du débat
public

Benoît Lesaffre
CIRAD

Geneviève Massard-Guilbaud
Ecole des Hautes études en sciences sociales,
Directrice d'études

Marc Mortureux
Directeur général de la Prévention des risques (MEEN)

Alain Rousse
Président de l'AFITE

Virginie Schwartz
Directrice de l'Energie, MEDDE

Membres du Comité de Rédaction

Philippe Saint Raymond
Président du Comité de rédaction
Ingénieur général des Mines honoraire

Pierre Amouyel
Ingénieur général des Mines honoraire

Paul-Henri Bourelrier
Ingénieur général des Mines honoraire, Association
française pour la prévention des catastrophes naturelles

Mireille Campana
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie
Haut fonctionnaire de développement durable

Dominique Dron
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Pascal Dupuis
Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique,
Direction générale de l'énergie et du climat, MEDDE

Jérôme Goellner
Chef du service des risques technologiques,
Direction générale de la prévention des risques, MEDDE

Jean-Luc Laurent
Directeur général du Laboratoire national de métrologie et
d'essais (LNE)

Richard Lavergne
Chargé de mission stratégique Energie-Climat au
Commissariat général au développement durable, MEDDE

Bruno Sauvalle
Ingénieur en chef des Mines, Mines ParisTech

Jacques Serris
Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

Claire Tutenuit
Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

François Valérian
Ingénieur en chef des Mines, Conseil général de l'Économie

Photo de couverture :
Modélisation de reboisement de zones agricoles, simulation.
Logiciel AMAP du CIRAD.
Photo © Antoine Devouard/REA

Iconographie
Christine de Coninck

Abonnements et ventes
COM & COM
Bâtiment Copernic - 20 Avenue Edouard Herriot
92350 LE PLESSIS ROBINSON

Alain Briel
Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32
a.briel@cometcom.fr

Mise en page : Nadine Namer

Impression : Printcorp

Editeur Délégué :
FFE - 15 rue des Sablons 75116 PARIS - www.ffe.fr
Fabrication : Charlotte Crestani
charlotte.crestani@belvederecom.fr - 01 53 36 20 46

Régie publicitaire : Belvédère Com

Directeur de la publicité : Bruno Slama - 01 40 09 66 17
bruno.slama@belvederecom.fr

Où vont les sciences de l'environnement ?

Par Thierry MANDON

Secrétaire d'État à l'Enseignement supérieur et à la Recherche

Au lendemain de la COP 21 et de la signature par de nombreux États de l'Accord de Paris, les sciences de l'environnement sont aujourd'hui à un tournant. Après des années passées à convaincre les uns et les autres de la solidité des analyses et des prédictions sur le changement climatique, cet effort est aujourd'hui achevé : il n'y a plus véritablement de climato-sceptiques, quand 80 % de la population mondiale s'inquiète du changement climatique.

Mais face à la réalité du changement climatique de nouveaux défis se posent à nous : comment nos sociétés peuvent-elles y répondre ? Comment nous y adapter ? Autant de questions auxquelles il est urgent de répondre.

L'environnement terrestre ne peut plus en effet s'étudier comme celui d'une planète lointaine sur laquelle l'action humaine n'aurait pas d'incidence. Nous savons au contraire que les activités humaines jouent un rôle majeur dans les grands mécanismes qu'étudient les sciences de l'environnement. Face au changement climatique et à l'origine anthropique de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la coopération interdisciplinaire avec les sciences humaines et sociales (SHS) est une nécessité scientifique. Celle-ci prend désormais en compte l'inscription de l'humain au sein d'un monde naturel et technique : le monde social est inscrit dans un environnement et en dépend. Réciproquement, l'humain fait explicitement partie de la chaîne causale de la nature. Le changement global est lié à cette co-dépendance à toutes les échelles spatiales, du global au local.

Les sciences humaines et sociales ont pour nouvel objectif de comprendre comment les sociétés intègrent les connaissances sur les changements climatiques, les risques qui y sont associés et la relation connaissance/décision/action. Elles étudient les contradictions performatives ou les dissonances cognitives qui s'expriment autour de la question du changement climatique. En effet, les recherches sur le climat accumulent les résultats sur le rôle des facteurs anthropiques dans le changement climatique et sur ses effets adverses, que les socio-écosystèmes du monde auront à affronter. Mais ces travaux ne suffisent pas à enclencher des réponses significatives des sociétés. L'énigme du contraste entre la reconnaissance de la nécessité d'agir, le consensus scientifique enfin acquis, la connaissance de la situation et des solutions et l'incapacité générale d'agir demeure. Les indicateurs tels que le niveau des émissions de GES par pays ou par personne en témoignent.

Ces recherches peuvent proposer des pistes pour analyser ces dissonances cognitives : analyse socio-politique des stratégies de soutenabilité conflictuelles à l'échelle des pays, des firmes ou des groupes sociaux, analyse économique des modalités de passage à des comportements socio-économiques à intensité carbone faible ou nulle, évaluation environnementale des solutions ou des transitions proposées, analyse géographique (à différentes échelles) de modalités d'organisation territoriale alternatives...

Il est important de prendre en compte ces mécanismes pour fonder une action publique efficace en faveur de comportements climatiquement et moralement soutenables. Cela suppose de développer des disciplines nouvelles et des approches inédites.

Le changement climatique est bien à envisager du point de vue humain. Il faut renforcer les recherches sur les inégalités environnementales et sur la notion de justice spatiale ou de justice écologique. Les changements globaux multiplient l'exposition des populations humaines aux situations de crise. L'interdépendance entre les risques définit de nouvelles vulnérabilités pour les humains et le vivant.

C'est la raison pour laquelle la Stratégie nationale de la recherche, aussi bien que les nouveaux moyens dont nous dotons la recherche française au travers des Plans d'investissement d'avenir, s'efforcent de bâtir de nouvelles configurations de recherche dans lesquelles collaboreront des spécialistes des nombreuses disciplines impliquées dans le climat.

Aujourd'hui, les sciences de l'environnement ont également pour ambition d'être le point de conciliation entre le besoin d'avancées dans les connaissances sur le fonctionnement de notre environnement, les impératifs de nos entreprises indispensables fournisseurs d'aliments, d'énergie, de matériaux, de produits de haute technologie, de confort, de santé et de bien-être, et, enfin, les obligations de notre puissance publique en termes de protection de notre environnement, de nos biens et des personnes. La recherche dans le domaine de l'environnement est au carrefour de ces domaines d'activité, elle a un rôle crucial à jouer dans la compréhension réciproque de ces nécessités.

Il s'agit de regarder la planète sous un angle de vue différent, celui du « système Terre » et de son évolution sous l'impact des activités humaines et d'étudier ce système complexe avec une démarche interdisciplinaire, dans le détail de ses processus pour tenter de le comprendre, de le modéliser et de le « prévoir ». Les sciences de l'environnement s'appuient autant sur les sciences technologiques que sur les sciences humaines et sociales. Elles sont au cœur de l'accompagnement des transitions énergétique et écologique vers la sobriété et de la prise en compte de la santé (*One Health*) permettant une double performance économique et écologique au travers de nouveaux comportements et de nouvelles technologies.

Les sciences de l'environnement se sont développées à partir de l'analyse des actions et des impacts de l'humain sur son environnement : son rôle dans la production des biens, dans l'économie ou la sobriété de ses prélèvements, dans la protection de la nature, les conséquences de ses actions en matière d'aménagement du milieu, son contrôle de l'exposition aux risques liés aux changements globaux... On voit bien que la place des SHS est fondamentale à toutes les étapes de la recherche, les interactions homme-environnement étant au cœur du défi.

Cette démarche est au cœur de grands programmes de recherche européens ou internationaux comme *Future Earth*, lequel permet de répondre aux grandes questions scientifiques liées à l'environnement sous l'angle des solutions. C'est au travers des résultats de ces recherches que pourront se forger ou se réformer les modes de vie, de consommation, de réglementation et de gouvernance, et ce, de l'échelle locale, niveau où se prennent les décisions de tous les jours, jusqu'à l'échelle nationale, voire à celle de la planète.

Les sciences de l'environnement sont aussi porteuses de développements technologiques qui se traduisent par de nouvelles trajectoires d'innovation. Elles portent en elles la potentialité de développements technologiques très novateurs nécessaires pour économiser nos ressources, substituer une énergie à une autre, ou concevoir des modes de production plus économes et une gestion plus sobre des ressources naturelles. Ces développements impliquent une collaboration forte avec les chercheurs et les ingénieurs qui innovent, avec les industriels qui mettent en place les produits de demain et avec les économistes qui en évaluent l'intérêt. La vision globale nous oblige à vérifier, à toutes les étapes de l'analyse de leurs cycles de vie, qu'une nouvelle source de matière ou d'énergie ou qu'un mode de production est compatible avec le respect des milieux dans lesquels et grâce auxquels nous vivons.

Les bénéfices sociaux, sociétaux et économiques attendus sont inestimables, car on parle ici non seulement de protection de l'environnement, mais aussi de santé publique, de distribution équitable des ressources assurant la pérennité des structures sociales démocratiques, de prévention des risques et de nouvelles technologies économiquement valorisables.

Je remercie donc les Annales des Mines et la coordinatrice de ce numéro, Claire Tutenuit, de s'être saisis de cette question et d'avoir, à ce tournant de l'histoire de l'environnement, su montrer que nous sommes également à un tournant pour la recherche et la pensée humaine.

Introduction

Par Claire TUTENUIT

Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EpE)

Depuis Descartes, l'homme occidental a réalisé et assumé le fait qu'il est « maître et possesseur de la nature ». En fait, il se comporte comme tel depuis bien plus longtemps, depuis que ses facultés de coopération et d'innovation se sont ajoutées à ses qualités physiques pour faire de l'Homo sapiens une espèce nouvelle, dominante par rapport à toutes celles auprès desquelles il vit.

Le naturaliste Alexandre de Humboldt (1769-1859) a mis en évidence que les hommes ont construit des écosystèmes où ils sont la force dominante, ou au moins une force dominante, et ce, depuis très longtemps. Les anthropologues montrent par exemple que la composition floristique de l'Amazonie a été influencée par l'homme depuis au moins 10 000 ans au bénéfice d'espèces utiles à l'homme. De même, la disparition de la mégafaune (mammouths, aurochs...) est aujourd'hui attribuée à l'espèce humaine, qui a déséquilibré les rythmes de reproduction de ces populations animales – certes par un prélèvement modeste, et donc un impact imperceptible à l'échelle d'une génération humaine, mais suffisant pour qu'en quelques milliers d'années cette mégafaune ait fini par disparaître.

Au-delà de son impact sur les espèces, l'activité humaine a aussi eu un impact sur les équilibres physico-chimiques du globe, et sur la composition physique de la Terre. Les paléontologues ⁽¹⁾ ont récemment nommé anthropocène cette ère durant laquelle l'influence humaine s'inscrit dans les couches géologiques. La date de démarrage de l'anthropocène fait encore débat ⁽²⁾, mais il y a consensus sur sa réalité : c'est à partir de l'examen de la composition des glaces polaires profondes que le glaciologue français Claude Lorius a mis en évidence le changement climatique et son origine anthropique.

Le changement climatique a précisément causé une accélération récente de la prise de conscience de cette réalité. Un certain nombre de scientifiques font remonter le début de l'anthropocène à 1850, c'est-à-dire à l'émergence des combustibles fossiles comme principale source d'énergie pour l'humanité et du nouveau mode de vie associé. Les impacts humains sont alors devenus plus globaux et cumulatifs, et leurs effets massifs et permanents. Le capitalisme et le colonialisme (ils étaient certes préexistants, mais ils ont trouvé dans ces énergies nouvelles une source d'accélération) ont permis une diversification géographique de ces sources d'énergie : richesse et énergie se sont déconnectées d'une terre agricole à laquelle elles étaient auparavant étroitement liées.

Cette première partie de l'anthropocène débouche sous l'effet de tous les développements urbains et techniques, de l'expansion des infrastructures, des pollutions, de la

surexploitation des espèces et des milieux permise par les machines et, finalement, de la circulation mondiale des hommes et des espèces, sur un écocide général ni concerté ni prévu, de si grande échelle que nous ne voyons plus comment l'arrêter. Il se traduit par de nombreuses espèces en voie de disparition, des catastrophes écologiques que sont le recul des grandes forêts, la disparition rapide des coraux, l'affaiblissement de toutes les espèces sauvages, en Europe, ou encore la disparition complète des pollinisateurs autres qu'humains dans certaines régions de la Chine.

Les sciences de l'environnement constatent et confirment, étude après étude, la réalité de ces évolutions, l'irréversibilité de certaines d'entre elles et les causalités que l'on peut identifier.

La première partie de ce numéro de *Responsabilité & Environnement*, « À la découverte de l'anthropocène », est consacrée aux avancées faites par de nombreuses disciplines quant à la connaissance du fonctionnement de notre planète : du sous-sol à la haute atmosphère, nous continuons à explorer la nature et son fonctionnement, et à comprendre ses interactions avec nos activités. Ces articles nous font prendre conscience que l'humanité impacte l'ensemble de la planète : climat, composition des eaux douces ou océaniques, biodiversité, santé, vie sous toutes ses formes. Ils révèlent une planète soumise à des contraintes parfois alarmantes.

Ces contraintes constituent aussi un défi pour les sciences tant sociales que physiques et biologiques : comment l'humanité peut-elle s'assurer de rester dans des limites de fonctionnement de la planète qui soient viables pour elle ? Les travaux du *Stockholm Resilience Centre* ⁽³⁾ visent à identifier ces différentes limites, comme l'a fait Sir Nicholas Stern pour le climat.

Pour la réalisation de la deuxième partie de ce numéro, nous nous sommes fortement inspirés de l'analyse par Philippe Descola, professeur au Collège de France, de la question : comment allons-nous respecter ces limites ? Il suggère de repenser nos conceptions scientifiques autour de trois processus centraux des relations entre humains et nature :

(1) Mais d'abord Paul Crutzen, qui a inventé ce terme en 1995.

(2) La Commission internationale de stratigraphie, qui s'est réunie à Oslo en avril 2016, n'a pas, à ce jour, publié de réponse sur ce point.

(3) ROCKSTRÖM (Johann), Stockholm Resilience Centre - The planetary boundaries, <http://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

- l'adaptation : comment allons-nous changer nos modes de vie pour nous adapter au monde que nous fabriquons ? La question se pose pour le climat comme pour les autres impacts humains, comme en témoignait par exemple le colloque « L'homme peut-il s'adapter à lui-même ? » organisé par le Museum d'Histoire naturelle et l'Institut de Médecine du Sport en 2012 ⁽⁴⁾. Il s'agit d'accroître notre résilience aux phénomènes que nous provoquons nous-mêmes, que nous anticipons mais que nous ne parvenons pas à éviter ;
- l'appropriation : allons-nous gérer une part encore plus grande de la nature ou, au contraire, allons-nous réduire la part de la nature que nous nous approprions ? Cela rejoint des questions qui se posent aujourd'hui aux mondes scientifique et politique : la géo-ingénierie, par exemple, relève de la première démarche. Les politiques de trame verte ou de protection d'espaces naturels constituent un chemin intermédiaire de partage de l'espace ;
- l'expression politique : comment mobiliser des forces suffisantes pour restaurer des équilibres physiques et biologiques à l'échelle de la planète, alors que les ressorts pour poursuivre dans la logique du développement humain qui a prévalu jusqu'ici sont toujours aussi forts ?

Ces questions ouvrent des champs nouveaux aux sciences de l'environnement, dont nous attendons les réponses. Peut-on encore parler de sciences de l'environnement ? La dimension environnementale n'est-elle pas en passe d'investir et d'orienter toutes les sciences ?

Sur la base de cette analyse, la seconde partie de ce numéro de *Responsabilité & Environnement*, « Construire une anthropocène durable », s'intéresse précisément aux sciences étudiant les relations entre l'humanité et l'environnement, explorant par là même des voies nouvelles dans notre façon d'habiter la Terre.

L'article de Jean Jouzel et Valérie Masson-Delmotte décrit ainsi de quelle manière les travaux du GIEC se traduisent en décisions politiques, quels processus de dialogue ont été institués et comment ils font évoluer les décisions. L'article de François Houllier décrit pour sa part la façon dont l'environnement est aujourd'hui largement intégré dans la Stratégie nationale de la recherche, en France comme dans presque l'ensemble des pays. Ceux du docteur Philip Abraham (Veolia) et de Terry Gettys (Michelin) montrent comment les entreprises utilisent ces sciences de l'environnement et construisent leur avenir pour répondre aux besoins identifiés par lesdites sciences.

Un article consacré par Corinne Le Quéré et Asher Minns au programme *Future Earth* montre pour sa part les efforts d'intégration des diverses disciplines et des sciences sociales : dans la mesure où tout impacte tout, comment identifier les phénomènes majeurs, les priorités de recherche ou de décision ?

Les décisions politiques ne peuvent être prises qu'avec le soutien et la compréhension du grand public. L'article de David Wahl explore comment faire pour que ce public – c'est-à-dire nous – soit davantage réceptif à des messages qui pourraient n'être qu'anxiogènes, et risqueraient donc d'être refusés.

Enfin, changer de façon massive et profonde la vision que nous avons de notre environnement ne peut se concevoir sans une certaine cohérence avec les religions qui sont les guides de pensée des communautés humaines. Le Père Frédéric Louzeau analyse ainsi en conclusion de ce numéro de *Responsabilité & Environnement*, à partir de l'encyclique *Laudato Si'*, le changement de perspective de l'Église catholique sur la nature. Les sciences de l'environnement nous questionnent sur nous-mêmes.

Bien sûr, il nous a fallu faire des choix, et certains trouveront sans doute que leur domaine aurait dû être davantage mis en valeur. C'est le cas, par exemple, des sciences « omiques », qui peuvent être considérées comme des sciences de l'environnement au sens où elles explorent et utilisent le fonctionnement intime de nombreux organismes vivants. Elles sont aujourd'hui, comme la géo-ingénierie, davantage tournées vers l'identification de techniques permettant une appropriation accrue de la nature que vers l'identification de nouveaux modes de développement plus respectueux de la vie sous quelle que forme que ce soit.

Les choix faits ici peuvent être débattus : cette revue se veut avant tout un outil de dialogue entre parties prenantes, et toutes sont invitées à contribuer à son enrichissement.

(4) https://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_940303/l-homme-peut-il-s-adapter-a-lui-meme; https://www.canal-sport.fr/insep-colloque_irmes_mnhn_paris_descartes

RÉALITÉS INDUSTRIELLES

Former pour l'inconnu



Éditorial - Pierre COUVEINHES

Introduction - Marie-Josèphe CARRIEU-COSTA

Visions d'avenir pour l'éducation

Comprendre et gérer la transition éducative
Philippe JAMET et Frédérique VINCENT

La formation : une dynamique collective pour l'industrie
Isabelle MARTIN

Les STEM jobs (métiers scientifiques et technologiques) et le développement de l'industrie
Christian MARGARIA et Bruno VERLON

Former pour l'avenir : le rôle joué par le programme Erasmus+
Elena TEGOVSKA

Science vs humanités : changer de modèle et de perception
Alexandre MOATTI

La prospective : de l'anticipation à la préparation à l'avenir
Pierre PAPON

Quelques effets de la révolution numérique dans le domaine éducatif

L'enseignement en ligne suscite une soif nouvelle de connaissance - Gilles DOWEK

FUN, une plateforme de MOOCs au service des établissements d'enseignement supérieur - Catherine MONGENET

De Lausanne à Yaoundé : l'aventure des MOOCs
Dimitrios NOUKAKIS, Gérard ESCHER et Patrick AEBISCHER

Enseigner et apprendre autrement

Éducation et développement cognitif de l'enfant
Olivier HOUDÉ

Plaidoyer pour l'école primaire et l'apprentissage
Thierry WEIL

L'artisanat augmenté
Conceptions, enseignements et pratiques d'un art numérique appliqué aux métiers de l'artisanat - Bruno MONPÈRE

Faire pour inventer l'avenir : une utopie concrète ?

Rafaële COSTE LARTIGOU et
Emmanuelle REILLE- BAUDRIN

Comment approfondir les relations entre l'école et l'entreprise pour préparer les jeunes aux réalités économiques de demain ?
Christiane DEMONTÈS

Former pour l'inconnu : le rôle de la prospective
Thierry GAUDIN et Anne-Marie BOUTIN

Hors dossier

Deux cents ans de métallurgie à l'École des Mines de Saint-Étienne - Michel DARRIEULAT

MAI 2016

Le dossier est coordonné par Marie-Josèphe CARRIEU-COSTA

Pour plus d'information, nous invitons le lecteur à se reporter sur notre site :

<http://www.annales.org>

Après la Conférence de Paris, quelle science du climat ?

Par Hervé LE TREUT,
LMD-IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Paris

L'accord de la Conférence sur le climat de Paris, la COP 21, a été justement et unanimement salué comme un succès important pour les négociateurs français, qui s'est accompagné toutefois d'une réserve qui elle aussi a été exprimée de manière unanime : cette conférence établit un cadre de travail durable, mais elle marque avant tout un début plutôt qu'une fin – et la tâche à accomplir reste considérable.

L'Accord de Paris marque un moment important : celui qui nous fait passer d'une période d'alerte sur le risque climatique, désormais accepté comme tel par tous les États, à une phase de recherche de solutions.

Introduction : le changement climatique, une histoire en évolution rapide

Pour mieux apprécier la nouveauté de la période qui commence, quelques chiffres sont utiles, car nous sommes confrontés, avec l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, à un problème dont l'évolution est extrêmement rapide. L'usage des combustibles fossiles (les principaux responsables de l'aggravation de l'effet de serre) a surtout augmenté au cours des soixante ou soixante-dix dernières années, où il a été multiplié par presque 10. Durant les « Trente glorieuses », l'usage des combustibles fossiles a ainsi augmenté beaucoup plus vite que la démographie de la planète et n'a véritablement concerné que de 10 à 20 % de la population mondiale. Le fait que les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter peut s'interpréter comme un effet décalé de la croissance démographique, dans la mesure où ce sont des pays émergents soucieux de rattraper leur retard de développement par rapport à l'Occident qui en sont désormais les principaux moteurs (au premier rang desquels la Chine, désormais premier émetteur mondial).

Le problème du changement climatique lié aux gaz à effet de serre, que beaucoup voient comme un message ressassé sans changement depuis des décennies, est donc en fait un problème qui se pose aujourd'hui de manière très différente qu'il y a de cela vingt ans. Il est aussi venu plus récemment qu'on ne le pense sur l'agenda politique. Il était encore tout à fait confidentiel en 1972, l'année de la première Conférence des Nations Unies sur l'environnement réunie à Stockholm.

Au cours des années 1970 et 1980, le développement rapide du diagnostic scientifique a permis la création du

GIEC (en 1988), dont le premier rapport (sorti en 1990) a joué un rôle majeur dans la prise de conscience de ces problèmes et a précédé de très peu le Sommet de la Terre de Rio-de-Janeiro (en 1992). À cette occasion, le constat scientifique a été presque immédiatement pris en compte par le monde politique. À l'époque, il était établi que les gaz à effet de serre risquaient de modifier le climat de notre planète à un rythme qu'aucune société humaine n'avait encore jamais connu depuis la dernière déglaciation (il y a de cela plus de 10 000 ans), mais il n'existait pas encore d'observation directe du réchauffement que l'on pût déjà considérer comme mathématiquement significative : le diagnostic s'appuyait avant tout sur l'augmentation de la teneur atmosphérique en dioxyde de carbone et autres gaz à effet de serre, et sur les prévisions issues de modélisations climatiques complexes.

Depuis 15 ou 20 ans, nous sommes entrés dans une nouvelle phase marquée par les premiers signaux significatifs du réchauffement climatique. Ces signaux confirment la prévision des modèles. Les rapports successifs du GIEC (ceux de 1995, 2001, 2007 et 2014) ont utilisé des qualificatifs toujours plus forts pour mettre en avant cet élément nouveau, dont la portée est considérable : désormais, les symptômes d'un changement climatique appartiennent au présent, et plus seulement au domaine des prévisions. Ce qui était présenté comme un faisceau convergent d'indications en 1995 est devenu un phénomène sans équivoque en 2007. Cette possibilité de déceler par l'observation scientifique un phénomène qui avait été anticipé grâce à des équations mathématiques et physiques a changé la perspective, tout comme l'a fait le raccourcissement des échéances associé à la croissance des émissions de gaz à effet de serre et à leur accumulation dans l'atmosphère. Nous vivons dans un monde déjà impacté,



Photo © Lydie Lecarpentier/REA

Rassemblement d'élèves d'écoles de Toulouse dessinant un « 2°C », l'objectif de limitation du réchauffement climatique fixé par la COP 21, 2015.

« La négociation de la COP 21 de Paris s'est tout d'abord articulée autour d'un objectif exprimé par le G20 en marge de la COP de Copenhague et validé par les COP suivantes : celui de limiter à 2°C le réchauffement moyen de la surface terrestre par rapport à sa température à l'ère préindustrielle. »

en évolution rapide, traversé de risques en partie inévitables – des risques dont les contours précis sont parfois difficiles à prévoir, mais dont la réalité ne peut plus être remise en cause.

Nous sommes donc aussi passés rapidement d'une phase d'alerte sur le changement climatique à une phase d'action, qui implique des politiques coordonnées entre les différents États. Celles-ci doivent s'inscrire dans le cadre de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements climatiques, issue du Congrès de Rio et entrée en vigueur en 1994. Cette convention a mis en avant la nécessité d'empêcher des évolutions dangereuses du climat et a permis d'organiser annuellement des « *Conférences of Parties* » (les COP) réunissant tous les États signataires, soit 195 pays.

La COP de Kyoto (COP 3, en 1997) a été la première à avoir conduit à un accord chiffré sur les objectifs assignés aux différents pays, le « Protocole de Kyoto », qui constitue la mise en place de la première politique commune de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Le protocole de Kyoto a développé la notion de marché carbone, ou de « mécanismes de développement propre » liant pays industrialisés et pays en développement. Mais il a fallu attendre 2005 pour que ce protocole entre en vigueur.

De plus, il n'a jamais été ratifié par les États-Unis et n'a jamais réclamé d'effort ni des pays émergents ni *de facto* de la Russie. Au fil du temps, d'autres pays ont pris leurs distances, tels que le Canada, le Japon (après Fukushima) ou l'Australie (en fonction des fluctuations des majorités politiques). C'est ce protocole très insuffisant, engageant essentiellement l'Europe, qui a été prolongé, en voyant sa fin programmée pour 2012 repoussée jusqu'en 2020, suite à l'échec de la COP 15 (de 2009, à Copenhague).

La COP 21 de Paris a permis de sortir de cet échec grâce à l'adoption d'un accord universel impliquant tous les pays (sans limite de temps) qui s'appliquera à partir de 2020. Les négociateurs français ont obtenu un accord traduisant une acceptation unanime du diagnostic de la communauté scientifique : il établit la nécessité d'aboutir durant la deuxième partie de ce siècle à une situation dans laquelle les émissions nettes de gaz à effet de serre seraient réduites à zéro, voire négatives. L'Accord a aussi innové dans son approche : plutôt que d'imposer un partage des efforts « depuis le haut », il s'est appuyé, à ce stade, sur des contributions intentionnelles des États. On les désigne en anglais par l'expression INDC (*Intended Nationally Determined Contributions*). Elles ont été soumises par la quasi-unanimité des États et deviendront en

2018 de véritables engagements, encore insuffisants (ce que l'Accord souligne de manière explicite), mais soumis à des révisions à la hausse rediscutées tous les 5 ans. Cet accord devra s'adapter à l'évolution du diagnostic sur le problème climatique. Son efficacité doit reposer sur la transparence : les INDC sont consultables de manière ouverte sur Internet.

Un problème déjà d'une forte actualité

La négociation de la COP 21 de Paris s'est tout d'abord articulée autour d'un objectif exprimé par le G20 en marge de la COP de Copenhague et validé par les COP suivantes : celui de limiter à 2°C le réchauffement moyen de la surface terrestre par rapport à sa température à l'ère préindustrielle. Cet objectif devient de plus en plus difficile à atteindre. Les modèles climatiques incluant une représentation du cycle du carbone montrent qu'il faudrait dans un premier temps conduire des diminutions d'émissions drastiques, de 40 à 70 % d'ici à 2050, puis parvenir avant la fin du siècle à une « neutralité carbone », ce qui veut dire récupérer la totalité des gaz à effet de serre que nous émettons dans l'atmosphère, voire en reprendre plus que nous n'en émettons (c'est ce que l'on appelle des « émissions négatives »).

Le dernier rapport du GIEC a montré que les conditions permettant de rester au-dessous de 2°C de réchauffement étaient déjà très contraintes par nos émissions passées. La plupart des gaz à effet de serre restent très longtemps dans l'atmosphère : la part du CO₂ qui n'est pas absorbée de manière rapide par la végétation et les océans correspond à un surplus atmosphérique qui ne sera érodé que de moitié après un siècle. On peut donc imaginer l'atmosphère comme un récipient que l'on remplirait de gaz à effet de serre et qui ne se viderait que très lentement par des fuites minimales. Il existe ainsi, depuis le début de l'ère industrielle, une quantité cumulée d'émissions de CO₂ (ou d'autres gaz à effet de serre souvent exprimés en « équivalent CO₂ ») que l'on ne doit pas dépasser si l'on veut rester au-dessous de 2°C. Nous avons déjà utilisé plus de la moitié de cette allocation, et au rythme auquel nous avançons (10 milliards de tonnes de carbone produits chaque année résultant du seul usage des combustibles fossiles, contre à peine plus d'un milliard au début des années 1950), il suffira d'un peu plus de 20 ans pour sortir du cadre qui nous laisserait à terme 66 % de chances de nous stabiliser au-dessous des 2°C de réchauffement climatique.

Cette ambition correspond à un bouleversement très profond, avec des transitions économiques et environnementales extrêmement rapides. Elle réclame de nouvelles technologies, en particulier dans le domaine des filières énergétiques. Nous ne sommes plus, là, face à un problème qui puisse être traité par la seule communauté des climatologues, c'est-à-dire des physiciens ou des biochimistes du climat. Au niveau académique, il implique le travail des chercheurs en sciences humaines et sociales, en écologie, en hydrologie et en agronomie. Au niveau de la prise de décision, il implique avant tout les élus politiques, mais aussi les associations, les entrepreneurs et les citoyens de toute origine.

Malgré ces difficultés futures, la Conférence de Paris a été confrontée à une demande qui a été formulée de manière forte par plusieurs dizaines de pays : se fixer un objectif de réchauffement plus exigeant encore, en limitant le réchauffement de la planète à 1,5°C (et non plus à 2°C). Cet objectif peut se comprendre : le réchauffement de la planète est proche de 1°C, si l'on compare les températures actuelles aux températures préindustrielles, et l'on observe d'ores et déjà des conséquences qui ne peuvent que s'aggraver : une élévation du niveau des mers qui constitue un danger mortel pour beaucoup de petits États insulaires, la fonte rapide des glaces arctiques, qu'il s'agisse de la banquise ou de la calotte groenlandaise, la salinisation de grands deltas, des évolutions marquées de la biodiversité marine ou continentale, des évolutions contrastées entre les zones intertropicales et extratropicales (les premières étant beaucoup plus vulnérables).

Il est normal que les pays qui se sentent les plus menacés tiennent à ce que leur situation soit prise en considération. À cela est opposé un diagnostic comptable impitoyable : les chances réelles de ne pas dépasser 1,5°C de réchauffement, c'est-à-dire 0,5 à 0,6°C de plus qu'actuellement, sont très faibles, parce que le réchauffement océanique futur engagé par les gaz à effet de serre déjà présents dans l'atmosphère rend inévitables quelques dixièmes de degré supplémentaires. Ces chances passent vraisemblablement par un inévitable dépassement du seuil, que viendrait compenser une capacité ultérieure de réduction de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère : il s'agit là de technologies souvent évoquées, mais dont la mise en œuvre se heurte à de multiples difficultés techniques, logistiques, économiques et sociales, et qui progressent peu. La tentation peut alors être grande d'avoir recours à des techniques de géo-ingénierie « actives » consistant à réfléchir une part supplémentaire du rayonnement solaire entrant. Mais les dangers de telles approches sont tellement colossaux, qu'elles sont à proscrire.

Adaptation, adaptation : la nécessité et les opportunités des approches citoyennes

Selon tous les calculs et les estimations de la communauté scientifique, une part importante des changements climatiques à venir est donc désormais clairement inévitable, et cette part peut prendre des proportions importantes allant jusqu'à des réchauffements de 4 ou 5°C en moyennes globales d'ici à la fin de ce siècle en cas d'une inefficacité prolongée des actions engagées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il existe donc une nécessité claire de politiques d'adaptation préventives ou réparatrices pour faire face aux changements climatiques.

Du point de vue scientifique, définir une politique d'adaptation constitue un pari très difficile à relever : il s'agit d'établir des projections régionales des changements climatiques à venir, or cette prévision s'accompagne toujours d'une incertitude plus importante que celle qui affecte les résultats globaux utilisés dans la phase d'alerte sur les problèmes climatiques. Cette incertitude concerne moins le réchauffement, qui sera le lot com-

mun de tous les territoires à une échéance plus ou moins proche, que la circulation atmosphérique et ses conséquences en termes d'hydrologie. Une part de ces incertitudes résulte de défauts résiduels dans la construction des modèles : résolution insuffisante, paramétrage des processus physiques ou biogéochimiques encore améliorable, difficulté à bien comprendre les téléconnexions existant entre différentes régions du monde, etc. Mais une part de l'incertitude a une origine plus fondamentale : les fluctuations interannuelles du climat ont un caractère partiellement chaotique. En fait, ce sont non pas seulement les petites échelles de la circulation atmosphérique qui causent les incertitudes majeures, mais les structures d'échelle continentale : anticyclones, dépressions, moussons..., dont la dynamique largement non-linéaire est affectée de manière partiellement imprévisible par le réchauffement climatique.

Ces modifications inéluctables mais imprévisibles dans leur détail, doivent être appréhendées comme des risques et elles incitent à mettre en avant le concept de « vulnérabilité » : en quoi un territoire donné, avec l'ensemble des systèmes écologiques ou socioéconomiques qu'il abrite, est-il « climato-dépendant » ?

Cette approche pose à son tour un problème de hiérarchie entre différents risques (climatiques, mais aussi écologiques, sociaux...). Il est probable que, dans le futur, une grande partie des décisions à prendre consisteront à définir des lignes d'intérêts communs favorables à la résolution de ces différents problèmes et que, dans ce cadre, les problèmes d'atténuation (de diminution des émissions de gaz à effet de serre) ou d'adaptation seront étroitement liés les uns aux autres. Ils concernent très souvent, mais sous une forme un peu différente des enjeux identiques : transports, alimentation et usage des sols, urbanisme... Ces débats auront lieu à l'échelle mondiale, puisque l'Accord de Paris a entériné le principe d'un temps de renégociation tous les 5 ans, mais ils existeront aussi à diverses échelles locales.

L'ampleur des changements et des débats qui sont devant nous est donc colossale. Ils sont impossibles à résoudre sans une implication de la société civile tout entière : entreprises et acteurs économiques, citoyens, etc. L'opinion publique, partout dans le monde, jouera un rôle majeur dans la détermination de ce qui se fera ou non. Les problématiques d'adaptation peuvent contribuer à satisfaire la nécessité d'éduquer aux problématiques environnementales qui en résultent, il y a là une opportunité à saisir.

Les gaz à effet de serre restant très longtemps présents dans l'atmosphère (il faut un siècle pour que la moitié d'un surplus de CO₂ émis dans l'atmosphère se résorbe), il n'y a pas de marche arrière possible, et réduire les émissions de gaz à effet de serre constitue aujourd'hui une urgence absolue.

Mais comme l'effet climatique de ces gaz est différé dans le temps de une à quelques décennies (en raison en particulier de l'inertie thermique des océans), nous disposons dans chaque région de la planète d'un temps limité, qu'il convient de mettre à profit pour débattre d'enjeux

de développement, tels que l'aménagement des zones littorales ou montagnardes, le partage de l'eau, les filières agricoles, la préservation de la biodiversité naturelle ou le futur des zones urbaines.

Nous pouvons citer ici comme exemple de ce qu'il est possible de faire, un travail collectif sur la région Aquitaine effectué en 2011 et publié en 2013, un travail que poursuit aujourd'hui le groupe « Acclimaterra », dans le cadre de la grande région « Nouvelle Aquitaine » (qui a succédé aux anciennes régions Aquitaine, Limousin et Poitou-Charentes). Ce travail a permis d'illustrer l'apport potentiel de ces approches régionales en rassemblant les expertises de plus d'une centaine de chercheurs publics et en mobilisant ainsi de manière organisée un savoir de la communauté scientifique qui est trop souvent sous-utilisé au niveau des décisions politiques. Il permet aussi de rendre compte, de manière très concrète, au niveau d'un territoire, de la confrontation entre les risques climatiques et les autres risques majeurs qui conditionnent notre futur. Cette mise à plat est également un moyen de diminuer la dimension passionnelle qui accompagne presque toujours les débats relatifs aux problèmes environnementaux.

Conclusion

Ces quelques exemples, à l'échelle globale comme à l'échelle locale, permettent d'illustrer ce que sera la responsabilité de la communauté scientifique pour les décennies à venir : éclairer de la manière la plus objective possible des enjeux complexes pour que la société puisse s'en saisir et arbitrer de manière correcte des choix nécessairement difficiles. Il s'agit d'une responsabilité historique, car la communauté scientifique est seule à pouvoir jouer ce rôle, à cause de la technicité de beaucoup de facteurs de décision qu'il faut démêler, mais aussi à cause de l'évolution rapide du questionnement et du diagnostic scientifique, qui est appelée à continuer.

La communauté scientifique ne doit par contre pas rester seule face à ces problèmes : l'ampleur des changements qui sont devant nous les rend impossibles à résoudre sans l'implication de la société civile tout entière : entreprises et acteurs économiques, citoyens, etc... Une prise de conscience grandissante de ces problèmes se heurte toutefois à une difficulté constante, celle d'appréhender des objectifs d'action à l'échelle des individus, alors beaucoup de décisions se prennent loin d'eux, dans de grandes conférences onusiennes par exemple.

Les politiques d'adaptation peuvent ainsi contribuer à un débat plus approfondi et partagé sur les risques climatiques impliquant une large gamme de disciplines scientifiques et permettant de nous doter d'une vision beaucoup plus explicite de ce que pourra être notre futur. Cette approche scientifique locale et soigneusement débattue a une dimension pédagogique très importante et elle sera inévitablement nécessaire dans la mise en place des Fonds verts d'aide aux pays vulnérables. Mais c'est aussi une responsabilité qui ne peut pas être confondue avec celle des élus, qui sont les seuls à avoir une véritable légitimité pour prendre des décisions.

DYNAMIQUES ENVIRONNEMENTALES
À la croisée des Sciences

Sous la direction d'Hervé LE TREUT

Les impacts du changement climatique en Aquitaine

© ACCLIMATERRA



Couverture de l'ouvrage *Les impacts du changement climatique en Aquitaine : Un état des lieux scientifique*, réalisé sous la direction d'Hervé Le Treut, septembre 2013.

« Nous citons ici comme exemple un travail collectif sur la région Aquitaine effectué en 2011 et publié en 2013, un travail que poursuit aujourd'hui le groupe "Acclimaterra", dans le cadre de la grande région "Nouvelle Aquitaine" (qui a succédé aux anciennes régions Aquitaine, Limousin et Poitou-Charentes). »

Bibliographie

Changements Climatiques en Aquitaine (sous la direction de LE TREUT (H.)), Presses Universitaires de Bordeaux, 2013, 330 p. (disponible à ce lien : <http://www.aquitaine.fr/actions/territoire-durable-et-solidaire/climat-energies/changement-climatique>)

BURKETT (V.R.), SUAREZ (A.G.), BINDI (M.), CONDE (C.), MUKERJI (R.), PRATHER (M.J.), ST. CLAIR (A.L.) & YOHE (G.W.), "Point of departure", in: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Part A: Global and Sectoral Aspects, Contribution of Working Group II to the*

Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [FIELD (C.B.), BARROS (V.R.), DOKKEN (D.J.), MACH (K.J.), MASTRANDREA (M.D.), BILIR (T.E.), CHATTERJEE (M.), EBI (K.L.), ESTRADA (Y.O.), GENOVA (R.C.), GIRMA (B.), KISSEL (E.S.), LEVY (A.N.), MACCRACKEN (S.), MASTRANDREA (P.R.) & WHITE (L.L.) (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014, pp. 169-194.

Penser la convergence entre enjeux agricoles, alimentaires, écologiques et climatiques

Par Jean-François SOUSSANA
INRA, Paris

Au cours des cinquante dernières années, la forte croissance de la population mondiale (qui a été multipliée par 2,3) a été dépassée par celle de la production alimentaire (cette dernière ayant triplé). Paradoxalement, ce succès quantitatif n'a pas permis d'atteindre la sécurité alimentaire et nutritionnelle, puisque la sous-alimentation chronique touche encore près de 820 millions de personnes, alors que 2 milliards souffrent de carences en micronutriments et qu'un autre milliard présente un risque accru de maladies métaboliques chroniques liées à l'obésité. Au cours de cette période, l'augmentation de la production alimentaire mondiale a résulté pour près de 90 % de l'intensification de la production agricole et pour un peu plus de 10 % de l'accroissement des surfaces cultivées et pâturées, celles-ci s'étant étendues de 15 %. La croissance de la production agricole a généré de nombreuses externalités négatives (déforestation, perte de biodiversité, dégradation des sols, pollution de l'eau et de l'air, augmentation des émissions de gaz à effet de serre). Après plusieurs décennies, leurs conséquences sont devenues importantes au point de réduire le potentiel de production agricole lui-même.

Croissance de la production agricole et environnement

Depuis les années 1960, le processus de modernisation de la production agricole s'est traduit, dans les pays industrialisés, par la spécialisation des systèmes de production, par l'agrandissement des exploitations et par un recours accru à des intrants de synthèse – dont 100 millions de tonnes d'azote minéral par an issues du procédé Haber-Bosch –, au machinisme agricole et à des variétés végétales et à des races animales aux forts potentiels productifs. La spécialisation des systèmes et l'homogénéisation des milieux ont permis des économies d'échelle tant du point de vue de la production que de celui de la collecte simplifiée de produits mieux standardisés. Au cours de ce processus de modernisation, les milieux homogénéisés (remembrement, drainage...) ont souvent été considérés comme des matrices largement abiotiques dans lesquelles les interactions biotiques qui se déroulent dans le sol et dans les écosystèmes supports de l'agriculture sont négligées. Dans les pays en développement, la révolution verte a emprunté le même chemin, en particulier en Asie et en Amérique latine. En revanche, elle n'a pas vraiment réussi à s'implanter en Afrique sub-saharienne, où les problèmes de sécurité alimentaire demeurent globalement les plus aigus.

La moitié des sols cultivés sont aujourd'hui dégradés, parfois de manière quasi-irréversible, puisque de 0,6 à 1,9 % des terres sont rendues incultivables chaque décennie. L'érosion des sols cultivés induit des pertes de production atteignant 0,3 % par an, alors que l'augmentation moyenne des rendements mondiaux ne dépasse pas 1,3 % par an. La matière organique perdue représente de 0,3 à 1 milliard de tonnes de carbone par an, soit une perte annuelle de nutriments dont la compensation par fertilisation minérale représenterait un coût de 100 à 200 milliards de dollars par an (ITPS, 2016). Autre menace, le changement climatique qui entraîne déjà des pertes de rendement estimées à 0,2 % par an pour le blé et à 0,1 % par an pour le maïs (GIEC, 2013). La récurrence de fortes anomalies climatiques (canicules, sécheresses, précipitations intenses), la réduction des ressources en eau douce (fonte des glaciers d'altitude, baisse des nappes phréatiques, étiages plus marqués) et la salinisation des zones de deltas génèrent d'importantes pertes de récoltes (atteignant 20 à 30 % dans les zones touchées par la canicule et la sécheresse durant les étés 2003 en Europe, 2010 en Russie et 2012 aux États-Unis).

Ces menaces tendent à se renforcer mutuellement. En effet, la dégradation des sols limite leur capacité à stocker de l'eau, accentuant leur réchauffement et leur dessèche-



Photo © Michel Rauch/BIOSPHOTO

Abeilles mellifères butinant des fleurs de Prunellier, Vosges du Nord, France.

« Une troisième menace, plus difficile à quantifier à l'échelle globale, concerne la crise de la biodiversité et la réduction des services des écosystèmes. Les trois quarts des cultures alimentaires mondiales dépendent de la pollinisation et leurs rendements augmentent moins vite que ceux des cultures qui n'en dépendent pas. »

ment ainsi que le déficit hydrique des cultures, lors de canicules et de sécheresses. Réciproquement, la baisse des rendements induite par le changement climatique réduit l'apport de matière organique aux sols, les rendant ainsi plus vulnérables à l'érosion et à la dégradation.

Une troisième menace, plus difficile à quantifier à l'échelle globale, concerne la crise de la biodiversité et la réduction des services des écosystèmes. Les trois quarts des cultures alimentaires mondiales dépendent de la pollinisation et leurs rendements augmentent moins vite que ceux des cultures qui n'en dépendent pas. Le déclin multifactoriel (invasions biologiques et maladies, réduction de la diversité floristique, exposition à certains pesticides, changement climatique) des abeilles et des pollinisateurs sauvages entraîne des pertes de production pour de nombreuses cultures, particulièrement pour celles qui sont source de micronutriments en milieu tropical.

D'autres services dépendant de la biodiversité (régulation des maladies végétales, épuration de l'eau et de l'air, etc.) sont généralement affaiblis dans les paysages dominés par des cultures annuelles intensives et peu diversifiées. L'affaiblissement des services d'épuration du sol renforce l'impact des pollutions agricoles diffuses, tandis que le

déclin du service de régulation des maladies et des ravageurs entraîne un recours accru à des intrants phytosanitaires.

Face à ces menaces et aux risques pour la santé humaine d'expositions chroniques à de faibles doses de cocktails de contaminants chimiques issus de l'agriculture, un meilleur compromis entre agriculture et environnement a été recherché depuis les années 1980. Toutefois, la question des changements dans les autres maillons – transformation, transport, distribution, consommation – des systèmes alimentaires n'a pas été posée initialement.

La recherche d'un compromis agriculture – environnement

L'intensification durable constitue le paradigme dominant au sein de cette démarche. Il s'agit d'augmenter l'efficacité des intrants utilisés, de limiter les rejets de substances polluantes dans l'environnement, voire de reconcevoir les systèmes agricoles pour les rendre plus efficaces et ainsi limiter leurs externalités. Des progrès considérables ont été accomplis dans cette voie, ce qui a permis d'augmenter la production tout en contenant l'expansion des surfaces agricoles. La croissance des ren-

dements mondiaux a limité l'ampleur de la déforestation tropicale, évitant ainsi l'émission dans l'atmosphère de près de 160 milliards de tonnes de carbone. L'éco-efficacité de l'élevage a également augmenté, puisque l'on estime que moins de gaz à effet de serre sont aujourd'hui rejetés par kilo de viande rouge produite que ce n'était le cas dans les années 1970.

L'agriculture et l'élevage de précision, la télédétection, l'utilisation d'un nombre massif de données, la génomique et les biotechnologies constituent autant de technologies en développement rapide susceptibles d'accélérer l'intensification durable de l'agriculture. Ces innovations nécessitent cependant des investissements importants, qui ne sont généralement rentabilisés que par des exploitations agricoles spécialisées et de grande taille, ce qui limite considérablement leur champ d'application, en particulier dans les pays les plus pauvres. De plus, certaines de ces innovations (comme les organismes génétiquement modifiés) rencontrent de fortes oppositions, voire font face à des limites écologiques du fait de l'ampleur de leur déploiement. Ainsi, la culture à grande échelle de variétés tolérantes à un herbicide entraîne généralement l'apparition au bout de plusieurs années de résistances à cet herbicide dans la flore adventice. Pour lutter contre ces résistances biologiques, des doses accrues d'herbicides sont utilisées, ce qui va à l'encontre de l'objectif d'intensification durable et peut aboutir, à long terme, à une impasse.

Plus de 500 millions d'exploitations agricoles familiales de petite taille (souvent de moins d'un hectare) occupent plus de 70 % des terres agricoles et produisent 80 % de l'alimentation mondiale. De nombreux mouvements généralement issus de l'agriculture familiale (agriculture biologique, agriculture de conservation, agriculture à hautes performances environnementales, éco-agriculture, etc.) ont proposé des alternatives afin de produire sur de petites structures en utilisant mieux les régulations naturelles et en réalisant des économies d'intrants. Ces mouvements contribuent à un paradigme alternatif, l'agroécologie, qui renvoie également à l'émergence d'une discipline scientifique au carrefour des sciences agronomiques et de l'écologie.

Sciences agronomiques et écologie

Le mot « agronomie » dérive des mots grecs *agros* (champ) et *nomos* (norme). La question de la norme, de cette loi qui s'appliquerait aux champs, est donc fondatrice de l'agronomie ou, au sens large, des sciences agronomiques.

L'écologie, du grec *oikos*, « la maison, l'habitat » et *logos* « le discours, la science », étudie les interactions entre les organismes vivants, ainsi que leurs relations avec l'environnement. L'histoire des sciences montre que l'écologie et les sciences agronomiques n'ont pas noué de liens très féconds. Comme le résume Bernard Chevassus-au-Louis ⁽¹⁾ (2006) : « *Du point de vue de l'écologie, les agroécosystèmes présentaient plusieurs handicaps (faible biodiversité, espèces banales, systèmes hors équilibre et marqués par l'action de l'homme). À l'inverse, les sciences agronomiques, proches des disciplines de l'ingénieur et*

visant le développement d'approches réductionnistes, se sont longtemps montrées indifférentes aux approches systémiques de l'écologie ».

Apparu dans les années 1930, le terme « agroécologie » désignait alors une science qui étudie le monde vivant au champ sans prescrire de norme. Ce terme demeure difficile à employer avec précision, car il recouvre plusieurs sens (discipline scientifique, pratiques agricoles et mouvement social). L'expression « agriculture écologiquement intensive » ⁽²⁾ renvoie à la nécessité pour l'agriculture de faire face aux importants besoins productifs liés à la croissance de la demande alimentaire mondiale, tout en étant compatible avec la santé humaine et celle des écosystèmes.

Le corpus scientifique utilisant le terme « agro-écologie » (aussi écrit agroécologie) est relativement limité (environ 2 600 articles indexés dans les bases de données internationales depuis les années 1950). Néanmoins, l'étude du « monde vivant au champ » s'est rapidement développée et les passerelles entre l'écologie et les sciences agronomiques sont présentes aujourd'hui dans près de 6 000 articles indexés par an. Cet ensemble interdisciplinaire inclut des apports de l'écologie, des sciences de l'environnement, des sciences agronomiques et des sciences humaines et sociales. La dimension sociale et économique recouvre des enjeux de connaissance relatifs, par exemple, à la conception de nouveaux systèmes techniques et aux processus d'accompagnement des transitions, de partage et de généralisation des innovations.

L'ingénierie agroécologique vise à mobiliser les régulations naturelles pour développer et mieux équilibrer les services rendus par les agroécosystèmes. Celle-ci nécessite le diagnostic et la gestion de la biodiversité, des sols, des paysages et des cycles biogéochimiques. Elle repose donc sur des observations détaillées et sur des savoirs renouvelés. Les services rendus par la biodiversité cultivée peuvent être renforcés par des effets de complémentarité en associant plusieurs composantes (par exemple, l'agroforesterie), plusieurs espèces végétales (rotations longues, cultures intermédiaires, associations) ou animales (pâturage mixte), plusieurs variétés d'une même espèce (mélanges variétaux).

La diversité associée aux parcelles peut également être mieux utilisée en gérant les bordures ou en favorisant l'habitat de plantes auxiliaires. Cette valorisation de la biodiversité s'accompagne généralement d'une couverture accrue du sol (agriculture de conservation) et d'une augmentation de sa teneur en matière organique. Le fait de gérer individuellement ou collectivement une mosaïque

(1) CHEVASSUS AU LOUIS (B.), Refonder la recherche agronomique. Leçon inaugurale, *École supérieure d'agriculture d'Angers (ESA)*, 2006, pp. 57-101.

(2) CASSMAN (K.G.), Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture, *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, 1999, pp. 5952-5959.



Photo © Mike Lane/ BIOSPHOTO

Plantation de manioc sous des palmiers à Lombok (Indonésie).

« Les services rendus par la biodiversité cultivée peuvent être renforcés par des effets de complémentarité en associant plusieurs composantes (par exemple, l'agroforesterie), plusieurs espèces végétales (rotations longues, cultures intermédiaires, associations) ou animales (pâturage mixte), plusieurs variétés d'une même espèce (mélanges variétaux). »

paysagère ou un territoire et d'intégrer cette gestion agroécologique dans l'aménagement et le développement d'un territoire peut permettre de mieux utiliser et de mieux préserver des ressources cruciales pour l'agriculture (l'eau et les sols) et de renforcer la régulation des bio-agresseurs et la pollinisation. Les transitions agroécologiques favorisent le bouclage des grands cycles en combinant une série de pratiques : fixation biologique d'azote, stockage de carbone et de nutriments dans la matière organique du sol, recyclage et valorisation des engrais de ferme, intégration des systèmes de culture et d'élevage. De manière complémentaire, la gestion de l'eau vise la conservation quantitative et qualitative de cette ressource afin de favoriser l'infiltration et la recharge des nappes, tout en limitant les pertes de nutriments par ruissellement et lixiviation.

Le paradigme de l'agroécologie conduit ainsi à une réflexion sur le pilotage des services rendus par les agroécosystèmes : services liés au sol, services de régulation biologique (renforcement des auxiliaires, pollinisation, biocontrôle), services écologiques à l'échelle du paysage (cycle de l'eau, épuration des rejets, recyclage) notamment.

Les arbitrages entre ces services dépendent, quant à eux, des valeurs qui leur sont accordées par des acteurs des filières, des territoires et des politiques publiques. La diversification des systèmes de production présente dans ce paradigme pourrait contribuer à renforcer leur résilience face à des aléas climatiques et biotiques (organismes invasifs, épidémies, etc.). Cependant, elle pose la question des débouchés commerciaux des productions et d'une diversification se limitant souvent à des marchés de niche et à des circuits de distribution locaux.

Changement climatique, sols et alimentation

Si, lors de la COP 21, qui s'est tenue à Paris en décembre 2015, 119 États ont pris des engagements de réduction de leurs émissions en agriculture, peu d'entre eux ont fourni des estimations chiffrées de l'effort qu'ils auront à fournir d'ici à 2030. Or, pour maintenir le réchauffement global moyen au maximum à 2°C en 2100, le secteur agricole devra réduire ses émissions d'au moins un milliard de tonnes de CO₂ équivalent par an d'ici à 2030, tout en

augmentant sa production. Cependant, le potentiel technique pour réduire les émissions associées aux pratiques agricoles utilisées ne permet d'atteindre que 20 à 40 % de cette cible ⁽³⁾, lorsque l'on prend en considération uniquement le méthane (fermentation entérique des ruminants, effluents d'élevage, rizières) et le protoxyde d'azote (fertilisations azotées minérale et organique des sols agricoles). Des leviers additionnels seront donc nécessaires pour éviter que le secteur agricole ne devienne le premier émetteur de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 et pour limiter les impacts négatifs du changement climatique sur la sécurité alimentaire.

C'est dans cette perspective que l'initiative ⁽⁴⁾ « Des sols pour la sécurité alimentaire et le climat, 4 pour 1 000 » a été lancée lors de la COP 21. Elle vise à renforcer la matière organique des sols mondiaux afin d'atteindre des objectifs complémentaires concernant la sécurité alimentaire, l'adaptation au changement climatique et la stabilisation du climat. En effet, les sols mondiaux constituent un réservoir contenant de deux à trois fois le stock de carbone présent sous la forme de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère. Pour les sols agricoles, qui ont perdu historiquement de 50 à 70 % de leur teneur en carbone avant mise en culture, le potentiel technique annuel de stockage de carbone atteindrait de 5,5 à 8 milliards de tonnes de CO₂ équivalents ⁽⁵⁾. Les deux tiers de ce potentiel pourraient être mis en œuvre en quelques décennies à un coût correspondant au prix estimé de la tonne de CO₂ en 2050 dans un scénario à 2°C (environ 120 \$).

Les pratiques agricoles mobilisées à cette fin (agriculture de conservation, gestion des prairies, agroforesterie, recyclage de la matière organique, etc.) s'inscriraient dans le paradigme de l'agroécologie, mais elles seraient aussi compatibles avec de nombreuses technologies. La restauration de sols dégradés et salinisés, le déploiement de l'agroforesterie sur 6 % des terres agricoles, des replantations même limitées à 320 millions d'hectares et la régénération des forêts tropicales secondaires permettraient de doubler ce potentiel technique pour atteindre un stockage total de carbone dans le sol de l'ordre de 3,4 milliards de tonnes par an, soit l'équivalent de 4 pour mille du stock de carbone des sols mondiaux dans l'horizon de surface (de 0 à -40 cm). Cet objectif ambitieux de « recarbonisation » de la biosphère continentale permettrait de s'approcher de la stabilisation du CO₂ atmosphérique en multipliant par deux le niveau des engagements d'atténuation pris par les États au titre de l'Accord de Paris, engagements dont on sait qu'ils ne seront pas suffisants pour atteindre l'objectif des 2°C. Il renforcerait le potentiel agronomique des sols, les rendements et leur résilience au changement climatique, tout en contribuant à l'atteinte de plusieurs « Objectifs du Développement Durable » ⁽⁶⁾.

Après un changement de gestion, le stockage de la matière organique dans les sols est toutefois limité dans le

temps (30 à 50 ans). Par ailleurs, les risques de perte sont importants, et s'assurer que de bonnes pratiques de restauration des sols dégradés se maintiendront pendant plusieurs décennies représente un réel défi. Pour y répondre, de nombreuses barrières à l'adoption de pratiques vertueuses devront être levées. En outre, l'incitation économique devrait jouer un rôle central. Cependant, valoriser la matière organique du sol en la considérant comme un capital qui se transmet avec le foncier, rémunérer le taux d'accroissement (4 pour mille, par exemple) de ce capital et assurer les risques associés à la perte de celui-ci soulèvent des questions économiques et sociales d'une ampleur considérable.

Ces changements concerneraient potentiellement des millions d'acteurs ruraux, dont une partie vit encore en dessous du seuil de pauvreté, dispose de droits fonciers précaires et ne bénéficie que d'un faible niveau d'éducation. L'adoption durable de pratiques vertueuses pour les sols supposerait de surmonter ces barrières en consacrant des moyens significatifs à la formation, au renforcement et à l'équité des droits fonciers, à l'organisation de filières agricoles « bas carbone » et à la vérification des impacts de ces filières sur la matière organique du sol. La diversification des systèmes agricoles accompagnant cette transition écologique reviendrait à mettre sur le marché un plus grand nombre de commodités agricoles, mais dans des volumes unitaires moindres. Cela supposerait des évolutions des circuits de transformation et de distribution, évolutions qui dépendraient à leur tour des attentes nutritionnelles et des comportements des consommateurs.

Cet exemple illustre l'intégration des enjeux associés aux systèmes écologiques, agricoles et alimentaires, et des enjeux climatiques. Leurs évolutions couplées doivent être pensées à plusieurs échelles d'espace et de temps, en particulier grâce à des approches de modélisation. Or, celles-ci ne sont pas encore stabilisées et elles ne convergent pas toutes vers des mondes viables. Gageons qu'il sera possible, dans une société ouverte, de penser que l'homme appartient à la terre et qu'il emprunte celle-ci aux générations futures.

C'est à cet exercice que nous invitent les réflexions sur les évolutions du système alimentaire mondial sous contrainte climatique.

(3) WOLLENBERG (E.) et al., "Reducing emissions from agriculture to meet the 2°C target", *Global Change Biology*, 2016 (DOI : 10.1111/gcb.13340).

(4) <http://4p1000.org/>

(5) PAUSTIAN (K.) et al., "Climate smart soils", *Nature*, 2016 (DOI : 10.1038/nature.17174).

(6) <http://www.undp.org/content/undp/fr/home/mdgoverview/post-2015-development-agenda.html>, voir notamment l'objectif 15.3.

De l'écologie à l'ingénierie écologique

Par Luc ABBADIE et Yann DUSZA

Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Est, Créteil, Université Denis Diderot, CNRS, INRA, IRD

Restaurer les milieux naturels, les adapter aux changements climatiques, piloter les services écosystémiques délivrés par la biodiversité, créer *ex nihilo* des milieux en tant qu'alternatives ou que compléments à des solutions d'ingénierie technique : tels sont les enjeux scientifiques et opérationnels de l'ingénierie écologique. En s'appuyant sur les concepts et les théories de l'écologie scientifique, l'ingénierie écologique tente de relever quelques-uns des défis de la complexité écologique en produisant des milieux résilients et évolutifs capables de délivrer des services écosystémiques durables.

La question environnementale a profondément changé au cours de ces dernières décennies. Trois étapes majeures peuvent être repérées dans la perspective de l'ingénierie écologique. La première est la publication, en 1972, sous la houlette de Dennis Meadows, d'un rapport commandé par le Club de Rome au *Massachusetts Institute of Technology*, qui, comme l'indique son titre *The limits to growth*, attire l'attention sur l'imparable finitude de la croissance quantitative de l'humanité⁽¹⁾. La seconde étape a été le lancement en 2000 et 2002 du concept

d'anthropocène par Paul Crutzen, chimiste de l'atmosphère et prix Nobel de chimie, qui montre que l'espèce humaine est devenue un déterminant majeur d'un certain nombre de dynamiques géochimiques, physiques et biologiques à l'échelle planétaire⁽²⁾. La troisième étape est un ensemble de rapports des Nations Unies issus d'un *Millennium Ecosystem Assessment* et publiés en 2005, qui proclament la dépendance de l'humanité vis-à-vis de processus biophysiques et écologiques en train de changer dans un sens qui ne nous est pas favorable, et qui popularisent au passage le concept de service écosystémique⁽³⁾.

L'émergence d'un concept

Finitude des ressources, prise de contrôle partielle des humains sur la dynamique de la biosphère, dépendance des humains vis-à-vis d'une nature spontanée et lointaine : ces nouveaux paradigmes confortent une vision de plus en plus interventionniste de notre rapport à la nature. Celle-ci n'est pourtant pas totalement nouvelle. En effet, la conscience de la dégradation continue de la qualité de l'environnement, qui était alors l'apanage d'une infime minorité, avait déjà engendré des politiques de protection de la nature un peu partout dans le monde, après la Seconde guerre mondiale. Mais la seule préservation d'îlots de nature spontanée et de quelques espèces a été rapidement perçue comme insuffisante face à l'ampleur de la régression de la biodiversité des milieux naturels.

Photo © Volker Steger/SIEMENS-SPL-PHANIE



Prix Nobel de chimie 1995, Paul Crutzen (né en 1933) est professeur de chimie à l'Institut Max-Planck de chimie, à Mayence (Allemagne).

« La seconde étape a été le lancement en 2000 et 2002 du concept d'anthropocène par Paul Crutzen, chimiste de l'atmosphère et prix Nobel de chimie, qui montre que l'espèce humaine est devenue un déterminant majeur d'un certain nombre de dynamiques géochimiques, physiques et biologiques à l'échelle planétaire. »

1) MEADOWS (D. H.) & al., *The limits to growth*, A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind, *Universe Books*, New York, 1972.

2) CRUTZEN (Paul J.), "Geology of mankind", *Nature*, n°415, 23, 2002 (DOI :10.1038/415023a).

3) *Millennium Ecosystem Assessment*, "Ecosystems and Human Well-being: Synthesis", *Island Press*, Washington, DC, 2005.

L'idée de restauration s'est peu à peu imposée. Sa concrétisation doit beaucoup au législateur nord-américain, qui a introduit dans une loi de 1972 relative à l'eau l'obligation de restaurer une zone humide dégradée, voire d'en créer une nouvelle en cas d'atteinte portée à une zone humide au cours d'un aménagement ⁽⁴⁾. Cette disposition, appliquée avec des modalités variées selon les États, a engendré aux États-Unis la constitution d'un nouveau secteur économique. En France, la loi de protection de la nature de 1976, qui a rendu obligatoire les études d'impact, a voulu elle aussi systématiser les pratiques de restauration en lançant la fameuse séquence « éviter-réduire-compenser » ⁽⁵⁾. Mais celle-ci est malheureusement restée quasi lettre morte jusqu'au Grenelle de l'Environnement.

En quoi le concept d'ingénierie écologique diffère-t-il de celui de restauration ? Il est clairement beaucoup plus large : il renvoie bien entendu aux opérations de restauration de milieux dégradés, mais il fait aussi référence à la création de nouveaux écosystèmes sur le terrain ou en milieu contrôlé, au pilotage des services écosystémiques, à l'atténuation des changements climatiques, à l'adaptation des systèmes écologiques aux changements climatiques et à l'érosion de la biodiversité et à la mise en œuvre de compensations. L'ingénierie écologique dépasse donc les objectifs traditionnels de restauration et de réparation de la nature pour franchir un degré supplémentaire d'instrumentalisation de la nature ⁽⁶⁾.

En ce sens, l'ingénierie écologique est une nouvelle forme de biotechnologie et d'ingénierie du vivant qui manipulerait non plus les gènes ou les cellules, mais les communautés et les écosystèmes. Elle pose donc les mêmes questions éthiques, juridiques et politiques que les biotechnologies traditionnelles, à cette différence près que tout ou presque reste à faire en ce qui la concerne ⁽⁷⁾. L'ingénierie écologique comporte à l'évidence une dimension prométhéenne : elle est positionnée pour « re-crée la nature » ⁽⁸⁾, et c'est en ce sens qu'elle s'inscrit dans le triptyque limites-impact-dépendance évoqué plus haut : puisque notre monde est fini et puisque nous dépendons totalement de lui, puisqu'il est sur des dynamiques qui ne nous conviennent pas mais que nous avons engendrées, sa « reprise en main » n'est plus une option, c'est une obligation. Au fond, l'ingénierie écologique se nourrit d'un constat d'échec : si la réparation et le pilotage sont devenus inévitables, c'est parce que la prévention et la prudence n'ont pas suffi.

L'enjeu d'une définition

Dans « ingénierie écologique », il y a « ingénierie » et il y a « écologique ».

Le terme « ingénierie » est clair : il désigne la mise en place de travaux et d'équipements à la lumière des connaissances scientifiques, et surtout techniques.

Le vocable « écologique » est, quant à lui, beaucoup plus ambigu, en raison de sa polysémie ⁽⁹⁾. Il peut en effet renvoyer aux qualificatifs d'écolo, de vert, de naturel...

Ce n'est évidemment pas de cela qu'il s'agit : l'ingénierie écologique a pour outil principal le vivant. Or, tous les organismes présentent un potentiel de croissance expo-

nentiel : utiliser des organismes, c'est utiliser des outils puissants qui peuvent se déployer très rapidement sur de grandes surfaces et générer avec efficacité les phénomènes escomptés, et ceux qui ne le sont pas.

L'ingénierie écologique peut engendrer des effets collatéraux négatifs, dont il est difficile de se prémunir (il suffit de penser à l'histoire écologique récente de l'Australie pour s'en convaincre). L'ingénierie écologique est tout sauf une ingénierie douce.

Le qualificatif « écologique » renvoie aussi à une science, l'écologie ⁽¹⁰⁾. Réaliser une opération d'ingénierie écologique, c'est-à-dire (par exemple) modifier une forêt pour en faire un puits de carbone plus efficace ou créer une zone humide pour contribuer à l'épuration des eaux résiduaires, ou encore modifier une communauté de poissons pour lutter contre l'eutrophisation d'un plan d'eau, c'est en réalité manipuler ou créer un système complexe, c'est-à-dire un ensemble constitué d'un grand nombre d'éléments en interaction les uns avec les autres et dont le comportement n'est pas déductible du comportement des éléments considérés individuellement. En exagérant à peine, on peut dire que personne n'a jamais réussi à gérer un système écologique en tenant compte de sa complexité, ce qui est sans aucun doute à l'origine de bien des problèmes d'environnement. L'agriculture productiviste occidentale en est malheureusement une « bonne » illustration.

Dès son origine, l'écologie s'est constituée autour du projet d'analyser l'organisation et la dynamique des systèmes écologiques complexes. Au fil des décennies, cumulant observations, expérimentations et modélisations, elle s'est dotée d'un capital de théories qui lui permettent aujourd'hui de disposer d'une connaissance prédictive, qui rend l'écologie applicable. De fait, c'est là que réside le grand enjeu de la définition de l'ingénierie écologique, celui de l'innovation. La théorie écologique permet un cadrage des actions d'ingénierie écologique, qui, grâce à une explicitation de la complexité et des échelles de

(4) HOUGH (P.) & ROBERTSON (M.), "Mitigation under section 404 of the Clean Water Act: where it comes from, what it means", *Wetlands Ecology and Management*, 17, 2009, pp. 15-33.

(5) Article 2 de la loi n°76-629 du 10 juillet 1976 : « Le contenu de l'étude d'impact qui comprend au minimum une analyse de l'état initial du site et de son environnement, l'étude des modifications que le projet y engendrerait et les mesures envisagées pour supprimer, réduire et, si possible, compenser les conséquences dommageables pour l'environnement ».

(6) Une forme extrême d'approche réparatrice est la partie biologique de la géo-ingénierie, qui, autour des questions de séquestration du dioxyde de carbone, d'albédo et de transpiration, envisage de manipuler sur de gigantesques surfaces continentales ou océaniques des communautés végétales (forêts et phytoplancton, principalement).

(7) Voir à ce sujet MARIS (Virginie), *Nature à vendre - Les limites des services écosystémiques*, Paris, Éditions Quae, 2014.

(8) « Recréer la nature » a été le nom d'un programme de recherche lancé en 1995 par le ministère de l'Environnement.

(9) Voir BLOUIN (Manuel), « Définir l'ingénierie écologique : quels enjeux ? », in REY (Freddy), GOSSELIN (Frédéric) & DORÉ (Antoine), *Ingénierie écologique : action par et/ou pour le vivant ?*, Paris, Éditions Quae, 2014.

(10) Pour une définition possible de l'écologie, voir ABBADIE (L.), « L'écologie, une science pour le développement durable », in EUZEN (A.), EYMARD (L.) & GAILL (F.), *Le Développement durable à découvert*, Paris, CNRS Éditions, 2013.

temps et d'espace impliquées, peut aider à identifier les trajectoires les plus probables du système et à en minorer les effets collatéraux indésirables.

De ce fait, la définition de l'ingénierie écologique donnée par le Programme interdisciplinaire de recherche en ingénierie écologique du CNRS en 2008 ⁽¹¹⁾ semble avoir conservé toute sa pertinence : « *L'ingénierie écologique désigne le corpus des savoirs mobilisables pour la gestion de milieux, la conception, la réalisation et le suivi d'aménagements ou d'équipements inspirés de, ou basés sur les mécanismes qui gouvernent les systèmes écologiques (auto-organisation, diversité, structures hétérogènes, résilience, par exemple)* ». Si la nature est prise comme modèle, c'est en raison non pas d'une quelconque sacralisation de celle-ci, mais bien d'une volonté de s'inspirer de, ou de copier « les organisations et les dynamiques qui ont été testées et validées par le crible de l'évolution » ⁽¹²⁾.

Les bases écologiques de l'ingénierie écologique

L'ingénierie écologique opérationnelle est ancrée dans l'empirisme. Cela suffit, dans bien des cas, notamment

lorsque l'objectif assigné à un écosystème restauré ou créé repose sur le maintien d'une ou de quelques espèces ou sur une ou quelques fonctions particulières dans un contexte biophysique relativement stable.

Mais cet empirisme a toutes les chances de se révéler insuffisant si les objectifs sont pluriels et si le contexte biophysique est variable, ce qui est désormais toujours le cas ne serait-ce qu'en raison du changement climatique et de l'érosion de la biodiversité. En contexte changeant, la prédiction ne peut reposer sur une extrapolation : l'explicitation de la complexité devient inévitable.

Manipuler un système complexe est toujours aventureux. À de rares exceptions près, il n'est pas envisageable de répondre à la question « Sur quel bouton dois-je appuyer pour obtenir tel résultat ? ». En revanche, il est possible de baser l'action sur un certain nombre d'avancées concep-

(11) ABBADIE (L.), BASTIEN-VENTURA (C.) & FRASCARIA-LA-COSTE (N.), « Bilan et enjeux du programme interdisciplinaire Ingeco du CNRS (2007-2001) : un tournant pour l'ingénierie écologique en France ? », *Nature, Sciences, Sociétés*, n°23, 2015, pp. 389-396.

(12) ABBADIE (L.), « *Nature sous contrôle* », in *La Recherche* 415, supplément « Objectif Terre 2050 », 2008, pp. 80-81.



Photo © Rowan E. Bestmann/ ROBERT HARDING PICTURE LIBRARY- BIOSPHOTO

Système de traitement novateur et écologique des eaux usées de la ville de Riyad (Arabie Saoudite), 2010.

« Une opération d'ingénierie écologique doit avant tout reposer sur une vision systémique. Un système qui est tout d'abord local : toutes les composantes et tous les processus de l'écosystème sont liés entre eux et se modifient l'un l'autre. Restaurer ou créer un système écologique, c'est manipuler des interactions. »

tuelles de la recherche en écologie, notamment autour des questions de durabilité et de résilience.

Une opération d'ingénierie écologique doit avant tout reposer sur une vision systémique. Un système qui est tout d'abord local : toutes les composantes et tous les processus de l'écosystème sont liés entre eux et se modifient l'un l'autre. Restaurer ou créer un système écologique, c'est manipuler des interactions. Ignorer ces interactions, cela reviendrait à renoncer à connaître les dynamiques à long terme du système et à détecter les effets collatéraux de l'action envisagée. L'écologie n'est pas en mesure aujourd'hui de préciser et de quantifier toutes ces interactions, même si les progrès réalisés en la matière sont quotidiens. Elle peut, en revanche, notamment grâce aux outils de simulation numérique, proposer *a minima* des scénarios probables et permettre ainsi de prendre une décision mûrement réfléchie.

Un système est aussi régional. Tout écosystème fait partie d'un réseau d'écosystèmes similaires constituant le méta-écosystème et s'inscrit dans des réseaux d'écosystèmes dissemblables. La durabilité d'un écosystème repose sur sa capacité à échanger avec l'« extérieur » : des gènes, des individus, des espèces, des matériaux et de l'énergie. Ainsi, il ne sert à rien, par exemple, de reconstituer une zone humide dans une carrière abandonnée s'il n'y a pas une autre zone humide à une distance raisonnable, distance qui peut être déterminée scientifiquement. Les continuités écologiques, les corridors et les milieux intermédiaires dans lesquels se situe la zone d'intervention en conditionnent la réussite.

Un écosystème est un système évolutif, et sa capacité à se modifier est la clé de son maintien dans le temps, éventuellement sous des formes renouvelées (c'est ce que l'on appelle sa « résilience »). Plusieurs caractéristiques semblent impliquées dans sa capacité de changer avec son environnement (y compris dans sa dimension biologique, avec, par exemple, la survenue d'une maladie), même si quelques exceptions ont pu être signalées ou suggérées :

- En premier lieu, la diversité biologique de l'écosystème, que celle-ci soit génétique ou spécifique, ce qui conduit à construire des écosystèmes d'une diversité supérieure à la diversité minimale (si tant est que celle-ci existe) afin de maximiser les passages de relais entre les organismes le constituant, lesquels sont les garants de la continuité de son fonctionnement ;
- Ensuite, l'hétérogénéité de l'organisation de l'écosystème, tant en termes de conditions physico-chimiques (création de sols d'épaisseurs différentes, par exemple) qu'en termes de structure démographique (s'assurer d'une multiplicité des classes d'âge dans un peuplement d'arbres, par exemple) ;
- Le régime des perturbations est un point souvent oublié : l'exposition de l'écosystème à des perturbations localisées et irrégulières (ouverture d'une clairière dans une forêt, par exemple) est un mécanisme principal d'entretien des hétérogénéités et de la biodiversité ;
- Le recours à des espèces locales permet non seulement de ne pas appauvrir la diversité génétique, mais aussi

d'augmenter les chances de disposer d'espèces qui soient capables de répondre aux contraintes de l'environnement et à leurs changements les plus probables localement : on peut en effet considérer que les espèces locales disposent de l'information génétique qui leur sera nécessaire en cas de changement, une information transmise par leurs ancêtres qui ont déjà connu des changements analogues (ce que semblent confirmer les apports récents de l'épigénétique)⁽¹³⁾ ;

- Enfin, un autre point souvent méconnu est le fait que les organismes vivants changent très fortement les conditions physico-chimiques des milieux dans lesquels ils se trouvent, et c'est d'ailleurs pour cela qu'ils sont un outil privilégié de l'ingénierie écologique. Cela signifie que la modification d'un milieu pour accueillir telle ou telle communauté n'est pas définitive, parce que celle-ci, une fois installée, va à son tour modifier le milieu, et pas nécessairement à son avantage. On est là confronté à la notion de rétroaction, qui peut constituer un outil ou, au contraire, une contrainte pour l'ingénierie écologique.

Le déploiement de l'ingénierie écologique

Au-delà de la restauration de milieux naturels justifiée par des raisons patrimoniales, esthétiques, éthiques, paysagères ou utilitaristes (restauration de zones humides pour se protéger contre des crues, par exemple), l'ingénierie écologique se déploie progressivement dans le milieu urbain pour favoriser l'adaptation de ce dernier au changement climatique, dans le milieu agricole avec l'invention de l'agroécologie, en foresterie avec les perspectives de séquestration du dioxyde de carbone, dans l'ensemble du paysage avec le développement des trames vertes et bleues et la mise en œuvre de la compensation écologique. Par son approche systémique, elle peut permettre de remettre en cohérence les fonctionnements des diverses composantes d'un territoire. Mais elle ouvre aussi la voie à une spécialisation outrancière de vastes surfaces qui pourraient être entièrement dédiées à la maximisation de tel ou tel service écosystémique (le risque est particulièrement élevé en ce qui concerne la séquestration de CO₂).

Les modalités de la conception et de la mise en œuvre des opérations d'ingénierie écologique soulèvent les mêmes problèmes économiques, sociaux et culturels que toute autre ingénierie. Mais, une différence majeure, comme nous l'avons dit plus haut, est que l'ingénierie écologique est un outil très puissant de modelage du milieu de vie des humains, qui peut concerner très vite de vastes territoires et beaucoup de monde, et qui peut engendrer des catastrophes écologiques de grande ampleur quand elle est mal utilisée. La concertation, la clarté et le contrôle démocratique sont des prérequis absolus d'une ingénierie écologique réellement au service d'un développement durable.

(13) L'épigénétique analyse les mécanismes moléculaires qui modulent l'expression des gènes des organismes, notamment en fonction des variations de leur environnement.

Où vont les sciences de la biodiversité ?

Par Pierre-Edouard GUILLAIN

Directeur de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité

et Jean-François SILVAIN

Directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (IRD), président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB)

La perte de biodiversité est aujourd'hui confirmée, même si certains débats montrent la difficulté de tirer de ce constat les conséquences qui peuvent en résulter pour l'action humaine. Les sciences de la biodiversité se concentrent aujourd'hui fortement sur les mécanismes au travers desquels l'adaptation aux changements globaux se produit, et peut être accompagnée, et sur la définition de scénarios d'évolution plausibles redéfinissant les relations entre les sociétés et les écosystèmes.

Un constat : la perte de biodiversité

Depuis de nombreuses années, les travaux scientifiques confirment, rapport après rapport, que la biodiversité qui nous entoure et avec laquelle nous interagissons est menacée, qu'elle s'érode à un rythme très rapide – en bref, que nous sommes entrés dans ce qui ressemble à une sixième extinction.

Le livre d'Elizabeth Kolbert, *La 6^e extinction* ⁽¹⁾, rassemble et vulgarise les travaux de nombreux scientifiques qui ont documenté cinq mécanismes d'érosion de la biodiversité :

- la surexploitation des ressources : des grands mastodontes de l'âge préhistorique aux grands pingouins de l'Atlantique Nord disparus en 1844 ou à la morue, ou, aujourd'hui, du fait des dispositifs concentrateurs de poissons, les espèces sauvages utiles à l'homme ont été longtemps exploitées sans considération de leur renouvellement ;
- la pollution : selon Paul Crutzen, les usines d'engrais produisent aujourd'hui plus d'azote que l'ensemble des écosystèmes terrestres ne peuvent en fixer. Les résidus médicamenteux et autres micropolluants présents dans l'eau affectent les capacités reproductives de certaines espèces, et la pollution de l'eau ou des sols par les matières plastiques, par les intrants agricoles et les rejets de communautés urbaines toujours plus nombreuses constitue une menace à la fois locale et globale pour nombre d'écosystèmes ;
- l'artificialisation des espaces et la fragmentation des habitats : les liens entre la taille des habitats et la richesse de l'écosystème associé sont bien établis. L'étalement urbain, la création de nombreuses infrastructures linéaires, l'artificialisation des espaces, la déforestation

ou les formes d'agriculture très homogènes constituent des menaces pour les habitats naturels et des causes de leur fragmentation ;

- les espèces (végétales et animales) envahissantes : le commerce international (terrestre, maritime ou aérien) a mis en contact des espèces exotiques avec des écosystèmes qui n'y étaient pas préparés. Du frelon asiatique en Europe au champignon cause du syndrome du nez blanc chez les chauves-souris d'Amérique du Nord, à l'écrevisse américaine à pattes rouges dans les rizières chinoises ou à la renouée du Japon si répandue, autant d'espèces dont l'introduction dans un nouvel habitat où elles n'ont aucun prédateur peut causer énormément de dommages ;
- le changement climatique : la concentration de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère contribue à l'acidification des océans ainsi qu'à des changements dans les conditions environnementales des écosystèmes, et des espèces qui s'adapteront trop lentement ou mal aux nouvelles conditions climatiques. La montée du niveau de la mer menace nombre d'écosystèmes littoraux souvent très riches en biodiversité.

Ces menaces sont malheureusement difficiles à réduire ; elles sont souvent une conséquence directe de l'activité économique humaine et, dans l'arbitrage que font les populations et les pouvoirs publics entre développement humain et préservation d'une espèce, la seconde n'a été jusqu'ici que rarement gagnante. Cela s'est traduit par une régression massive des populations de nombreuses

(1) KOLBERT (E.), *La 6^e extinction* – Comment l'homme détruit la planète, La Librairie Vuibert, août 2015.

espèces et par des taux d'extinction définitive de 20 à 100 fois supérieurs à ce qu'ils étaient avant que ne se fasse sentir l'influence des humains.

Il est vrai que les politiques de préservation parviennent à maintenir de petites communautés : les pandas en Chine, le loup ou certains oiseaux en France, la grenouille dorée au Brésil, des grands fauves ou certaines espèces endémiques dans des zoos et des réserves. Mais la diversité génétique au sein de ces communautés peut être faible et ces espèces disparaîtront faute de soins prodigués par les hommes. Surtout, le constat fait par des scientifiques est celui d'un affaiblissement général des espèces existantes ordinaires : ainsi, les populations d'oiseaux spécialistes en France ont diminué de 23 % en 25 ans ⁽²⁾ ; l'augmentation de la mortalité des colonies d'abeilles a, quant à elle, atteint 30 % en 15 ans ⁽³⁾.

Cette érosion du tissu vivant à l'échelle globale (mais on la constate aussi à l'échelle des paysages et des régions) a des conséquences pour le fonctionnement des écosystèmes et l'évolution à court et long terme de la biodiversité et, par voie de conséquence, pour le bien-être présent et futur des populations humaines, et de manière plus dramatique dans les pays les plus pauvres.

Nombre de travaux scientifiques continuent bien sûr à préciser ces changements, à en déterminer les causes, souvent multiples, à mettre en commun les observations faites et les connaissances acquises dans l'ensemble du monde, tout en continuant l'exploration de la biodiversité et d'espèces microscopiques grâce à de nouvelles technologies d'observation.

Un consensus scientifique, mais des débats encore ouverts sur ces constats ⁽⁴⁾

Comme en matière de climat, la science avance toutefois, mais de manière irrégulière et controversée : un courant biodiversité-sceptique est en train d'émerger en France, comme dans d'autres pays. Son discours tente de remettre en cause la validité du consensus scientifique sur l'érosion de la biodiversité et trouve écho auprès de nombre d'acteurs toujours prompts à considérer comme contreproductive la prise en compte de l'environnement.

En décembre 2015, un avis de l'Académie des technologies sur le thème « Biodiversité et aménagement des territoires » invoquait ainsi les incertitudes et certaines imprécisions pesant sur l'estimation des taux d'extinction des espèces pour suggérer d'« éviter toute interprétation hâtive, toute analogie faussement intuitive et toute imprégnation trop fortement idéologique ». Cet avis concluait que « l'exigence d'une prise en compte de la biodiversité pourrait devenir une entrave au développement économique et à la création d'emplois ».

Les arguments avancés par l'Académie des technologies apparaissent infondés sur le plan scientifique ou s'appuient sur une interprétation partielle de la littérature scientifique. Comme le souligne une position minoritaire au sein même de cette Académie, cet avis occulte la nécessité

de repenser le rapport des sociétés humaines avec leur environnement et de redéfinir le développement économique pour l'adapter au caractère limité d'un monde dont les ressources naturelles vivantes et matérielles sont en train de se réduire à un rythme très rapide (et qui seront de plus en plus sollicitées si l'humanité veut réduire son recours aux énergies fossiles).

L'apparition d'un tel courant biodiversité-sceptique en France témoigne, à sa manière, de l'acuité du problème et d'une prise de conscience des contraintes inéluctables que les réponses à apporter impliqueront pour certains acteurs du monde économique.

Tout comme cela fut le cas pour le climato-scepticisme, ce biodiversité-scepticisme tente de mettre en cause la pertinence et la rigueur des recherches menées jusqu'à présent par les acteurs des sciences de la biodiversité – au premier rang desquels se situe l'écologie scientifique. L'objet de cette dernière est d'étudier l'extrême complexité des interactions qui régissent les systèmes écologiques, et leurs conséquences à des échelles temporelles et spatiales très variées. Ces recherches s'appuient sur l'imposant cadre conceptuel de la biologie évolutive et de l'écologie théorique. Elles ont d'ores et déjà permis de réaliser des avancées conceptuelles et pratiques d'une portée considérable permettant une approche plus durable de l'utilisation des écosystèmes et de la biodiversité (par exemple, dans le cadre des pêcheries ou de l'agriculture).

Ce constat scientifique pose toutefois des questions éthiques majeures sur la nécessité d'un regard renouvelé sur les relations entre les humains et la nature ⁽⁵⁾. Cette démarche, conformément à la pratique scientifique, s'est construite à partir d'une évaluation critique et contradictoire de faits, d'observations et d'expériences.

C'est dans un tel contexte de réévaluation constante de nos savoirs qu'il faut inviter les sceptiques non pas à cultiver et à promouvoir le doute, mais à contribuer à affermir nos connaissances en vue de trouver des solutions durables à des problèmes qui concernent *in fine* la pérennité et des sociétés humaines et de la biodiversité.

Un consensus scientifique à instaurer dans le monde politique

Le débat sur les réponses à apporter à cette érosion de la biodiversité progresse au niveau international. Initiative d'inspiration française, la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) est une interface entre les mondes scientifique et

(2) <http://indicateurs-biodiversite.naturefrance.fr/indicateurs/evolution-des-populations-doiseaux-communs-specialistes>

(3) <http://www.inra.fr/Grand-public/Ressources-et-milieux-naturels/Tous-les-dossiers/Abeilles-pollinisation-biodiversite-pesticides/Declin-des-colonies-d-abeilles/%28key%29/1>

(4) Tribune, in Le Monde du 15 avril 2016 de Sébastien Barot, Jean-Louis Martin, François Sarrazin, Jean-François Silvain et Christophe Thébaud.

(5) SARRAZIN (F.) & LECOMTE (J.), "Evolution in the Anthropocene", Science 351, 2016, pp. 922-923.

politique, qui a vocation à jouer, dans le domaine de la biodiversité, le rôle que joue le GIEC dans celui du climat.

Sa mission est de dresser un état des lieux des connaissances scientifiques sur les sujets liés à la biodiversité et d'offrir aux décideurs une base robuste pour leur permettre de prendre des décisions pertinentes.

Quatre ans après sa création, l'IPBES a tenu sa 4^{ème} réunion plénière en février dernier, à Kuala Lumpur (Malaisie). Près de 500 participants représentant les 124 États membres de la plateforme se sont réunis pour valider ses rapports scientifiques et approuver les résumés, destinés aux décideurs, des deux premières évaluations scientifiques de l'IPBES consacrées respectivement à « la pollinisation, aux pollinisateurs et à la production alimentaire » et aux « scénarios et modèles pour l'évaluation de la biodiversité ». Ces résumés ont fait l'objet de discussions entre les représentants des gouvernements et les scientifiques auteurs des rapports, sous l'œil attentif des parties prenantes.

Le rapport adopté sur les pollinisateurs, qui comporte plus de 800 pages écrites par 77 experts de différentes disciplines et de différents pays, démontre l'importance de la pollinisation pour la sécurité alimentaire mondiale, souligne les extrêmes dangers d'extinction qui pèsent sur les pollinisateurs et présente un ensemble de leviers d'action possibles assorti d'une évaluation de leur faisabilité. Il démontre notamment l'incidence néfaste des insecticides (dont les néonicotinoïdes) sur les pollinisateurs. Le résumé destiné aux décideurs en tire 22 messages clés, un ensemble de faits essentiels et surtout une palette d'outils pour l'action, dont les décideurs publics comme privés sont invités à se saisir.

Le sujet du second rapport, « Scénarios et modèles pour la biodiversité », va faire l'objet de la dernière partie de cet article.

De nouveaux enjeux et de nouveaux champs pour la recherche

Les constats scientifiques que nous avons évoqués posent en effet deux questions :

- en quoi l'érosion constatée de la biodiversité menace-t-elle l'humanité ? C'est en effet à partir des conférences d'Al Gore, puis du rapport Stern montrant les risques et le coût de l'inaction en matière de changement climatique (confirmé par l'expérience physique de chacun), que le climat est devenu une préoccupation pour les opinions publiques et, donc, un champ d'action politique concrète. Pour la biodiversité, la prise de conscience débute : la pollution est aujourd'hui un sujet de préoccupation chez 49 % de nos concitoyens, l'extinction des espèces animales et végétales chez 29 %, des taux qui sont en progression régulière⁽⁶⁾. Répondre à cette inquiétude encore vague suppose d'étudier les mécanismes par lesquels l'érosion de la biodiversité aura des conséquences sur notre société.
- que peut-on faire pour ralentir la perte de biodiversité et, à défaut, pour nous assurer que les nouveaux écosystèmes résultant des changements globaux évoqués

(6) http://www.greenflex.com/wp-content/uploads/2016/05/2016_GF-ETUDE-ETHICITY-2016-Livret.pdf?lp_redirect_1610=http%3A%2F%2Fwww.greenflex.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2016%2F05%2F2016_GF-ETUDE-ETHICITY-2016-Livret.pdf&vid=0&wpl_id=2247&l_type=wplid

..... Rôle prépondérant de la plasticité

Des relevés individuels sur 47 années (1961-2007) dans une population de mésange charbonnière (*Parus major*) étudiée à Oxford depuis 1947, ont montré que sur une durée d'un demi-siècle, les mésanges ont avancé leurs dates de ponte en moyenne de 14 jours (Charmantier *et al.*, 2008 – figure 1.1, C). Les données sur l'abondance de nourriture dans la forêt ont

en moyenne, avancer leurs dates de reproduction pour rester synchrones avec l'abondance de nourriture et assurer la croissance de leurs oisillons (figure 1.1, D). Grâce à l'identification individuelle par baguage des mésanges charbonnières, cette étude portant sur près de 10 000 événements de reproduction a mis en évidence que cette adaptation est le fait d'ajuste-

ments individuels (Charmantier *et al.*, 2008). Chaque femelle a donc la capacité de changer sa date de ponte d'une année sur l'autre, en fonction de son environnement (température, luminosité, pluviométrie, longueur du jour, phénologie des arbres... – Visser, 2008 ; Bourgault *et al.*, 2010) anticipant ainsi la date de disponibilité de la nourriture.

ments individuels (Charmantier *et al.*, 2008). Chaque femelle a donc la capacité de changer sa date de ponte d'une année sur l'autre, en fonction de son environnement (température, luminosité, pluviométrie, longueur du jour, phénologie des arbres... – Visser, 2008 ; Bourgault *et al.*, 2010) anticipant ainsi la date de disponibilité de la nourriture.

précédemment nous laisseront une planète habitable ? Comment les espèces, les écosystèmes et les sociétés peuvent-ils s'adapter à ces changements ?

Ces deux questions ouvrent un même champ de recherche, qui porte, d'une part, sur les sources et les mécanismes de flexibilité (ce terme plus large est préférable à « capacités d'adaptation ») des espèces, des écosystèmes et des socio-écosystèmes et, d'autre part, sur la combinaison de ces mécanismes à partir de laquelle ébaucher des scénarios de biodiversité plausibles en fonction de divers paramètres.

Nous décrivons *infra* l'état des connaissances sur ces sources, avant d'en déduire une prospective pour la recherche (les lecteurs souhaitant approfondir ces sujets peuvent se référer à la Prospective proposée par la Fondation pour la recherche sur la biodiversité ⁽⁷⁾).

Cinq grands mécanismes de flexibilité des socio-écosystèmes ont été identifiés. Nous nous bornerons ici à les identifier et à illustrer chacun d'eux au moyen d'un bref exemple.

La plasticité phénotypique

La plasticité phénotypique d'un caractère génétique est la capacité pour des organismes de même génotype d'exprimer différents phénotypes de ce caractère en fonction de l'environnement. Elle peut être illustrée par l'étonnante capacité d'adaptation manifestée par les mésanges charbonnières au changement climatique ⁽⁸⁾.

L'évolution génétique

Le second mécanisme est l'évolution génétique. Le monde vivant est l'objet d'une perpétuelle évolution qui trouve son terreau dans ces modifications aléatoires du matériel génétique que sont les mutations et les recombinaisons chromosomiques. L'architecture génétique des caractères peut être plus ou moins complexe : nombre de gènes impliqués, interactions, effets épigénétiques. Au total, la vitesse de l'évolution génétique en réponse à une pression de sélection dépend de plusieurs facteurs, dont le contexte environnemental et le contexte génétique : la flexibilité génétique est une variable qui est elle-même susceptible d'évoluer.

Des changements génétiques rapides sont liés à la circulation dans les écosystèmes de substances toxiques nouvelles introduites par l'homme, d'une façon intentionnelle ou non (antibiotiques, pesticides, métaux lourds...). L'évolution sur quatre décennies de la résistance aux insecticides chez le moustique commun *Culex Pipiens* a été l'occasion d'étudier *in natura* la construction d'une adaptation génétique et son évolution au cours du temps. Cet exemple illustre les contraintes et les limites de l'adaptation par évolution génétique. Il en ressort aussi que plus l'effectif d'une population est grand, plus son potentiel adaptatif pourra être important.

Un des défis majeurs à relever est donc de préserver au mieux la source de flexibilité que constitue la variation génétique des espèces dans un contexte de changements globaux qui tendent à déplacer, à fragmenter ou à réduire leurs aires de répartition.

La migration

Le troisième mécanisme de flexibilité est celui de la migration qui pousse les espèces à trouver des zones plus favorables à leurs cycles biologiques. Les migrations d'espèces vers le Nord figurent parmi les réponses les mieux documentées de la biodiversité au changement climatique.

Notre propre espèce ne fait pas exception, avec une proportion de plus en plus forte des migrations humaines liée aux changements globaux, et aux changements climatiques en particulier.

Sur le plan écologique, la pénétration de certaines espèces dans de nouveaux étages bioclimatiques est susceptible de menacer la biodiversité existante du fait d'une compétition autour de la niche écologique ou par effet de cascade sur les prédateurs et les parasites. Ainsi, la migration (vers le Nord) de la chenille processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*) affecte négativement le développement des chenilles du papillon protégé *Actias Isabellae*.

En revanche, les parasites des œufs de la chenille processionnaire ne semblent pas migrer au même rythme. C'est ainsi que les premières colonies de chenilles processionnaires ont fini par se retrouver en 2012 à seulement 800 mètres de Paris, cet insecte passant depuis lors du statut de ravageur forestier à celui de nuisance sanitaire urbaine pour l'homme comme pour les animaux domestiques.

Le réarrangement des communautés

Le quatrième mécanisme de flexibilité biologique est celui du réarrangement des communautés. Les changements globaux sont défavorables à certaines espèces d'un écosystème, et plus favorables à d'autres qui, de ce fait, sont avantagées. Cette réorganisation modifie les interactions entre les groupes. Différents aspects de ces réarrangements ont été observés et reliés à la transformation des habitats et au changement climatique : ainsi, par exemple, un déclin du degré de spécialisation moyen des communautés d'oiseaux à l'échelle européenne depuis 1990 a pu être mis en évidence. Si la vitesse, la flexibilité et les conséquences de ces réorganisations demeurent peu connues, d'importants travaux se sont concentrés sur leurs projections probables, sous la forme de scénarios des assemblages futurs, en fonction de l'occupation des sols et du climat.

La dynamique des stratégies, des savoirs et des pratiques dans les systèmes socio-économiques

Enfin, le cinquième mécanisme de flexibilité est la dynamique des stratégies, des savoirs et des pratiques dans

(7) http://www.fondationbiodiversite.fr/images/documents/Prospective/prospective-adaptations-changements-globaux_web.pdf

(8) CHARMANTIER (Anne), « Plasticité et réponse évolutive de la phénologie des mésanges face aux changements climatiques », in RONCE (O.) & PELEGRIN (F.) (Ed.), Réponses et adaptations aux changements globaux : quels enjeux pour la recherche sur la biodiversité ?, Série FRB Réflexions stratégiques et prospectives, 2015, 72 p.

EFFET DE SUR	PLASTICITÉ PHÉNOTYPIQUE	ÉVOLUTION GÉNÉTIQUE	MIGRATION	RÉARRANGEMENT DES COMMUNAUTÉS	CHANGEMENT DES PRATIQUES ET SAVOIRS
PLASTICITÉ PHÉNOTYPIQUE		Evolution de la plasticité	Sélection sur la plasticité	Normes de réaction affectées par la présence d'autres espèces	Manipulation du phénotype via les conditions environnementales (p. ex. irrigation)
ÉVOLUTION GÉNÉTIQUE	Force de la sélection		Adaptation locale Maintien de la diversité génétique	Force et direction de la sélection	Gestion des ressources génétiques Sélection artificielle
MIGRATION	Plasticité de la migration	Evolution de la migration		Migration dépendante de la présence d'autres espèces (dont vecteurs de dispersion)	Migration assistée (p. ex. transplantations)
RÉARRANGEMENT DES COMMUNAUTÉS	Augmentation de l'indice de généralisme	Evolution des interactions Effets génétiques étendus	Séparation spatiale des espèces en fonction de leurs capacités migratoires		Diversification des cultures et plus généralement mutations des agroécosystèmes
CHANGEMENT DES PRATIQUES ET SAVOIRS	Ajustement des pratiques agricoles aux changements phénologiques	Efficacité des méthodes de lutte contre les pathogènes et les vecteurs (évolution de résistances)	Gestion des invasions biologiques Limites des zones de protection Déplacement des zones d'exploitation	Stratégies d'exploitation des ressources naturelles	

les systèmes socio-économiques. Le cas des populations humaines des rivières du sud de la Casamance, au Sénégal, illustre ce mécanisme : en dépit de la dégradation des conditions de la riziculture de mangrove, ces populations ont su tirer parti de leur insertion dans des systèmes économiques mondialisés (cultures alternatives de noix de cajou ou d'autres produits de niche) et d'innovations technologiques (pêche). Cet exemple illustre des stratégies actives de recherche de voies alternatives permettant de se projeter dans l'avenir. Avec d'autres, cet exemple pose la question du rôle des politiques pour donner aux populations la visibilité nécessaire et les inciter à rechercher (ou les soutenir dans leur recherche) des voies alternatives, tout en prenant en compte les risques liés à d'éventuels transferts de vulnérabilité.

Sources de flexibilité : les axes de recherche pour les années à venir

L'état des lieux que nous avons dressé plus haut éclaire, en creux, les manques et les domaines à explorer par la recherche, qui peuvent être regroupés en quatre défis majeurs :

- Comprendre les processus de l'adaptation, celle des

communautés et des écosystèmes comme celle des sociétés humaines. Ce dernier point pose par exemple la question de l'adaptation institutionnelle : quels objectifs choisir, quels moyens pour les poursuivre et quel équilibre entre moyens contraignants (trames verte et bleue) et approches incitatives ?

- Étudier le couplage entre les sources de flexibilité décrites plus haut, qui étaient étudiées jusqu'ici séparément, voire par des disciplines différentes : comment les différents mécanismes s'articulent-ils entre eux, quels processus peut-on négliger au vu des échelles temporelles et spatiales ? L'interdisciplinarité est indispensable à la compréhension de ces interfaces.
- Proposer des indicateurs du potentiel d'adaptation : comment représenter la plasticité adaptative des caractères pertinents pour la réponse à apporter aux changements globaux, ou la capacité d'adaptation d'une population soumise à un nouvel environnement ? Cette plasticité et cette capacité d'adaptation peuvent être estimées grâce à une multitude d'indicateurs qui ne traitent ni des mêmes objets ni des mêmes échelles, et qui n'ont pas les mêmes propriétés. Peut-on aussi définir des indicateurs intégrant les interactions entre les différents mécanismes de flexibilité ?

- Intégrer ces sources de flexibilité dans des scénarios de biodiversité : les indicateurs pertinents ainsi dégagés peuvent être utilisés pour des modélisations et des scénarios prospectifs. Il apparaît, ce faisant, de nouveaux défis de modélisation liés au couplage et aux interactions, ainsi qu'aux changements d'échelles spatiale et temporelle. Enfin, la confrontation entre les résultats de tels modèles et les données réelles suppose de renforcer l'acquisition de données, et notamment les suivis à long terme sur de vastes étendues spatiales. La mise en cohérence des systèmes d'observation de la biodiversité paraît de ce fait essentielle à ces avancées théoriques.

En conclusion, l'effort de recherche devrait être accru pour combler les lacunes de connaissance que nous avons identifiées plus haut et pour comprendre les processus et les interactions multiples qui sont impliqués dans les réponses des organismes, des écosystèmes et des socio-écosystèmes aux changements globaux.

Enfin, deux autres voies de réflexion méritent d'être mentionnées :

- des exemples montrent que toutes les adaptations ou solutions qui visent à résoudre un problème causé par

ces changements globaux ne constituent pas nécessairement un progrès du point de vue de la biodiversité : ainsi, des robots pollinisateurs ne sauraient remplacer les abeilles. La connaissance des réponses spontanées du monde vivant et des sociétés humaines doit donc aussi gérer l'incertitude pesant sur les risques associés aux changements globaux et aux solutions spontanées.

- enfin, à défaut de tout connaître, les acteurs de la biodiversité s'intéressent de plus en plus à la façon dont les écosystèmes eux-mêmes peuvent être mobilisés pour renforcer les capacités d'adaptation des sociétés à travers des approches, telles que l'*ecosystem-based adaptation* qui a été mise en avant par différentes organisations d'envergure internationale ou, plus récemment, les solutions « fondées sur la nature » mises en avant par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), qui commencent à interroger les cercles politiques et scientifiques. Ces approches pourront sans doute apporter une contribution positive à l'équilibre futur des relations homme-nature, à la condition qu'elles se donnent pour objectif de rétablir le potentiel adaptatif et évolutif des systèmes naturels en s'appuyant sur les réponses adaptatives de la biodiversité pour relever les défis posés par le changement global.

Le volet recherche du 3^{ème} Plan national Santé Environnement (PNSE 3)

Par Philippe HUBERT

Directeur des Risques chroniques de l'Ineris

Le PNSE 3 est un plan d'action, qui comporte une centaine d'actions concrètes visant à permettre à chacun de vivre dans un environnement favorable à sa santé. Sa mise en œuvre implique des améliorations des connaissances en santé et environnement. Nous identifierons ici les propositions du Plan dans ces domaines. Celles-ci sont très variées, allant de la qualité de l'air aux effets perturbateurs endocriniens, en passant par les nanomatériaux ou les champs électromagnétiques. De plus, le Plan propose une approche intégrant les diverses expositions environnementales des individus, avec le concept d'exposome qui pose des questions stimulantes à la recherche.

Le Plan national Santé Environnement 3 (PNSE 3) ⁽¹⁾ est un plan d'action qui s'inscrit dans la lignée des précédents plans (le PNSE 1 date de 2004). Il suit la logique des NEHAP (*National Environment and Health Action Plans*) ⁽²⁾ initiés par l'Organisation mondiale de la santé à la fin du siècle dernier.

La recherche s'y inscrit dans une logique d'action opérationnelle. Ainsi, les sciences de l'environnement, les sciences du vivant et les disciplines qui permettent de les relier sont explicitement ou implicitement intégrées à nombre des dispositions prises dans le cadre des 107 actions qui constituent le PNSE.

Le Plan est aussi en lui-même un objet complexe, car il s'articule avec au minimum 14 autres plans, stratégies et programmes : cancer, santé au travail, adaptation au changement climatique, plan Écophyto, plan Chlordécone, qualité de l'air intérieur, réduction des émissions de polluants atmosphériques, radon, micropolluants dans l'eau, recherche, santé, biodiversité, perturbateurs endocriniens, nutrition et santé. Ces plans et stratégies comprennent leurs propres axes de recherche, que le PNSE 3 va utiliser ou alimenter.

En bref, il n'y a pas dans ce Plan de description de son volet recherche : il faut en rechercher des éléments dans chacune de ses actions. Mais cette difficulté a une contrepartie positive : l'examen des actions révèle l'expression de nombreux besoins de recherche et de multiples usages de leurs résultats. Elle révèle un enchaînement entre enjeux de connaissance et mise à disposition d'outils opérationnels, mais aussi des lacunes dans cet enchaînement.

Nous nous proposons ici d'aborder ce sujet sous deux angles : l'identification des enjeux tels qu'ils se révèlent au fil des actions, et la manière dont ces enjeux s'incorporent dans des démarches intégratives pour les grands domaines de la santé-environnement.

La structuration du PNSE 3 et l'identification des enjeux de recherche

Le troisième Plan vise à réduire les impacts des facteurs environnementaux sur la santé afin de « permettre à chacun de vivre dans un environnement favorable à sa santé ». Il est structuré en quatre « catégories d'enjeux ». Ces principaux points sont décrits ci-après, mais d'une façon qui ne rendra pas justice à l'objectif d'opérationnalité du Plan, puisque nous nous efforcerons de mettre en lumière ses seuls liens avec les sciences de l'environnement et de la vie.

La catégorie à laquelle il semble être le plus naturel de se référer traite de « recherche en santé-environnement ». Pour partie, elle renvoie à des initiatives (initiative française de recherche en environnement-santé, IFRES) et à des programmes existants (par exemple, le programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens ou les programmes de l'Ademe sur la qualité de l'air). Le Plan demande aux instances de programmation (par

(1) http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PNSE3_v_finale.pdf

(2) <http://www.who.int/heli/impacts/nehaps/en/>

exemple, l'Agence nationale de la recherche) d'orienter leurs appels à projets vers des sujets ayant trait à la problématique santé-environnement, comme la qualité des sols, les effets (en particulier, épigénétiques) des pesticides ou encore la nocivité potentielle des nanoparticules.

Il faut souligner deux actions novatrices : la demande d'une expertise des effets bénéfiques de la biodiversité dans la lutte contre les maladies et celle d'une expertise des effets positifs des espaces de nature présents dans les milieux urbains. C'est la seule partie du Plan où les interactions avec l'environnement sont envisagées d'un point de vue positif.

Mais cette partie du Plan ne visait pas à faire la synthèse des enjeux de recherche. Il nous faut donc passer en revue l'ensemble du Plan pour les identifier.

La catégorie d'actions « Répondre aux enjeux de santé posés par les pathologies en lien avec l'environnement » prend donc pour point d'entrée la pathologie, même si elle comprend aussi des actions sur des contaminations environnementales (amiante, radon, métaux lourds). Pour certaines pathologies le lien avec l'environnement est avéré depuis longtemps (voir les agents pathogènes évoqués ci-dessus, ou certains reprotoxiques). Pour d'autres, en revanche, les mécanismes d'action pathogène nécessitent encore des investigations (il s'agit notamment des maladies métaboliques comme l'obésité, de reprotoxiques et neurotoxiques mal connus, de toxiques affectant le développement neurocomportemental...).

Les demandes de recherches apparaissent parfois au fil d'actions entreprises, comme dans le cas de l'électrohypersensibilité [Ndlr : l'hypersensibilité aux champs électromagnétiques]. Elles sont aussi parfois traitées dans le cadre d'autres plans. Le PNSE 3 se concentre alors sur des recensements de pathologies (par exemple, en matière de santé reproductive), d'expositions ou de mises en œuvre de mesures de réduction des expositions.

Autre nouveauté par rapport aux plans précédents : certaines actions renvoient au changement climatique (maladies vectorielles, allergènes environnementaux, recrudescence des maladies transmises par la faune sauvage).

La catégorie des « enjeux de connaissance des expositions, de leurs effets et des leviers d'action » a pour point d'entrée l'environnement envisagé sous l'angle de la qualité des milieux en tant que tels (air, eau...) et sous l'angle des substances dangereuses (perturbateurs endocriniens, pesticides, nanomatériaux, substances « émergentes »). Ce groupe d'actions comprend des mesures d'ordres très divers. Parmi celles-ci, des actions renvoient à la mise en œuvre des plans sur la qualité de l'air intérieur et extérieur, sur celle de l'eau. Elles correspondent à l'objectif d'opérationnalité du Plan.

L'acquisition de données y tient une place importante. Une nouveauté du document est l'accent mis sur le *bio-monitoring* pour l'homme (mesure de contaminants ou de leurs métabolites présents dans les organismes des individus). Plus classique est la « surveillance environnementale », avec des mesures de pesticides ou de nano-

matériaux présents dans les aliments, dans l'air ou dans l'eau. D'autres actions visent à « rendre accessibles et utilisables les données en santé-environnement ». La relation avec les sciences de la vie et de l'environnement correspond ici davantage à la fourniture de données en vue de travaux à venir qu'à la mise en application de résultats.

En revanche, ce sont bien des besoins méthodologiques qui sont exprimés quand le Plan demande de décrire à différentes échelles les dimensions environnementales, comportementales et sociales des inégalités environnementales ou de construire des indicateurs intégrés d'expositions multiples (voies d'exposition, contaminants). Au fil des actions apparaissent aussi des besoins de recherche variés : des méthodes analytiques pour des substances mal mesurables, toxicité des résidus de médicaments ou prise en compte du caractère de « perturbateur endocrinien » pour définir des « valeurs (maximales) sans effet » sur les milieux aquatiques ou encore la compréhension des mécanismes en jeu dans la pollution de l'air.

C'est aussi dans cette catégorie qu'est exprimé le besoin de promouvoir l'approche intégratrice de l'exposome (concept entendu comme l'intégration de l'ensemble des expositions tout au long de la vie de l'individu).

Enfin, une catégorie d'enjeux vise à « renforcer la dynamique en santé-environnement dans les territoires, l'information, la communication et la formation ». Elle promeut la diffusion des outils et des connaissances aux différentes échelles et à destination des différents acteurs (par exemple, pour intégrer les enjeux de santé environnementale dans la planification urbaine).

Le PNSE 3 n'étant pas conçu comme un plan de recherche, l'identification d'axes scientifiques structurants était improbable. De fait, le Plan renvoie à des besoins de connaissances disséminés au fil des actions.

Outre la diversité des sujets, il cible les différentes étapes de la construction scientifique, demandant parfois la réalisation de travaux sur la compréhension des phénomènes, parfois des outils applicables immédiatement. De ce fait, des écarts de maturité entre les domaines de connaissance apparaissent : le Plan va jusqu'à proposer des solutions pour assurer la « translation » de la recherche vers des innovations et le partage de l'information.

On suivra ici le fil directeur du Plan dans quelques domaines, en reprenant certaines des actions énoncées tout au long du Plan pour illustrer cette logique.

Enfin, mentionnons que la « double entrée » – par la santé et par l'environnement – utilisée dans le Plan n'est pas encore étayée par une construction scientifique qui serait elle aussi « santé-environnement ». Là encore, le PNSE 3 contient une initiative innovante déjà évoquée, la promotion du paradigme de l'exposome.

Quelques domaines d'action intégrateurs

Dans des domaines classiques comme la qualité de l'air, mais aussi sur des sujets plus proches des « émergences », comme les champs électromagnétiques, les

perturbateurs endocriniens ou les nanomatériaux, on peut trouver dans le PNSE des schémas intégrateurs en dépit de la dispersion apparente des actions qu'il propose. Il est alors plus aisé de repérer le rôle des développements scientifiques par rapport aux travaux de recensement ou de gestion. Nous citerons ici deux exemples.

En ce qui concerne la qualité de l'air, le PNSE 3 aborde l'air intérieur (Plan Qualité de l'air intérieur). En relation avec les sciences de l'environnement, il faut citer les travaux sur les émissions possibles de produits toxiques par certains mobiliers, par des produits ménagers, des bougies et encens, ou encore sur un sujet bien investigué, le radon.

Pour l'air extérieur, le PNSE 3 contient des actions sur les pesticides et les pollens présents dans l'air, en plus de celles portant sur les polluants atmosphériques habituellement suivis par les textes européens relatifs à la qualité de l'air⁽³⁾. Pour ces derniers, le PNSE 3 dépend de travaux de recherche nationaux, qui sont également menés aux niveaux européen et international sur la prévision des pollutions et sur les stratégies optimales de réduction des émissions de différents secteurs (domestique, industriel, secteur agricole, transports). En effet, des actions ciblent la « réduction des émissions de polluants atmosphériques nocifs pour la santé et ayant un impact sur le climat » et demandent d'« améliorer les connaissances... à différentes échelles et (de) mieux caractériser les sources ». Les mécanismes de la formation des particules secondaires, de leur transport et de leur évolution sur des échelles allant du champ proche jusqu'à l'international sont ainsi évoqués, ainsi que les phénomènes de mouvements d'air à des échelles très fines.

En aval de la recherche, le lien avec l'action à l'échelle européenne est en fait plus important que ne le mentionne le PNSE 3, puisqu'il faut aujourd'hui prendre en compte la mise à disposition par la Commission européenne des « services » de COPERNICUS⁽⁴⁾, et en particulier celle du service sur le changement climatique et la surveillance de l'atmosphère (CAMS : *Copernicus Atmospheric Monitoring Service*), qui fournit prévisions et données aux utilisateurs et dans lequel les acteurs français du domaine jouent un rôle important (Météo France, INERIS, les membres du consortium PREV'AIR sur les prévisions de la qualité de l'air).

Sur les perturbateurs endocriniens (PE), les actions sont au nombre d'une dizaine, mais elles sont plus proches de la trentaine si l'on inclut les angles d'attaque où les perturbateurs endocriniens ne sont qu'une composante parmi d'autres (par exemple, le *biomonitoring*, où les PE ne représentent qu'une partie des toxiques recherchés : biocides, etc.).

Les actions couvrent l'ensemble de la chaîne, qui va de la recherche sur les mécanismes biologiques (avec, par exemple, le soutien au Programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens) aux positionnements sur les politiques européennes afférentes. Elles comprennent des enquêtes sur les expositions et la présence

de toxiques dans les milieux naturels (l'eau, par exemple) ou dans des objets (comme les jouets), l'étude de substances spécifiques (expositions et classements demandés à l'ANSES et à l'ANSM) et le développement de méthodes de substitution et, enfin, des mesures pratiques (voir la certification volontaire de papiers thermiques sans bisphénol-A (BPA)).

La demande d'« acquérir des moyens d'identifier le caractère perturbateur endocrinien des substances chimiques » vise un chaînon manquant au sein de cet ensemble, car les équipes de recherche n'ont pas vocation à transformer leurs outils en méthodes qui soient reconnues, qualifiées et utilisables par tous.

Pour caractériser les propriétés de perturbation endocrinienne, on constate en aval des développements de la recherche une carence de méthodes d'essai validées. Il a donc été envisagé la création d'une plateforme publique-privée pour assurer (ce que ne peuvent assumer les équipes académiques) le lourd processus de répétabilité, d'essais circulaires et de tâches requises en vue d'une reconnaissance internationale (OCDE et ISO, notamment) des méthodes d'essais. Le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer a demandé à l'INERIS et au MEDEF d'investiguer un partenariat public-privé pour organiser une validation des méthodes utilisables pour caractériser des propriétés de perturbation endocrinienne.

Trois composantes sont identifiées : une structure décisionnelle et financière, une structure opérationnelle disposant d'un réseau de laboratoires (pour la réalisation des tests de validation) et un comité statuant sur la « pertinence » de la pré-validation d'une méthode tenant compte des besoins des parties intéressées : organisations internationales (OCDE, ECVAM, ISO), communauté scientifique, entreprises, ONG... Un colloque destiné à débattre de ces points s'est tenu le 30 juin 2016.

L'exposome

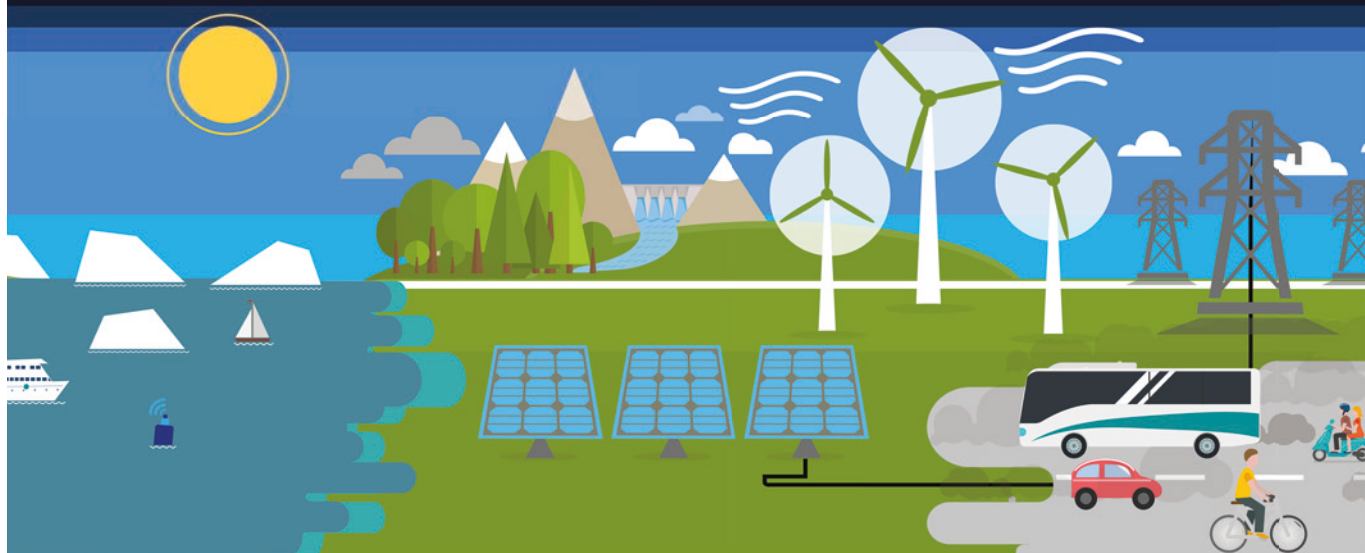
L'objectif scientifique le plus ambitieux du Plan reste sans doute la promotion du concept d'« exposome », qui est conçu comme un « changement de paradigme » permettant de « prendre en considération toutes les sources de pollution ou d'exposition susceptibles de concourir à l'altération de la santé des individus » dans une démarche qui rapproche calculs classiques d'exposition environnementale, mesures des contaminations des individus et études de génomique et d'épigénétique.

(3) Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe.

(4) <http://www.copernicus.eu/>



Climate change: who says too much information leads to misinformation?



© COPERNICUS



« Il faut aujourd'hui prendre en compte la mise à disposition par la Commission européenne des " services " de COPERNICUS ».

Le point fort de l'exposome est que les acteurs du Plan peuvent y rattacher aisément leurs activités : « expologie » traditionnelle (calcul des expositions en fonction des concentrations dans l'environnement et des modes de vie), *biomonitoring*, recherches sur les pathologies (qui peuvent associer les approches mécanistiques de toxicités immédiates ou différées).

Mais, outre le fait que les acteurs ont des interprétations différentes de ce concept d'exposome, il reste à mettre au point et à appliquer les outils permettant de relier entre elles ces différentes approches.

Même pour un seul contaminant, le cumul des voies d'exposition (ingestion, inhalation, voie cutanée) peut parfois être impossible faute de disposer de données de base. Ainsi, dans le PNSE 3, pour compléter les données sur les pesticides, c'est la voie de l'inhalation qui est investiguée, mais pour les nanoparticules, c'est la voie alimentaire que l'on cherche à estimer. Même en disposant des données nécessaires, il faut, de plus, pour pouvoir « sommer », une modélisation dite toxicocinétique ou toxicodynamique pour arriver à une « équivalence » dans un organe donné. C'est l'objet d'une des actions du Plan, qui a pour but de définir des « indicateurs d'exposition intégrée ».

De la même manière, pour pouvoir « remonter » des mesures de *biomonitoring* aux expositions, ce type de modèle est requis, en particulier pour identifier les principales sources de la contamination des individus.

Au-delà, la question est posée du lien avec la réponse biologique globale aux expositions multiples et aux comportements, qui renvoie, quant à elle, à des approches plus fondamentales.

L'exposome avait été évoqué dans un article paru en 2005⁽⁵⁾, qui mettait en regard les limites des approches génomiques pour la compréhension des pathologies et la pauvreté relative des informations relatives aux expositions environnementales (y compris celles relatives aux modes de vie).

À ce stade, il semble bien que l'on puisse considérer l'exposome comme un fil conducteur, mais que des avancées de recherche restent nécessaires pour lui faire pleinement jouer ce rôle d'intégration entre les approches partant de l'environnement et celles partant des pathologies.

Conclusion

Exception faite du sujet de l'exposome, auquel le Plan donne un rôle structurant, la description d'un « volet recherche » dans le PNSE 3 s'avère une démarche difficile.

À première vue, les relations entre les actions et les enjeux de recherche apparaissent très partielles, disparates et ténues. Mais un examen plus approfondi du PNSE 3 révèle

l'existence de quatre logiques : a) une logique d'élaboration de données, b) une deuxième d'utilisation des résultats, c) une troisième de développement de recherches et, enfin, d) une logique d'élaboration et de diffusion d'outils d'évaluation innovants (en ce qui concerne le devenir des contaminants chez un individu, les essais de caractérisation des perturbateurs endocriniens ou la prédiction de la qualité de l'air). Un enseignement marquant du Plan est la nécessité d'une plus grande fluidité entre les travaux amont sur la connaissance des phénomènes et les outils pratiques, si l'on veut concevoir des actions qui soient efficacement ciblées pour améliorer la relation entre santé et environnement.

(5) Complementing the genome with an "exposome": the outstanding challenge of environmental exposure measurement in molecular epidemiology, *Wild CP, Cancer Epidemiol Biomarkers Prev*, 2005, Aug ;14(8):pp. 1847-1850.

La place des océans dans les sciences de l'environnement

Par **Françoise GAILL**

Directeure de recherche émérite au CNRS

L'article identifie l'océan comme un environnement majeur, encore sous-évalué dans le champ des sciences de l'environnement. Nous retracerons ici l'émergence d'une « communauté océan » depuis le Grenelle de la Mer jusqu'à la mise en place du Conseil national de la mer et des littoraux (CNML). Nous nous interrogerons sur l'évolution du terme « océan », sur son usage, au pluriel ou au singulier, et sur sa perception en tant qu'objet physique, en tant qu'environnement ou en tant qu'écosystème et biosphère. L'analyse des interactions océan-climat sera présentée dans cet article comme un des enjeux majeurs actuels avant de considérer la validité de la spécificité du milieu marin et ses implications scientifiques. Pour étudier ce milieu naturel, le développement d'infrastructures dédiées est nécessaire : le nouveau concept d'expéditions légères (telle celle de la goélette Tara Océans) fait évoluer le paysage de l'exploration maritime. Se pose également la question de ce qui est spécifique au milieu marin. Un autre enjeu de l'océan est le formidable potentiel qu'il représente du point de vue énergétique, des ressources minérales et des biotechnologies. Enfin, nous resituerons l'océan en tant que bien commun faisant l'objet d'une attention particulière aussi bien aux niveaux national (loi Leroy) et européen (bon état écologique et économie bleue) qu'au niveau international (avec la question de la gouvernance de la haute mer, actuellement en débat à l'ONU).

Les sciences de l'environnement sont récentes : leur reconnaissance institutionnelle date de moins d'une dizaine d'années. Il s'agit d'un champ scientifique regroupant un ensemble de disciplines et d'approches variées autour de l'environnement. Ce champ scientifique a été institué par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche lors de la création de l'Alliance nationale de recherche pour l'environnement (AllEnvi), en 2010. Cette alliance vise aujourd'hui à coordonner les recherches françaises pour réussir la transition écologique et relever les grands défis sociétaux [1]. Treize thématiques sont identifiées pour relever ceux-ci, dont une seule sur la mer, ce qui permet d'emblée de situer l'importance relative des recherches réalisées dans le domaine marin.

D'ailleurs l'océan constitue-t-il vraiment un environnement ?

Oui, au sens où l'on qualifie un espace au travers de ses propres caractéristiques qui permettent de le définir comme une entité singulière. L'océan borde les continents. Or « ce qui entoure », « ce qui limite » est un des sens étymologiques du terme « environnement » [2]. Cette étendue liquide se différencie bien des parties continentales, qu'elle borde au niveau des littoraux, pour ce que nous en voyons. Ces dernières ne sont d'ailleurs que la

partie émergée de l'iceberg, car cette rencontre terre/mer se prolonge jusqu'au plus profond de l'océan, l'océan se situant en réalité au-dessus du plancher océanique qui est la véritable interface terre/mer, même si ce que nous entendons généralement par « couple terre-mer » désigne des zones fortement anthropisées, comme les littoraux.

Du Grenelle de la Mer au programme de la mer d'AllEnvi

Dès 2008, avec le Grenelle de la Mer [3], l'État a souhaité mettre l'océan et les thématiques maritimes au cœur des politiques publiques après la tenue du Grenelle de l'Environnement. Ce Grenelle de la Mer a été un événement majeur en France. En effet, il a donné naissance à une communauté « mer et océan ». Celle-ci regroupait l'ensemble des acteurs de la mer, qu'il s'agisse de pêcheurs, d'ONG, de quelques scientifiques, d'entrepreneurs de la mer ou de gestionnaires de politiques publiques ou d'élus.

En dépit de confrontations internes et de fortes dissensions, un espace commun était alors identifié autour d'un environnement à explorer, d'écosystèmes à protéger et de ressources à partager, qu'elles soient énergétiques, minérales ou vivantes. De tels événements marquent une génération et fondent une communauté d'intérêts parta-

gés par des ensembles humains qui auparavant étaient dispersés. Ils génèrent également de nouvelles attentes et ambitions, dont celle de la prise en compte de ce nouvel environnement dans les affaires de la nation, y compris dans celles relatives à la connaissance. Les institutions de recherche n'ont pas participé en tant que telles à ce Grenelle, mais celui-ci a donné naissance à 18 comités opérationnels (dans les domaines identifiés au cours du Grenelle), dont celui de la Recherche et de l'Innovation [3] dans lequel les scientifiques étaient parties prenantes.

En 2009, le Comité pour la recherche et l'innovation du Grenelle de la Mer a fait plusieurs recommandations, dont trois ont été identifiées comme prioritaires : la mise en place du COMER (COMité national pour la recherche marine maritime et littorale), la demande de la rédaction d'un programme mer à AllEnvi et la création d'une Fondation de la mer.

C'est ainsi qu'en 2010, à la suite du Grenelle de la Mer, le Conseil national de la mer et du littoral (CNML) a été mis en place, ainsi que, dans son sillage, le COMER [3]. Reconfiguré récemment par Madame Ségolène Royal, la ministre de l'Écologie, il devrait remettre prochainement une Stratégie nationale de la mer, dont la rédaction est l'un des objectifs de la navigatrice Catherine Chabaud, qui a été récemment nommée (en 2016) Déléguée à la mer et au littoral.

D'autres initiatives ont été prises, là encore à la suite du Grenelle de la Mer, comme l'installation, en 2011, du Conseil d'orientation de la recherche et de l'innovation pour la construction et les activités navales (CORICAN).

Enfin, une association pour la Fondation de la mer a vu le jour en 2015 [4].

Le programme Mer a été rédigé, en relation avec le COMER, par AllEnvi [1] en réponse à la demande des ministres chargés de la Recherche et de l'Écologie. Il dresse un état des lieux de la recherche française sur les environnements marins et littoraux, de leurs moyens d'étude et des développements technologiques qui s'y rattachent, et identifie les enjeux de connaissance et de politiques publiques correspondants. Ce programme s'est appuyé sur différentes prospectives institutionnelles, dont celles du CNRS [5] et de l'Ifremer [6] : il souligne l'importance stratégique des approches et des infrastructures pour la connaissance et le suivi des milieux marins (observation, modélisation, expérimentation, plateformes satellitaires, navires et engins autonomes, développement de capteurs...).

L'océan et le climat

Le néologisme « océanographie » a été créé en 1854, en Autriche, à partir du mot « Ozean » [2], auquel a été accolé la terminaison « graphie ». Ce nouveau terme nomme l'étude des océans et des mers de la Terre.

L'océanographie, qui est la discipline instituée s'intéressant aux océans, est multidisciplinaire : elle englobe des branches de la physique, de la chimie, des géosciences et de la biologie associée, mais c'est à la physique qu'elle

doit son cœur de discipline et sa puissance de modélisation des rapports océan/atmosphère. Ce qui au départ a fait la force de l'océanologie, c'est d'ailleurs l'étude de cette interaction océan/atmosphère qui constitue une composante forte des sciences du climat. Cette vision de l'océan s'inscrit aujourd'hui dans l'étude dites des « enveloppes superficielles du système Terre », les distinguant ainsi des profondeurs terrestres [4].

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [7] vient de décider la rédaction d'un rapport spécial qui sera intitulé « Climat, océan et cryosphère », correspondant à une des priorités de la plateforme Océan Climat créée en 2014 en France [8] pour attirer l'attention des politiques sur le rôle majeur que joue l'océan dans le climat [9]. On oublie en effet trop souvent l'importance de l'océan pour le devenir de la planète et son rôle décisif dans le système climatique. L'océan couvre 70 % de la surface du globe, il absorbe environ 22 millions de tonnes de CO₂ par jour, c'est-à-dire le quart du CO₂ émis chaque année par l'homme dans l'atmosphère. L'océan est à l'origine de la moitié de l'oxygène que nous respirons et stocke 90 % du surplus de chaleur dû à l'effet de serre.

En tant que régulateur thermique [10], l'océan interagit de façon dynamique avec l'atmosphère pour assurer l'équilibre du climat, et ce, sur des temps longs. Plus chaudes au niveau des Tropiques, les eaux de surface remontent vers le Nord pour plonger dans les profondeurs après s'être refroidies (par exemple, dans la Mer de Norvège). Elles descendent alors à entre 2 000 mètres et 4 000 mètres de profondeur dans l'Océan Atlantique, le long du continent américain, avant de rejoindre les eaux profondes de l'Antarctique. Puis elles migrent vers les océans Indien et Pacifique, où elles remontent progressivement vers la surface : le cycle complet de ce transit dure près d'un millénaire ! L'excès de chaleur dû au réchauffement climatique absorbé par l'océan pourrait ralentir ce gigantesque tapis roulant, appelé « circulation thermohaline » [11], ce qui aurait pour effet de freiner en retour la capacité de l'océan à absorber ledit excédent de chaleur.

Qu'advierait-il ainsi de l'évolution du climat, si l'océan n'était pas là pour jouer un rôle de modérateur et jusqu'à quand sera-t-il en mesure d'assurer un tel rôle ? [8]. Il est encore trop tôt pour le dire, mais les résultats scientifiques montrent que l'océan tempère le changement climatique [12], qu'il est un puits de carbone et un accumulateur de chaleur, mais qu'il est, lui aussi, en train de changer. Depuis une trentaine d'années, les eaux de surface se réchauffent en moyenne de 0,2°C par décennie. Certains indices du ralentissement du « tapis roulant » ont déjà été relevés dans l'Atlantique Nord. Mais on manque de données pour démontrer sérieusement l'existence d'un changement dans la circulation océanique elle-même. Selon Thomas Stocker [13], on s'attend à un accroissement de la fréquence et de l'intensité d'événements climatiques extrêmes, comme les tempêtes, les cyclones ou les moussons. Une conséquence du réchauffement des eaux de surface est en tous cas d'ores et déjà palpable : dans l'une des régions de l'océan qui s'est réchauffée le plus rapidement au monde entre 2004 et 2013, le Golfe



Photo © V. Hilaire-Tara expéditions_ Expédition Tara Océans

La goélette Tara et ses filets Bongos doubles en expédition.

« Mais c'est le programme Tara Océans [16] qui a été le premier à illustrer cette vision de l'océan en s'intéressant d'abord au vivant et à sa biodiversité pour structurer l'expédition éponyme et organiser des coopérations avec des océanographes. »

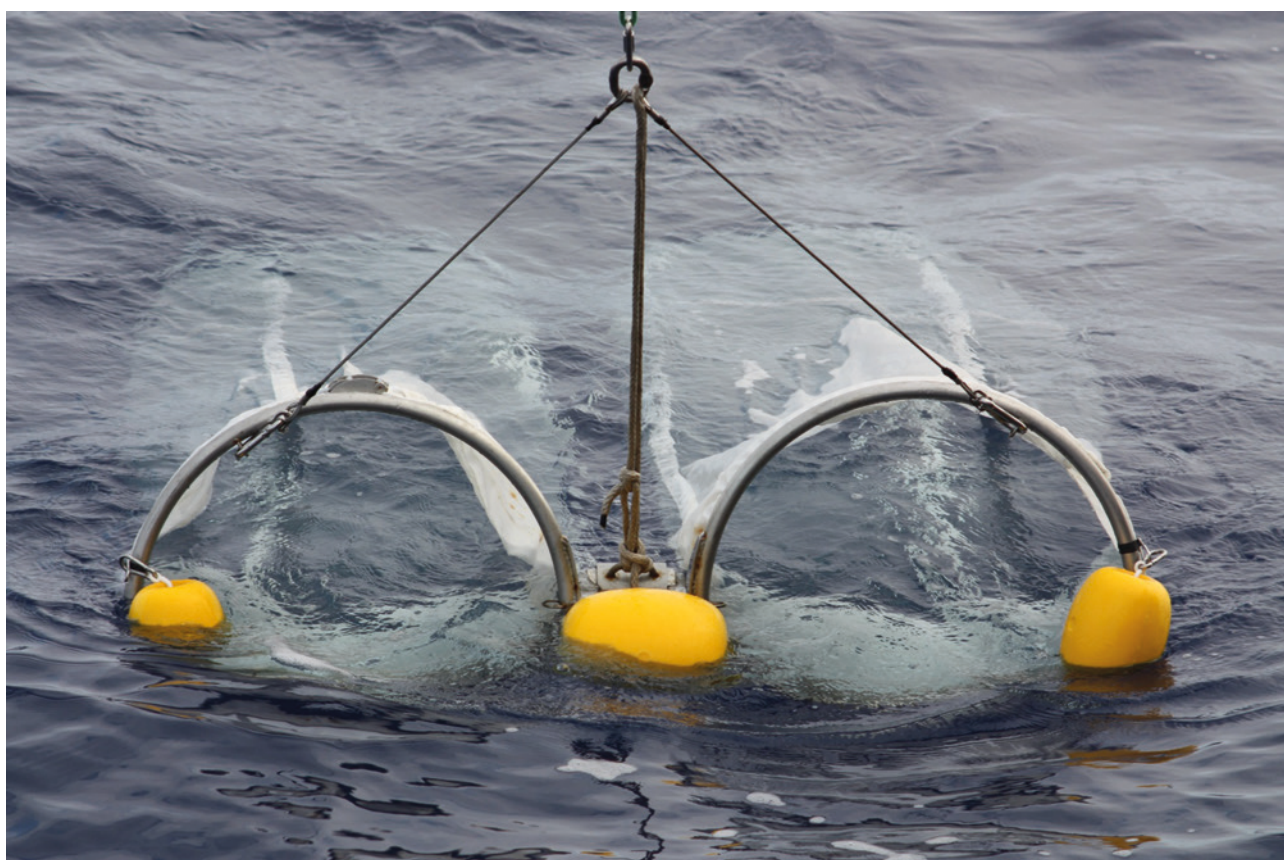


Photo © S. Bollet-Tara expéditions_ Expédition Tara Océans

Filets Bongos servant à la collecte d'échantillons planctoniques.

du Maine (qui se situe sur la côte Est de l'Amérique du Nord), le stock de morue a brusquement décliné au cours de cette même période.

Le réchauffement de l'atmosphère entraîne mécaniquement celui des eaux salées. En effet, l'océan se dilate, et donc le niveau de la mer s'élève, et ce d'autant plus vite que la fonte des glaces s'accélère. Prendre l'océan en compte dans le système climatique est désormais une des priorités du GIEC, qui avait défriché cette question dans son 5ème rapport, attirant l'attention sur cet environnement majeur dans le système climatique. Les modèles envisageaient, il y a encore peu, une hausse minimale du niveau des mers d'un quart de mètre dès la fin du siècle, avec un maximum de 80 centimètres. Et les dernières publications montrent que si l'on tient compte de la fonte des glaciers de zones non prises en compte initialement dans les modèles du GIEC (pour différentes raisons) comme le Groenland et l'Antarctique [14], l'élévation du niveau des mers pourrait atteindre près de 2 mètres à la fin du XXIe siècle. On en voit d'emblée les conséquences catastrophiques pour les populations humaines et leur environnement : érosion, affaissements, submersion partielle (voire disparition totale) de certaines îles. Et les estimations actuelles indiquent que la moitié des espèces marines abritées dans les récifs coralliens pourraient avoir disparu à l'horizon 2050 [8]. On comprend donc aisément l'inquiétude des États insulaires et leur attachement à voir les océans pris en considération dans les questions climatiques.

L'océan et la biosphère

Il est une vision de l'océan qui décentre l'objet visé non plus vers sa partie physique mais vers le vivant, faisant de l'océan un environnement particulier de l'ensemble « biosphère ».

Le *World Ocean Assessment* publié par les Nations Unies en 2015 [15] (mais trop souvent passé inaperçu) a identifié cet aspect. Mais c'est le programme Tara Océans [16] qui a été le premier à illustrer cette vision de l'océan en s'intéressant d'abord au vivant et à sa biodiversité pour structurer l'expédition éponyme et organiser des coopérations avec des océanographes. Tara Océans est le premier programme de recherche d'envergure *in natura* à avoir envisagé l'océan tel que l'on peut le voir en tant qu'environnement ou qu'écosystème, car l'écosystème étudié est présenté dans *Océanomics* [17] comme le plus grand des écosystèmes planétaires.

L'océan est ainsi diversement apprécié par les divers acteurs concernés. Enveloppe fluide du système Terre (si l'on se place du point de vue de l'océanographe), environnement incluant un écosystème planétaire (comme le plancton) pour Tara Océans ou, plus récemment, et plus simplement, « écosystème », puisque le préambule de la Convention de Paris de décembre 2015 (COP 21) mentionne, pour la première fois et de manière explicite, l'existence de l'océan en le considérant non pas comme un environnement, mais comme un écosystème. Et l'océan y est d'ailleurs plutôt identifié comme étant un ensemble

d'écosystèmes puisqu'il parle d'océans au pluriel (quand les Nations Unies définissent l'« Océan » comme le système englobant la diversité des milieux océaniques. Le passage mentionnant l'océan dans la Convention de Paris est le suivant : « *Notant qu'il importe de veiller à l'intégrité de tous les écosystèmes, y compris les océans, et à la protection de la biodiversité, reconnue par certaines cultures comme la Terre nourricière, et notant l'importance pour certaines de la notion de "justice climatique", dans l'action menée face aux changements climatiques ...* ».

L'Océan, cet ensemble d'océans spécifiques, serait alors le plus grand écosystème planétaire.

Mais les questions scientifiques qui se posent en milieu marin ou en milieu terrestre sont-elles si différentes ?

A priori, il n'y a aucune raison, du point de vue disciplinaire, à ce qu'il y ait une spécificité des sciences de la mer, si ce n'est la spécificité des approches en elles-mêmes. En effet, l'océan est plus difficile d'accès que l'espace continental et des infrastructures dédiées à son étude se sont fait jour au cours de l'histoire des sciences [18]. Les marins ont eu besoin de navires océanographiques ou de stations marines, et plus récemment se sont développées des instrumentations sous-marines (sous-marins, drones ou *gliders*) et des approches satellitaires.

Il existe également de nouvelles infrastructures, comme les Observatoires Génomiques (GO, pour *Genomics Observatories*) [19]. Ces dispositifs ont pour objectif de quantifier les interactions biotiques d'un écosystème et d'élaborer des modèles de la biodiversité pour prédire la qualité et la distribution des services écosystémiques. Ils sont répartis sur l'ensemble de la planète et beaucoup d'entre eux sont marins (Criobe en Polynésie, Roscoff et Banyuls...). Organisés en réseau, ils représentent le « pouls de la planète », avec pour objectif de promouvoir un développement soutenable grâce à une meilleure compréhension des interactions entre l'homme et son environnement. Des données génétiques sont reliées aux données biophysiques et socio-économiques, qui permettent d'observer le flux de la variation génétique dans les écosystèmes humains et naturels et d'intégrer ces informations dans des modèles prédictifs.

Quelques questions ouvertes

Mais, en fait, les caractéristiques de l'espace-temps de l'environnement marin peuvent être considérées comme spécifiques, de par les caractéristiques physiques du milieu et de par ses dimensions au regard de l'échelle du vivant, en termes de continuité spatiale et de dynamique temporelle. La vie est certes apparue dans les océans. Mais c'est après sa sortie des eaux que sa diversification a explosé à une époque relativement récente [18]. Les dimensions spatiales de l'océan sont gigantesques à l'échelle du vivant et de l'évolution de la biosphère et de la dynamique de ce milieu, ainsi que du point de vue de son importance dans le fonctionnement du système Terre. Elles le sont également du point de vue de leur faible anthropisation à l'échelle planétaire et de leur statut de patrimoine commun de l'humanité [20].

Cette biosphère marine est un ensemble de communautés juxtaposées, dont on ignore encore le fonctionnement et la nature des interactions. 250 000 espèces marines sont identifiées, ce qui est bien peu par rapport au nombre des espèces continentales [18]. Mais y a-t-il de bonnes raisons de penser que le nombre des espèces marines serait inférieur à celui des espèces des écosystèmes terrestres ?

Qu'en est-il de la connectivité en milieu marin et des échanges entre espèces ? Est-elle du même ordre que celle que l'écologie chimique met actuellement au jour dans les écosystèmes terrestres [21] ?

Qu'en est-il des échanges génétiques, des processus symbiotiques, des ensembles biogéographiques, des chemins évolutifs ?

Si ces questions sont abordées en ce qui concerne les écosystèmes littoraux, peu de choses sont connues sur ceux de la haute mer (à l'exception de l'écosystème planctonique exploré par Tara Océans).

On pense, par exemple, aux écosystèmes profonds qui se sont développés autour des dorsales océaniques en utilisant non pas la photosynthèse, mais la chimiosynthèse, dont on ignore encore l'universalité du phénomène à l'échelle des systèmes océaniques [22].

Il en va tout autant de l'espace gigantesque de bio-prospection qui reste à explorer, qu'il s'agisse des ressources génétiques potentielles ou des biotechnologies marines qui pourront être développées.

Le monde marin dans les sciences de l'environnement

Malgré son importance en termes de surface planétaire occupée (puisqu'il représente près des deux tiers de la surface de la Terre et qu'il est le premier volume de biosphère), on voit que l'océan est mineur dans le périmètre d'AllEnvi, qui « fédère, programme et coordonne la recherche environnementale française pour relever les grands défis sociétaux » [1]. Et l'on voit, par la même occasion, que l'enjeu « mer » n'apparaît pas comme aussi déterminant que peuvent l'être d'autres grands défis sociétaux, comme l'alimentation, l'eau, le climat et la préservation des territoires.

En juillet 2009, le Grenelle de la Mer insistait sur « l'abysmal besoin de connaissances ». Cette affirmation reste d'actualité, tandis que se font jour des impératifs internationaux, européens et nationaux relatifs au milieu océanique. L'objectif de l'Union européenne de restaurer et de maintenir un bon état écologique des eaux marines à l'horizon 2020 [23] est ainsi indissociable de l'obtention de données scientifiques et du développement de nouvelles approches [24]. Qu'il s'agisse de l'évaluation de l'état écologique des eaux ou de celle de l'impact environnemental des activités humaines, de la définition d'un bon état écologique, ou bien encore de la définition des objectifs et indicateurs associés et de l'application de programmes de surveillance et de mesure, l'ensemble

des recherches actuelles attestent de la vitalité du domaine considéré.

Et depuis la COP 21, quelque chose a changé, en France, dans la manière d'aborder l'océan, notamment avec le vote de la loi Leroy sur l'économie bleue [25] et l'apparition du mot « mer » dans l'intitulé du ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. La décennie en cours marque également une période de prise de décisions importantes au sein du système des Nations Unies et de processus régionaux concernant la gouvernance de l'Océan avec, notamment, à court terme, les négociations pour la définition d'un instrument international de gouvernance de la biodiversité en haute mer (BBNJ) [26]. La notion de bien commun est convoquée, comme celle de patrimoine commun de l'humanité [20].

Le milieu marin est en quelque sorte, pour les sciences de l'environnement, ce que la mer est à la société actuelle, à savoir une inconnue, un territoire ignoré, un continent à découvrir. Mais en dehors de l'exploration elle-même, ce que peut apporter ce milieu aux sciences de l'environnement, c'est une manière de repenser ce domaine, non seulement d'en explorer des espaces inconnus, mais aussi d'en enrichir les problématiques. Car cet environnement sous-évalué du point de vue de la biodiversité et non encore anthropisé (sinon à sa périphérie) peut être source de références pour des questionnements liés à l'évolution ou ayant trait aux processus d'adaptation, aux fonctionnements écosystémiques ou aux structurations des communautés.

Si ces modèles d'une grande diversité restent à explorer, la définition des caractéristiques d'un grand nombre d'écosystèmes, de leurs habitats, de leurs interactions et de leur dynamique est l'un des enjeux majeurs de l'étude du vivant actuel. Et qu'il s'agisse des solutions fondées sur la nature impliquant la mise en place d'aires marines protégées ou d'enjeux économiques basés sur la richesse potentielle des énergies marines, des ressources minérales [27] ou des biotechnologies marines (sans oublier toutes les techniques liées aux sciences de l'ingénieur), il est évident que le fait de disposer d'un espace naturel non encore exploré (et donc non exploité) représente une promesse d'avenir formidable.

Bibliographie

- [1] <http://www.Allenvi.fr>
- [2] Pour la définition des termes « environnement » et « océan », voir : <https://fr.wikipedia.org>
- [3] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-Grenelle-Mer-de-2009-a-2012-.html>
- [4] <http://www.fondationdelamer.org>
- [5] <http://www.cnrs.fr/inee/> et <http://www.insu.cnrs.fr/>
- [6] <http://www.ifremer.fr>
- [7] https://ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml
- [8] <http://www.ocean-climate.org/>

- [9] http://www.liberation.fr/terre/2015/06/04/cop-21-on-a-oublie-d-inviter-l-ocean_1323052
- [10] SPEICH (S.), REVERDIN (G.), MERCIER (H.) & JEANDEL (C.), *L'océan réservoir de chaleur*, fiches scientifiques, Plateforme Océan Climat, 2015, pp. 8-13.
- [11] MOSSERI (R.) & JEANDEL (C.) (Eds), *Le Climat à découvert*, CNRS Éditions, 2013.
- [12] GAILL (F.), « Océan et climat : un inséparable couple », *Marine et Océans*, n°249, 2015, 22 p.
- [13] STOCKER (T.F.), "The silent services of the world ocean", *Science*, n°350, 2015, pp. 764-765.
- [14] DE CONTO (R.M.) & POLLARD (D.), "Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise", *Nature*, n°531, 2016, pp. 587-591.
- [15] <http://www.worldoceanassessment.org/>
- [16] <http://oceans.taraexpeditions.org/>
- [17] Oceanomics : <http://www.oceanomics.eu/>
- [18] DAVID (B.), OZOUF (C.), TROUSSELIER (M.) & al., *Mondes marins : voyage insolite au cœur des océans*, CNRS Éditions et Cherche Midi, 2013, 182 p.
- [19] JOLY (D.), FAURE (D.) & SALAMITO (S.), *L'empreinte du vivant*, CNRS Éditions et Cherche Midi, 2015.
- [20] LAMY (P.), « Le Bien commun, nouveau paradigme de la gouvernance des océans », *Revue Maritime*, n°505, 2015, pp. 40-47.
- [21] HOSSAERT McKEY (M.) & BAGNÈRES-URBANY (A.G.), *Écologie chimique : le langage de la nature*, CNRS Éditions et Cherche Midi, 2012, 192 p.
- [22] LEVIN (L.) & LE BRIS (N.), "The deep ocean under climate change", *Science*, n°350, 2015, pp. 766-768.
- [23] GAILL (F.), « Quel devenir pour l'océan et ses littoraux », in *Quelles solutions face au changement climatique ?*, LAVILLE (B.), THIEBAULT (S.) & EUZEN (A.) (eds), CNRS Éditions, 2015, pp. 148-154.
- [24] MOULINIER (H.), « La Stratégie maritime de la France et ses perspectives », in *Annales des Mines, Responsabilité et environnement*, n°70, avril 2013, pp. 81-87.
- [25] http://www.assemblee-nationale.fr/14/dossiers/economie_bleue.asp
- [26] <http://www.un.org/depts/los/biodiversity/prepcom.htm>
- [27] DYMENT (J.), LALLIER (F.), LE BRIS (N.), ROUXEL (O.), SARRADIN (P.-M.), LAMARE (S.), COUMERT (C.), MORINEAUX (M.) & TOUROLLE (J.) (coord.), « Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective », rapport, CNRS, Ifremer, 2014, 930 p. : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Expertise-scientifique-collective,38968.html>

L'économiste face aux enjeux environnementaux ⁽¹⁾

Par Christian DE PERTHUIS

Professeur à l'Université Paris-Dauphine, chaire « Économie du climat »

De David Ricardo (1772-1823) à Robert Solow (né le 23 août 1924), le capital naturel est représenté comme un stock de ressources épuisables, dont la rareté constitue une contrainte pour la croissance. Cette représentation ne permet pas d'appréhender les enjeux résultant de la dégradation des systèmes de régulation naturels, comme l'érosion de la biodiversité, les pollutions de l'air et de l'eau, le réchauffement climatique. Il convient donc de dépasser cette représentation standard pour y intégrer la valeur économique apportée par la protection de ces systèmes de régulation. Cela requiert un élargissement de la tarification environnementale au moyen de la taxation, de marchés de quotas ou d'une compensation écologique. L'intégration de la valeur environnementale dans l'économie soulève des problèmes de redistribution que le politique doit traiter à partir de règles combinant efficacité et équité. La question climatique fournit en la matière un terrain de travaux pratiques en grandeur réelle.

La double composante du capital naturel

Les économistes ont longtemps conçu l'environnement comme un stock de ressources, qui peuvent être épuisables (métaux, énergies fossiles...) ou renouvelables (eau, air, biodiversité...). D'où une crainte séculaire de « manquer » modélisée par Ricardo ou Jevons dès le XIX^e siècle, que l'on retrouve dans les travaux de Meadows ou dans ceux du Club de Rome : la croissance va buter sur la rareté physique des ressources. Ce à quoi Robert Solow et les économistes de la croissance rétorquent que le mur de la rareté est sans cesse repoussé par l'innovation technique et la capacité des acteurs économiques à trouver des substituts aux ressources, qui deviennent coûteuses du fait de leur raréfaction. De fait, cela semble fonctionner aussi bien pour le pétrole que pour les métaux et les terres rares – dont les pénuries régulièrement annoncées ne cessent d'être repoussées. Ce faisant, Solow et ses successeurs restent dans le même cadre d'analyse – celui d'un capital naturel représenté comme un stock de ressources s'intégrant dans la fonction de production classique, aux côtés du capital et du travail ⁽²⁾.

L'amplification de la question environnementale conduit l'économiste à dépasser ce mode de représentation. Plus que le manque de pétrole, c'est le réchauffement climatique provoqué par un usage inconsidéré des énergies fossiles qui pourrait menacer notre mode de vie ; les réductions des stocks de morue ou de sarcelle marbrée sont des pertes assez anodines en tant que telles, au regard de l'appauvrissement de la biodiversité qu'elles révèlent.

Historiquement, la rareté des terres agricoles (qui est à la base du modèle de Ricardo) n'a pas bloqué la croissance, mais la perte de fertilité des sols et le dérèglement du cycle de l'eau douce vont constituer des problèmes majeurs durant ce siècle. Pour appréhender correctement les questions environnementales, l'économiste doit élargir sa vision en intégrant dans sa boîte à outils les systèmes de régulation naturels.

Comment définir ces systèmes ? À la suite des travaux de l'Institut de la résilience de Stockholm ⁽³⁾, on a pu identifier neuf ensembles de fonctions régulatrices associées à neuf « frontières planétaires » définies par les scientifiques.

L'idée est qu'au-delà d'un certain seuil (qu'il est toujours très difficile d'estimer), l'une au moins des neuf grandes fonctions régulatrices du système naturel n'est plus assurée. Le franchissement de ce seuil fragilise la reproduction de l'ensemble des ressources naturelles. Ces fonctions régulatrices peuvent être globales, comme dans les cas de l'effet de serre pour le climat ou de la couche d'ozone

(1) Cet article s'inspire directement de l'ouvrage coécrit avec Pierre-André Juvet, *Green Capital, A New Perspective on Growth*, Columbia University Press, 2015.

(2) Voir notamment SOLOW (Robert), "Sustainability: An economist's perspective", in Robert et Nancy Dorfmann (éd.), *Economics of the Environment. Selected readings*, W. W. Norton, New York, 1993.

(3) Deux synthèses de ces travaux (accessibles aux non scientifiques) ont été publiées : ROCKSTRÖM (J.) et al., "Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity", *Ecology & Society*, 14 (2), 2009a, p. 32, et ROCKSTRÖM (J.) et al., "A safe operating space for humanity", *Nature*, vol. 461, 2009b.

Photo © SIPANY/SIPA



Le président des États-Unis, Barack Obama, remettant la Médaille d'Honneur au Prix Nobel d'économie, Robert Solow, dans l'East Room de la Maison Blanche, 2014.

« Les économistes ont longtemps conçu l'environnement comme un stock de ressources, qui peuvent être épuisables (métaux, énergies fossiles...) ou renouvelables (eau, air, biodiversité...). D'où une crainte séculaire de « manquer » modélisée par Ricardo ou Jevons dès le XIX^e siècle. [...] Ce à quoi Robert Solow et les économistes de la croissance rétorquent que le mur de la rareté est sans cesse repoussé par l'innovation technique et la capacité des acteurs économiques à trouver des substituts aux ressources, qui deviennent coûteuses du fait de leur raréfaction. »

pour le filtrage des rayons ultraviolets. Elles peuvent résulter de l'agrégation de systèmes agissant à l'échelle locale, comme c'est le cas pour les pollutions de l'air, le cycle de l'eau, la fertilité des sols ou la biodiversité.

La notion de « frontière planétaire » renvoie au concept d'irréversibilité. Solow nous rappelle à juste titre le génie des hommes pour trouver des substituts aux ressources qui se raréfient. En dépit du progrès général de leurs connaissances, ce génie ne leur donne pas les moyens de reconstituer les systèmes de régulation supportant la reproduction de ces ressources. On saura trouver des substituts au pétrole si celui-ci finit par se raréfier, mais

on ne trouvera pas de substitut au système climatique si on le laisse se dérégler. On saura se passer des métaux rares (aujourd'hui indispensables à la fabrication des objets électroniques qui nous envahissent), mais sans jamais acquérir la capacité de remplacer la forêt tropicale dans sa fonction de pourvoyeuse de diversité biologique.

À partir du moment où il définit le capital naturel comme un ensemble recouvrant, d'un côté, les ressources rares présentes à l'état naturel et, de l'autre, les systèmes de régulation assurant leur reproduction, l'économiste doit analyser les interactions entre ces deux composantes.

La première s'intègre depuis longtemps dans le fonctionnement de l'économie de marché qui donne une valeur de rareté aux ressources naturelles en leur affectant une rente. L'économiste américain Harold Hotelling (1895-1973) a théorisé cette économie de la rente en traçant des trajectoires optimales d'utilisation de ces ressources dans le temps. À mesure que la rente attire des moyens pour exploiter plus de matières premières, elle accroît la pression environnementale en dégradant les systèmes qui en assurent la reproduction. La raison principale de ce phénomène est bien connue depuis les travaux de l'écologue américain Garret Hardin (1915-2003) : l'usage de ces systèmes de régulation bénéficiant à tous n'est pas valorisé par notre système économique, car il est gratuit. Si l'on ne change pas les règles du jeu, cette gratuité provoquera la destruction de ce bien commun environnemental.

À l'échelle locale, les travaux de l'économiste américaine Elinor Ostrom (1933-2012) ont montré que la protection d'un bien commun environnemental exigeait l'alignement des intérêts des parties prenantes qui peut être obtenu dans le cadre de gouvernances participatives ⁽⁴⁾. Mais à l'échelle de l'économie mondialisée, cette protection requiert l'inclusion d'une nouvelle valeur, associée à la protection de ce bien qu'est la rente environnementale, qui puisse contrecarrer les incitations destructrices du capital naturel émanant de la rente hotellingienne.

Si la nature n'a pas de prix, sa destruction, elle, a un coût !

« Quel que soit le prix que l'on donne à La Joconde, cela ne dirait rien de sa valeur » : cette formule du regrette Jacques Weber (1946-2014) exprime la perplexité de l'économiste face à la question de la valeur de la nature, ce bien unique et non reproductible. Sur le marché de la reproduction d'œuvres d'art, des millions d'exemplaires de La Joconde se vendent à des prix variant suivant la qualité de l'image, sa taille, son support... Ce sont des marchandises comme les autres. La Joconde, elle, est inestimable – comme le sont Notre-Dame de Paris, l'œuvre de Victor Hugo ou celle de William Shakespeare et... la nature ! Non reproductible, la nature est également un bien indivisible. Pas plus qu'on ne pourrait découper La Joconde en petits rectangles, comme des échantillons de moquette dont on ferait ensuite le commerce, on ne peut saucissonner la na-

(4) OSTROM (Elinor), *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*, Cambridge University Press, 1990.

ture pour organiser l'échange de ses démembrements sur un marché. Il n'est pas question ici de « marchandiser » la nature, suivant l'expression consacrée.

Si vouloir donner un prix à la nature n'a pas de sens, il est de multiples situations où nos sociétés doivent évaluer les coûts de sa dégradation. En mars 1989, le pétrolier Exxon Valdez déversait 42 000 tonnes de pétrole brut dans le détroit du Prince-William, en Alaska, à la suite de son naufrage, déclenchant une marée noire affectant un écosystème très fragile. Cinq ans après cette catastrophe, Exxon Mobil était condamné à une amende de 5 milliards de dollars sur la base d'un rapport d'un groupe d'experts présidé par deux prix Nobel d'économie⁽⁵⁾. Après recours, la Cour suprême des États-Unis divisait cette somme par dix. Finalement, Exxon a dépensé plus de 3 milliards de dollars pour le nettoyage des côtes, la reconstitution de la faune et le dédommagement des pêcheurs.

Intégrer la valeur de la protection du capital naturel dans le fonctionnement de l'économie consiste à inclure cette valeur *ex ante* pour inciter les acteurs de l'économie à la prévention plutôt qu'à la réparation. Les principes de base de cette intégration ont été posés par l'économiste britannique Arthur Cecil Pigou (1877-1959), qui a montré, dès le début du siècle dernier, comment la taxation permettait

de corriger certaines défaillances des marchés en internalisant le coût des dommages environnementaux.

Pour tarifier correctement la pollution au moyen de la taxe, il faut s'accorder sur l'évaluation des dommages qu'elle induit. Les travaux des économistes de l'environnement ont constitué une boîte à outils mise à la disposition des politiques, auxquels échoit la responsabilité de trancher entre des résultats dont la pluralité reflète la diversité des approches et la complexité du sujet⁽⁶⁾.

Mais, en dépit de ces apports des disciplines écono-

(5) Le panel d'experts nommé par la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) et co-présidé par K. Arrow et R. Solow a estimé ces coûts en utilisant la technique de l'évaluation contingente.

(6) Voir KOLSTAD (C.), *Environmental Economics*, Oxford University Press, 2010. Le cas de l'estimation du « coût social » du carbone est à cet égard emblématique. Les travaux des économistes fournissent une pluralité de valeurs associées à des hypothèses différentes concernant le taux d'actualisation, les modèles d'impact, le traitement du risque... Le politique doit ensuite trancher en retenant l'une de ces valeurs. Dans le cas français, cet arbitrage « politique » a été délégué à un groupe d'experts réunis sous la présidence d'Alain Quinet, lequel a retenu une trajectoire unique à partir de travaux de modélisation qui ne convergeaient pas spontanément (Voir : La valeur tutélaire du carbone, rapport de la Commission Quinet, La Documentation Française, mars 2009).



Photo © US Coast Guard/ EPA/MAXPPP

Opération de nettoyage de côtes souillées par la marée noire provoquée par le naufrage de l'Exxon Valdez, Baie du Prince-William (Alaska), 1989.

« Si vouloir donner un prix à la nature n'a pas de sens, il est de multiples situations où nos sociétés doivent évaluer les coûts de sa dégradation. En mars 1989, le pétrolier Exxon Valdez déversait 42 000 tonnes de pétrole brut dans le détroit du Prince-William, en Alaska, à la suite de son naufrage, déclenchant une marée noire affectant un écosystème très fragile. »

miques et du principe désormais promu par l'OCDE du « pollueur-payeur », les avancées restent timides dans le monde réel. La fiscalité verte ne dépasse pas 3 % des recettes fiscales des pays de l'OCDE (elle est constituée aux deux tiers de taxes sur les carburants, elle répond davantage à des fins de rendement fiscal qu'à de réelles visées environnementales).

Une façon symétrique d'introduire la valeur environnementale dans l'économie consiste à plafonner *ex ante* le niveau acceptable des émissions de polluants, puis à rendre cessibles des droits à émettre. La rareté introduite par le plafond ainsi instauré fait émerger un prix qui révèle la valeur que la société accorde à la protection de l'environnement. Cette approche est souvent rattachée aux travaux fondateurs de l'économiste britannique Ronald Coase (1910-2013), bien que ce dernier ait davantage creusé la question de la définition des droits d'usage sous l'angle des contrats privés que sous celui des politiques publiques. Comme la taxe pigouvienne, l'instrument des marchés de permis a quitté les manuels d'économie pour trouver trois applications pratiques : la gestion des quotas de pêche (où l'instrument répond à ses objectifs), celle de pollutions atmosphériques locales aux États-Unis (où il a fonctionné avant d'être abandonné au profit d'instruments réglementaires) et celle de la gestion des émissions de CO₂ (avec des résultats jusqu'à présent mitigés).

Sous condition de concurrence parfaite, les deux méthodes de tarification sont rigoureusement équivalentes et permettent d'atteindre un objectif environnemental au moindre coût : s'il revient à l'autorité publique de fixer la taxation, les agents économiques réagissent en procédant à toutes les réductions de pollution dont le coût est inférieur à la taxe. Et si c'est l'autorité publique qui fixe un plafond, les échanges de permis entre les acteurs qui sont soumis au plafond font émerger un prix qui est égal à la taxe. Dans la réalité, les conditions d'une concurrence parfaite ne sont jamais réunies, et les avantages et inconvénients de chacune des deux méthodes dépendent des profils respectivement des fonctions de dommages et des courbes de coûts d'abattement.

Une troisième voie de tarification environnementale consiste à tarifer non plus une dégradation de l'environnement, mais une amélioration de son état résultant de pratiques vertueuses. Les mécanismes de compensation écologique qui peuvent se greffer à un marché de quotas (comme c'est le cas des mécanismes de projet du protocole de Kyoto) ou à une obligation administrative (cas de la compensation des pertes de biodiversité aux États-Unis ou en France) en sont l'un des instruments privilégiés. On peut également y associer les techniques de paiement pour services environnementaux, qui se développent dans le cadre des politiques de protection de la forêt. Ces techniques « positives » ont la faveur des acteurs qui en bénéficient. Mais du fait d'une grande difficulté à contrarier les effets d'aubaine, elles ne peuvent servir que d'appoints durant les phases de la montée en régime de tarifications environnementales.

Malgré les apports conséquents des disciplines économiques, la tarification des coûts de la dégradation du capital naturel reste marginale. Il y a de multiples raisons à cet écart entre les préconisations des économistes et les choix opérés par les politiques. La plus importante semble résider dans l'insuffisance de l'attention qui est apportée aux questions de redistribution.

Économie politique de la tarification environnementale

Imaginons une économie constituée d'un berger vivant de sa capacité à tondre les moutons et à laver leur laine grâce à l'eau d'une rivière et d'un propriétaire apportant le troupeau et le capital physique (terre, bergerie...). Le travail du berger serait rémunéré en fonction de sa productivité mesurée par le nombre de toisons propres à l'heure. Le capital du propriétaire serait rémunéré au taux de profit moyen de l'économie. La fonction de production classique donne une représentation schématique du processus, avec deux facteurs de production rémunérés à leur productivité marginale.

À la suite d'une pollution de la rivière, le berger est contraint de passer au nettoyage à sec et sa productivité est divisée par deux. Une partie de la production ne venait donc ni du travail ni du capital, mais de la capacité de l'écosystème à reproduire de l'eau propre. Du coup, se pose la question « qui va payer le coût de la pollution ? » Il s'agit là d'une question essentielle pour toute stratégie ambitieuse de tarification environnementale.

Une première voie serait de faire supporter l'intégralité de ce coût par le travail. Le propriétaire n'aurait alors aucune raison de déplacer ses capitaux, et le berger ferait les frais de l'opération. C'est ce type d'option qui a été retenu durant les premières phases de mise en place du système européen des quotas de CO₂, pendant lesquelles l'allocation gratuite des quotas a eu pour effet de restituer l'intégralité de la rente environnementale aux entreprises. Ce principe de l'allocation gratuite généralement considéré comme inefficace par les économistes a du reste été maintenu pour l'industrie, au motif d'un risque de délocalisation du capital.

Une seconde voie serait de faire supporter l'intégralité de ce coût au capital. Cela permettrait au berger de continuer à percevoir son salaire... du moins aussi longtemps que le propriétaire maintiendrait ses capitaux sur le site ! Dans le cas du système des quotas de CO₂, cette option consisterait à rendre toutes les allocations payantes, mais sans rien restituer aux entreprises du produit des enchères. Comme il est probable que les entreprises récupéreraient une partie de la rente environnementale en augmentant leurs prix de vente, du fait de leur structure oligopolistique, il serait difficile de garantir l'objectif distributif, sauf à introduire un contrôle des prix et à quitter progressivement la régulation par les marchés.

Dans la pratique, les expériences réussies de tarification environnementale sont celles qui trouvent le bon compromis entre les deux cas extrêmes vus précédemment. La

Suède est ainsi parvenue à porter sa taxe carbone domestique au-delà de 100 € la tonne de CO₂ grâce à un consensus patiemment tissé entre les différentes forces politiques et sociales du pays.

L'économiste peut aider à trouver ce type de compromis en rappelant quelques règles d'efficacité et d'équité.

En matière d'efficacité, la règle d'or est qu'il faut viser l'unicité du prix de la taxe ou du permis qui doit refléter le coût réel des dommages environnementaux, en résistant aux sirènes appelant à des prix ou à des taxes différenciés. Le poids des taxes environnementales est généralement plus élevé pour les bas revenus, ce qui constitue un obstacle, de taille, à leur acceptabilité. La bonne réponse n'est pas l'exonération des plus pauvres, mais la mise en place de transferts compensatoires forfaitaires. De la même manière, si la taxe verte menace l'équilibre économique de certaines industries, il ne faut non pas les exempter, mais utiliser les produits de la taxe pour faciliter leur restructuration. Enfin, argument trop rarement entendu, si les coûts d'abattement diffèrent d'un secteur à l'autre, il faut se garder de toute modulation sectorielle de la taxe : les gains d'efficacité sont d'autant plus élevés que la distribution des coûts d'abattement est ouverte !

La deuxième règle d'or concerne les impacts macroéconomiques. La tarification environnementale doit être substitutive : à chaque euro de taxe verte supplémentaire doit correspondre un euro en moins pour des impôts pesant sur d'autres assiettes. Simple à énoncer, cette règle est difficile à appliquer, car le contribuable croit rarement aux promesses d'allègements fiscaux. Pour le convaincre, il convient de discuter de l'usage de la taxe verte bien en amont du processus et de s'assurer de la simultanéité entre la perception de la taxe et sa redistribution dans le système économique *via* la baisse d'autres charges. Si l'on parvient à réduire des impôts pesant sur l'équilibre économique, on obtient un « deuxième dividende » (suivant l'expression consacrée), qui limite (ou compense entièrement) l'impact récessif de l'impôt vert ⁽⁷⁾. Le dilemme classique entre croissance économique et protection de l'environnement est par là même atténué, voire supprimé. Dans un contexte de chômage structurel, substituer de l'impôt vert à des charges pesant sur le travail est une démarche qui prend évidemment tout son sens.

Conclusion : des travaux pratiques en grandeur réelle pour le climat

Parmi les différents systèmes de régulation naturels à protéger, le climat représente un cas emblématique. Sa protection requiert une approche coopérative entre les pays, puisqu'il s'agit de réduire drastiquement le volume global des gaz à effet de serre rejetés dans l'atmosphère. D'où la négociation engagée sous l'égide des Nations

Unies dès le début des années 1990. Techniquement, le climat se prête bien à une tarification environnementale, car on dispose d'un étalon commun, la « tonne équivalent CO₂ », dont on est totalement démuné dans d'autres cas, notamment dans celui de la protection de la biodiversité.

Les marchés de quotas de CO₂ ont été retenus comme l'instrument principal pour tarifier les émissions tant dans le cadre du protocole de Kyoto que dans celui des politiques climatiques conduites en Europe ⁽⁸⁾, en Amérique du Nord et en Chine. La courbe d'expérience est assez décevante, le dispositif d'échange de quotas prévus à Kyoto n'ayant pas fonctionné et la gouvernance des marchés de permis s'avérant nettement plus compliquée que ce qui avait été initialement envisagé. Au terme de dix années d'expérience, les marchés n'ont délivré ni le signal prix ni les réductions d'émissions attendus.

Tant que l'on reste dans un monde fragmenté, chaque zone géographique redoute qu'un prix du CO₂ significatif n'affecte sa compétitivité, et l'on reste dans une course au « moins disant » en matière de prix du carbone. Pour quitter la fragmentation en visant un prix mondial, il faut aborder des questions de redistribution que les négociateurs ont jusqu'à présent éludées : un prix de 25 dollars la tonne de CO_{2eq} s'appliquant à la totalité des émissions mondiales représenterait 1 250 milliards de dollars au démarrage. Question clef de la négociation : comment redistribuer une telle somme entre les pays ?

L'Accord climatique de Paris (issu de la COP 21) propose un nouveau cadre de négociations partant des intentions affichées par les gouvernements, qui sont appelés à augmenter l'ambition de leurs contributions au travers d'un processus itératif de révisions quinquennales ⁽⁹⁾. Ce cadre, qui laisse à chaque pays le soin de mettre en place les instruments économiques devant favoriser la décarbonisation de son économie, incite à la coopération en la matière par la voie de l'article 6 de l'Accord. Si une réelle dynamique s'enclenche, l'élargissement de la tarification du carbone et sa coordination avec les autres instruments d'action vont devenir un enjeu clef pour les prochaines années. Ce sont des travaux pratiques à une échelle jusqu'à présent inconnue qui s'annoncent pour l'économiste.

(7) GOULDER (L. H.), "Environmental taxation and the "double dividend": A reader's guide", NBER Working Paper, n°4896, 1994.

(8) En complément à des taxes domestiques, pour les pays d'Europe du Nord, l'Irlande et la France.

(9) Pour une analyse détaillée de l'Accord de Paris, voir CITEPA, De la COP 21 à la COP 22 et au-delà, dossier spécial, mars 2016. Pour les volets économiques, voir : DE PERTHUIS (C.), « L'accord de Paris sur le climat, la négociation peut commencer ! », Informations & Débats de la Chaire « Économie du climat », n°44, avril 2016.

Comment l'environnement transforme-t-il la discipline économique ?

Par Antonin POTTIER

CERNA (Centre d'économie industrielle), Mines ParisTech

Nous examinerons ici trois voies par lesquelles la considération des problèmes environnementaux transforme (ou devrait transformer) la discipline économique, à travers les exemples du changement climatique et de la perte de biodiversité. Concernant les objectifs des politiques publiques, la remise en cause de l'analyse coût/bénéfice laisse place à des analyses multicritères, qui tiennent compte d'une irréductible diversité des points de vue. En ce qui concerne les moyens, la focalisation sur les instruments économiques s'est faite dans l'ignorance de leur application sur le terrain. Aboutir à des politiques effectives demande de combler cet écart entre la théorie et la pratique. En matière d'organisation de la discipline économique, la recherche aujourd'hui largement individuelle est inadaptée. Mais une dimension plus collective est en train d'apparaître, notamment grâce à la modélisation de systèmes complexes qui mobilisent de larges équipes de chercheurs.

Face aux défis environnementaux auxquels doivent faire face les sociétés modernes, on se demande souvent ce que les disciplines scientifiques peuvent faire pour l'environnement. Mais la question inverse est rarement posée : comment l'environnement modifie-t-il la discipline économique ? Comment le souci de sa protection fait-il évoluer les pratiques scientifiques ? Comment celles-ci devraient-elles changer ?

À la lumière du changement climatique et des pertes de biodiversité, mon propos est d'éclairer cette rétroaction de l'environnement sur la discipline économique. Il s'appuiera sur les transformations en cours, mais sans éviter quelques propos normatifs. Je discuterai successivement des objectifs des politiques environnementales, tels que la discipline économique les envisage, des moyens de ces politiques et, enfin, de l'organisation académique de la discipline.

Les objectifs des politiques

La méthode traditionnelle de l'analyse économique à laquelle on a recours pour apprécier le bien-fondé des politiques environnementales est l'analyse coût/bénéfice. Un projet dont les bénéfices excèdent les coûts est justifié d'un point de vue économique. Cette façon de concevoir les projets débouche souvent, en particulier dans les travaux théoriques, sur la recherche de la politique optimale, à savoir celle qui maximise le bénéfice net.

Les premières analyses économiques du changement climatique remontent à la fin des années 1970. Elles chiffrèrent les coûts de stabilisation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les cibles de stabilisation étaient fixées sur la base d'un jugement personnel après une prise en considération des risques décrits par la climatologie. Dans un mouvement typique de la théorie économique, William Nordhaus, un des pionniers de l'analyse économique du changement climatique, trouve cette démarche non satisfaisante (NORDHAUS, 1982) : la cible devrait être non pas une donnée d'entrée de l'analyse, mais le résultat d'un calcul économique pondérant les bénéfices des réductions d'émissions avec leur coût. L'ambition est de fonder sur la raison économique les cibles de concentration. L'analyse économique se présente donc comme le lieu de mise en balance de volontés contradictoires : celle de limiter le plus possible le réchauffement climatique et celle de contenir les coûts des réductions des émissions. De ce chiffrage des différents intérêts en présence devait résulter une cible qui fût incontestable (RANDALLS, 2011).

Après trente ans de débats, la mise en œuvre de ce programme se solde par un échec. L'analyse coût/bénéfice n'a pas réussi à éteindre les contestations : au contraire, elle a obscurci les véritables conflits en les transformant en simples controverses techniques. Très vite, le choix du taux d'actualisation, qui est nécessaire pour dérouler



Photo DR

William Nordhaus (né le 31 mai 1941), professeur d'économie américain qui enseigne à l'Université de Yale.

« Les premières analyses économiques du changement climatique remontant à la fin des années 1970 fixaient les objectifs de stabilisation des concentrations de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur la base d'un jugement personnel. Cette thèse a été remise en cause par William Nordhaus, qui estime que la cible doit être non pas une donnée d'entrée de l'analyse, mais le résultat d'un calcul économique pondérant les bénéfices des réductions d'émissions avec leur coût. »

l'analyse coût/bénéfice sur une très longue période et déterminant pour les résultats, révèle une dimension intrinsèquement normative ⁽¹⁾. Cela implique, malgré les dénégations de certains économistes, des jugements de valeur en matière de prise de décision collective relatifs notamment à la priorité à donner au futur ou aux plus démunis.

En dehors de ces choix proprement éthiques, c'est au sujet des mécanismes à prendre en compte que se déroulent les débats. Plusieurs modèles les décrivant existent sans qu'il soit possible de les départager. La qualification même des faits pose problème, en particulier l'ampleur des dommages du réchauffement à prendre en compte (TOL, 2003). C'est le sens des arguments avancés par Martin Weitzman (2009), pour qui la trop forte probabilité



Photo DR

Martin Weitzman (né le 1^{er} avril 1942), professeur d'économie américain qui enseigne à l'Université d'Harvard.

« L'analyse de William Nordhaus a été critiquée par Martin Weitzman, pour qui la trop forte probabilité d'événements catastrophiques rend l'analyse coût/bénéfice impraticable dans le cas du changement climatique. »

d'événements catastrophiques rend l'analyse coût/bénéfice impraticable dans le cas du changement climatique.

Des visions du monde, qui combinent des valeurs concernant des choix éthiques et des croyances relatives à la description du monde, sont donc toujours impliquées dans l'analyse coût/bénéfice. En conséquence, celle-ci ne peut être ni l'arbitre neutre ni le juge de paix au-dessus des parties qu'elle prétend être.

Portée au départ par des courants critiques, cette remise en cause de la légitimité de l'analyse coût/bénéfice commence à être acceptée par le courant dominant, à l'instar de Weitzman. Cela redonne de la légitimité à des approches dans lesquelles l'analyse économique apporte un éclairage qui vient en complément d'arguments avancés par d'autres disciplines, au lieu de s'en faire l'arbitre. Ain-

(1) Voir la controverse entre Nordhaus et Cline, au début des années 1990, et celle autour du rapport Stern au milieu des années 2000 (GODARD, 2008).

si, par exemple, les arguments des physiiciens concernant les transitions abruptes et irréversibles du climat doivent être écoutés, même s'ils ne sont pas réductibles à des arguments économiques. Des considérations qui ne sont pas commensurables les unes aux autres sont à prendre en compte dans les problèmes environnementaux. Cela favorise l'analyse multicritère, qui met en évidence ces différentes dimensions et rend explicites les valeurs qui orienteront la décision. Comme les considérations économiques y sont à égalité avec les autres, sa diffusion apaisera les relations de la discipline économique avec les autres disciplines scientifiques et atténuera les reproches toujours très vifs d'arrogance à l'encontre des économistes.

Les moyens des politiques

Au sujet des moyens pour mettre en œuvre les politiques environnementales, les évolutions me semblent en retrait par rapport à la discussion de leurs objectifs. La discipline économique est restée majoritairement attachée à ces moyens fétiches que sont, pour elle, les instruments économiques. Ces instruments permettraient d'agir au moindre coût, ils respecteraient la liberté de choix des agents économiques et les inciteraient à révéler les informations dont ils disposent. Leur mode d'action est le changement des prix relatifs, comme l'illustrent les taxes ou les marchés de permis d'émissions des gaz à effet de serre.

Prenons le cas de la protection de la biodiversité. Il s'agit là d'une question notoirement difficile pour les économistes : c'est un mélange d'enjeux locaux et globaux, avec des interactions complexes entre espèces et entre écosystèmes. Face à ce problème d'un genre nouveau, les économistes ont sorti leurs lunettes habituelles.

Partant de l'idée (assez vague) que la biodiversité était une « externalité », on a tenté d'« internaliser l'externalité » au moyen d'instruments économiques. Il y a eu plusieurs avatars de cette idée : d'abord, le développement d'un marché des ressources qui seraient issues de la biodiversité (idée centrale de la Convention sur la diversité biologique) ou, plus récemment, la notion de paiement pour services écosystémiques (PSE). Dans le premier cas, les débouchés commerciaux des ressources génétiques ou des savoirs traditionnels devaient inciter les « propriétaires » de la biodiversité à conserver celle-ci, tandis que dans le second, les « consommateurs » du service écosystémique (régulation des crues, stockage du carbone...) en payaient le prix à ses « producteurs », ce qui assurerait une gestion efficace et une protection optimale.

Le recyclage des solutions économiques a précédé une analyse sérieuse et approfondie des causes des pertes de biodiversité et des moyens d'y remédier. Au demeurant, les études de cas montrent une réalité très éloignée de celle qui sert de base à la théorie (AUBERTIN et al., 2007 ; BOISVERT, 2015). Les marchés sont inexistant. Ce que l'on constate, ce sont tout au plus des transactions commerciales souvent imposées par l'État à l'une des parties. Ainsi, par exemple, au Mexique, l'idée ini-

tiale du PSE, avec l'instauration d'une concurrence entre « producteurs » individuels, s'est rapidement heurtée au caractère encore très largement collectif de la propriété des terres dans ce pays.

Le programme de PSE mis finalement en place s'apparente plus à une forme de transfert forfaitaire à destination des communautés rurales qu'à un instrument économique tel que le conçoivent les économistes (SHAPIRO et McAFEE, 2015). La leçon semble générale : les instruments économiques mis en avant pour faire plaisir aux bailleurs internationaux et à leurs économistes ne sont, le plus souvent, que le déguisement de politiques traditionnelles d'allocation de subventions.

La situation n'est pas fondamentalement différente dans le domaine des marchés de quotas d'émission. Là encore, le fonctionnement réel des instruments économiques est fort éloigné des caractéristiques que lui attribuent les économistes (GODARD, 2014). C'est le cas pour le marché américain du dioxyde de soufre (HAYS, 1998), comme pour les mécanismes de flexibilité du protocole de Kyoto dans lesquels certains ont cru voir l'esquisse d'un marché mondial du carbone (NEWELL et al., 2013).

Ce hiatus entre les solutions telles qu'elles sont et telles que les économistes se les imaginent généralement est dommageable. Efficaces dans le monde de la théorie économique et recommandées à ce titre par les économistes, elles ne sont peut-être même pas effectives dans la pratique. *A contrario*, les solutions mises en place pourraient peut-être être améliorées, si l'on s'attachait à comprendre ce qu'elles font vraiment, au lieu de les appréhender par le biais d'un schéma préconçu.

Mais il y a plus grave que de simplement mal nommer et mal caractériser des dispositifs. En effet, cette focalisation sur les instruments de marché masque la réalité du terrain. Les régulations administratives, en dépit des récriminations contre leur inefficacité, sont très largement utilisées par les États et recueillent souvent la faveur des entreprises. Malgré le discours omniprésent promouvant les instruments de marché, l'essentiel de la régulation de l'environnement, depuis quarante ans, se traduit par des instruments administratifs (PESTRE, 2016) : pour la conservation de la biodiversité, le zonage du territoire et la création de réserves restent des incontournables.

La priorité donnée par le travail théorique aux instruments de marché ne correspond pas du tout à leur importance pratique, de sorte que l'effort de connaissance des économistes paraît mal dirigé, ou plutôt davantage guidé par les contraintes de respectabilité académique propres à la discipline que par un souci de documenter le réel. La faible importance des travaux économiques sur les normes s'explique aussi par les modes d'action de celles-ci, qui sont très différents de ceux auxquels les économistes ont été formés. Les étudier semble demander de véritables monographies au long cours, à l'image de celle de Roqueplo (1988). Cela nous renvoie au questionnement sur l'organisation du champ académique, sur laquelle nous reviendrons.

Ce divorce entre la pensée économique et l'action politico-administrative est un luxe qui n'est plus de mise face à l'ampleur des problèmes environnementaux. Toute tentative pour le résorber est la bienvenue. La nécessité de trouver des solutions effectives doit guider à la fois la théorie et la pratique et encourager un dialogue étroit entre celles-ci.

L'organisation de la recherche

En dernier lieu, je proposerai quelques réflexions sur l'organisation de la discipline.

Étudier les effets réels des instruments économiques, tout comme comprendre les régulations mises en place et leur mode d'action, cela demande la prise en compte de niveaux de détail inhabituels dans les modèles économiques. Il faudrait faire place à plusieurs niveaux de décision, à de nombreux acteurs, à diverses motivations. Cela suggère de concevoir l'économie comme un système complexe, dans lequel l'interaction des plans des agents et l'entrelacement des niveaux hiérarchiques produisent des phénomènes émergents qui ne sont pas réductibles à la volonté de l'un des agents en particulier.

Les systèmes naturels, à l'instar du système climatique, possèdent de multiples caractéristiques qui défient l'analyse. Comment faire, par exemple, lorsqu'un phénomène local, comme la formation des gouttelettes d'eau, qui dépend de caractéristiques fines du milieu, influe sur un phénomène mésoscopique comme la couverture nuageuse, et par là même sur l'albédo de notre planète et, donc, sur la température globale ? Les climatologues ont rapidement fait appel à la modélisation numérique pour intégrer ces phénomènes et rendre compte du réchauffement climatique ⁽²⁾. Or, bâtir un modèle de ce type demande l'engagement de toute une équipe de chercheurs pendant de nombreuses années.

Les limites de la modélisation sont connues : de nombreux paramètres, plusieurs fonctions réduites possibles pour mimer les phénomènes non modélisés, difficulté de tester les modèles rétrospectivement, etc. L'importance prise par le changement climatique dans l'agenda international a forcé la communauté climatologique à trouver des remèdes à ces limites. La méthodologie s'est affermie et les modèles ont gagné en transparence, en particulier avec les exercices de comparaison entre modèles, à l'image des CMIP (*Coupled Model Intercomparison Projects*), qui forment les préalables aux rapports du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat). En lançant des comparaisons calibrées, ces exercices servent à identifier les sources d'accord et de désaccord entre modèles, et donc à cerner les zones sur lesquelles faire porter l'effort de recherche.

Cette méthode se retrouve chez les économistes modélisateurs du système énergétique. Leurs modèles sont également utilisés par le GIEC pour définir des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ainsi que des stratégies pour réduire ces émissions. Là encore, l'importance décisive de ces scénarios pour la politique internationale de lutte contre le changement climatique a poussé à in-

troduire de l'intelligibilité dans les multiples hypothèses retenues, que celles-ci concernent les mécanismes économiques, les règles de décision, les techniques disponibles ou les représentations du progrès technique. Les exercices systématiques de comparaison, à l'instar de ceux réalisés par l'*Energy Modelling Forum* ⁽³⁾, sont déterminants pour comprendre, au-delà des détails de chaque modèle, les hypothèses majeures qui influent sur le résultat final.

On aperçoit là certaines caractéristiques communes à l'étude des systèmes complexes : elle demande des modèles numériques imposants tentant de répliquer le système réel, de larges équipes pour soutenir l'effort de modélisation, enfin des coopérations entre équipes au travers d'inter-comparaisons visant à « faire parler » les modèles.

Cette approche contraste avec celle d'une grande partie de la discipline économique qui réduit, voire ignore, la complexité en sélectionnant des faits stylisés explicables par une unique personne mobilisant la seule puissance de la théorie. La discipline économique gagnerait certainement à s'inspirer de cette approche, en particulier en macroéconomie, où sont criantes les limites des trucs et astuces déployés au fil du temps pour échapper à la complexité, notamment l'agent représentatif. L'essor rapide des modèles multi-agents (*Agent-Based Model*) est un mouvement qui va dans cette direction, mais ceux-ci sont encore regardés avec suspicion par le courant dominant.

Un obstacle empêchant de tirer pleinement parti de ces méthodes est l'organisation largement individuelle de la discipline économique. La grande majorité des articles des publications économiques sont signés par moins de trois personnes, alors que des articles signés par plus de dix personnes sont fréquents en physique comme en biologie.

Dans la discipline économique, le *cursus honorum* récompense avant tout une trajectoire individuelle, et non un effort collectif. Pour se confronter avec réalisme et pertinence aux problèmes environnementaux contemporains, la discipline économique devra accentuer sa reconfiguration autour de collectifs de recherche. Gageons que cette transformation de leur position dans le champ académique aidera les chercheurs en économie à tempérer leur individualisme méthodologique : ce sera là un effet bénéfique, et non des moindres, de la crise environnementale à laquelle nous sommes aujourd'hui confrontés.

Bibliographie

AUBERTIN (Catherine), PINTON (Florence) & BOISVERT (Valérie) (dir.), *Les Marchés de la biodiversité*, Paris, IRD Éditions, 2007.

(2) Pour une présentation des modèles climatiques, voir Jeandel et Mosseri (2011).

(3) Pour d'autres exercices de comparaison, voir IPCC (2014), Annexe II.10.

- BOISVERT (Valérie), *Quel capitalisme pour la biodiversité ?*, in THOMAS & BOISVERT, 2015, pp. 247-261.
- GODARD (Olivier), « Long terme et actualisation : la controverse suscitée par le rapport Stern sur le changement climatique », *Revue de Philosophie économique*, 9(2), 2008, pp. 69-92.
- GODARD (Olivier), « Instruments économiques, justification et normes de justice : le cas de la politique climatique », in HALPERN (C.), LASCOUMES (P.) & LE GALES (P.) (dir.), *L'instrumentation de l'action publique : controverses, résistances, effets*, Paris, Presses de Sciences Po, 2014, pp. 143-159.
- HAYS (Samuel P.), "Emissions Trading Mythology", in *Explorations in environmental history: essays*, Pittsburgh, University of Pittsburgh Press, 1998, pp. 280-290.
- IPCC [EDENHOFER (O.), PICHES-MADRUGA (R.), SOKONA (Y.), FARAHANI (E.), KADNER (S.), SEYBOTH (K.), ADLER (A.), BAUM (I.), BRUNNER (S.), EICKEMEIER (P.), KRIEMANN (B.), SAVOLAINEN (J.), SCHLÖMER (S.), VON STECHOW (C.), ZWICKEL (T.) & MINX (J. C.) (dir.)], *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge et New York, Cambridge University Press, 2014.
- JEANDEL (Catherine) & MOSSERI (Rémy) (dir.), *Le Climat à découvert*, Paris, CNRS, 2011.
- NEWELL (Richard G.), PIZER (William A) & RAIMI (Daniel), "Carbon Markets 15 Years after Kyoto: Lessons Learned, New Challenges", *Journal of Economic Perspectives*, 27(1), février 2013, pp. 123-146.
- NORDHAUS (William D.), "How Fast Should We Graze the Global Commons?", *The American Economic Review*, 72(2), mai 1982, pp. 242-246.
- PESTRE (Dominique), « La mise en économie de l'environnement comme règle : entre théologie économique, pragmatisme et hégémonie politique », *Écologie & Politique*, 52, 2016, pp. 19-44.
- RANDALLS (Samuel), "Optimal Climate Change: Economics and Climate Science Policy Histories (from Heuristic to Normative)", *Osiris*, 26(1), 2011, pp. 224-242.
- ROQUEPLO (Philippe), *Pluies acides : menaces pour l'Europe*, Paris, Economica, 1988.
- SHAPIRO (Elizabeth N.) & McAFEE (Kathleen), *Les paiements pour services écosystémiques au Mexique : rhétoriques et pratiques*, in THOMAS & BOISVERT, 2015, pp. 231-245.
- THOMAS (Frédéric) & BOISVERT (Valérie) (dir.), *Le Pouvoir de la biodiversité : néolibéralisation de la nature dans les pays émergents*, Marseille, Versailles, IRD Éditions, Éditions Quae, 2015.
- TOL (Richard S.J.), "Is the Uncertainty about Climate Change too Large for Expected Cost-Benefit Analysis?", *Climatic Change*, 56(3), février 2003, pp. 265-289.
- WEITZMAN (Martin L.), "On Modeling and Interpreting the Economics of Catastrophic Climate Change", *Review of Economics and Statistics*, 91(1), janvier 2009, pp. 1-19.

Réchauffement climatique : les perspectives des rapports entre science, politique et société

Par Jean JOUZEL et Valérie MASSON-DELMOTTE

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris Saclay

Le 22 avril 2016, 175 pays et l'Union européenne ont signé au siège des Nations Unies, à New York, l'Accord de Paris sur le climat. La vingtaine de pays absents à ce rendez-vous ont jusqu'au 21 avril 2017 pour y apposer leur signature. Il s'agit du premier accord universel sur le climat. Malgré le fossé entre les contributions annoncées par ces pays et l'objectif affiché d'une limitation de l'élévation de la température moyenne de la Planète bien en-dessous de 2°C, voire en-dessous de 1,5°C par rapport au niveau préindustriel, ce caractère universel justifie pleinement que la COP 21 soit considérée comme un succès. Cette réussite a été possible grâce à l'engagement et aux efforts conjugués d'une communauté scientifique quasi unanime dans son diagnostic, de décideurs politiques qui ont compris l'importance des enjeux et de nombreuses composantes de ce qu'il est convenu d'appeler la société civile. Nous analysons dans cet article la façon dont cette synergie s'est progressivement mise en place.

L'Accord de Paris est décrit comme ambitieux, équilibré, dynamique et juridiquement contraignant. Construit sur une démarche pragmatique, il prend le parti de la transparence : chaque pays a mis sur la table ses objectifs de réduction d'émissions de gaz à effet de serre entre 2020 et 2025-2030 et ses efforts d'adaptation au changement climatique. Tous les cinq ans, ces objectifs pourront être révisés à la hausse sur la base d'un inventaire global et en s'appuyant sur les meilleures connaissances scientifiques, en particulier sur les rapports d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC).

Même si tous les engagements étaient réalisés en l'état, les émissions de 2030 seraient de 35 à 40 % trop élevées par rapport aux trajectoires compatibles avec l'objectif de stabilisation du réchauffement atmosphérique à 2°C. Malgré ce fossé, l'Accord de Paris est à juste titre considéré comme un succès, en premier lieu de par son caractère universel. Ce succès s'est construit par étapes successives : celle du diagnostic des scientifiques a été suivie de la prise de conscience des décideurs politiques et, plus récemment, d'une implication croissante de certaines des composantes de la société civile, qu'il est cependant nécessaire d'élargir si l'on veut que l'objectif des 2°C puisse être respecté.

Après des travaux pionniers menés au XIX^e siècle sur l'effet de serre, comme ceux de Joseph Fourier ou d'Arrhénius,

l'action potentielle des activités humaines sur le climat a émergé en tant qu'enjeu scientifique majeur au cours des années 1970 suite au constat d'une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les premières simulations numériques du climat indiquent qu'un doublement de la teneur en dioxyde de carbone (CO₂) de l'atmosphère se traduirait par un réchauffement à la surface de la Terre compris entre 1,5 et 4,5 °C (suivant le modèle considéré).

Une large partie de la communauté scientifique se mobilise pour analyser toutes les facettes des interférences entre les activités humaines et le système climatique. Les résultats publiés en 1987 à partir de l'analyse des glaces antarctiques de Vostok participent à cette prise de conscience : au cours des 150 000 dernières années, les variations du climat et de la concentration atmosphérique en CO₂ ont été étroitement liées. De plus, l'augmentation récente de la concentration atmosphérique de ce composé due aux activités humaines (utilisation de combustibles fossiles et déforestation) marque une rupture par rapport à la gamme de ses variations naturelles. Ces résultats seront confirmés par des forages antarctiques successifs, qui permettent désormais de connaître ces variations naturelles au cours des 800 millénaires écoulés. La communauté scientifique internationale s'organise rapidement. Ainsi, dès 1979, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) a mis sur les rails le Programme de recherche

mondial sur le climat, suivi par d'autres initiatives qui ont permis d'amplifier les recherches sur l'observation du système climatique, la compréhension des processus en jeu et, bien sûr, l'évolution passée et future de notre climat.

Les politiques ne tardent pas à emboîter le pas. Les scientifiques les ont rapidement convaincus de la nécessité d'établir un diagnostic sur l'impact potentiel des activités humaines sur le climat. En 1988, à l'initiative du G7 – dont sont alors membres Margaret Thatcher et George Bush –, est créé le GIEC, qui est placé sous les auspices conjoints de deux organisations dépendant de l'ONU, le Programme des Nations Unies pour l'environnement et l'Organisation météorologique mondiale (OMM).

La mise en place du GIEC doit aussi beaucoup à des scientifiques de renom, parmi lesquels le Suédois Bert Bolin, qui en sera le premier président ⁽¹⁾. Publié en 1990, le premier rapport du GIEC confirme que les activités humaines sont à l'origine d'une augmentation de l'effet de serre à travers l'accroissement des concentrations atmosphériques de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, tels que le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et différents composés chlorofluorocarbonés, et par là même d'une accumulation d'énergie dans le système climatique. Ce rapport précise que la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère (principal gaz à effet de serre) va également s'accroître et amplifier ce réchauffement. Les calculs de cette époque indiquent qu'en l'absence de toute action d'atténuation, le climat moyen risquerait de se réchauffer d'environ 3°C d'ici à la fin du XXI^e siècle, et le niveau de la mer de s'élever de façon significative (de 20 à 65 cm).

L'alerte est clairement exprimée et, dès décembre 1989, les Nations Unies demandent aux gouvernements de mettre sur pied une Convention sur le Changement climatique. Celle-ci sera adoptée le 9 mai 1992 et sera signée par 154 pays (dont les États-Unis) lors du Sommet de la Terre de Rio de Janeiro au cours duquel s'est concrétisée la mise sur pied de deux autres conventions dédiées à la biodiversité et à la lutte contre la désertification. À travers son article 2, la Convention Climat se fixe l'objectif ultime de « stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». C'est là un véritable défi, qui requiert de diminuer les émissions de gaz à effet de serre liées aux activités humaines.

La première COP (*Conference of Parties*), qui rassemble tous les pays signataires de la Convention, se réunit à Berlin en 1995. Deux ans plus tard, à Kyoto, la COP 3 aboutit à la signature d'un premier protocole visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre des pays développés (pays dits de l'Annexe I) de 5,2 % sur la période 2008-2012 par rapport à 1990, l'année de référence. Les décideurs politiques sont allés de l'avant, s'appuyant largement sur le diagnostic du deuxième rapport du GIEC qui conclut qu'« un ensemble d'éléments suggère une influence perceptible des activités humaines sur le climat ». Moins de dix ans se sont écoulés entre la création du GIEC et la signature de ce protocole. Mais sa mise en œuvre ne sera pas à la hauteur de l'ambition, en particu-

lier parce que ce protocole n'est pas ratifié par le premier pays émetteur que sont alors les États-Unis, que préside à l'époque Georges Walker Bush. Plusieurs pays développés n'ont pas respecté leurs engagements. De plus, le mécanisme du protocole n'était pas flexible et n'était pas adapté à la croissance économique rapide de la Chine et d'autres grands pays émergents, dont les émissions de gaz à effet de serre avaient fortement augmenté.

Ces échanges entre la communauté scientifique (*via* les rapports du GIEC, en premier lieu) et les décideurs politiques (*via* les COP) se sont poursuivis depuis Kyoto. Ils s'appuient au moins en partie sur le processus d'approbation des rapports du GIEC, dont la démarche d'expertise collective garantit la qualité. Les représentants des différents pays (constituant l'assemblée plénière du GIEC) jouent un rôle décisif dans le choix des thématiques des rapports spéciaux, dans le cadrage des rapports et lors de la dernière étape, celle de l'approbation ligne à ligne de leurs résumés destinés aux décideurs. À ce stade, toute modification doit s'appuyer sur une conclusion déjà inscrite dans le rapport principal rédigé en toute liberté par les scientifiques. Ce processus d'approbation se traduit par une appropriation par les gouvernements de rapports, dont l'objectif est d'être non pas « *policy prescriptive* », mais « *policy relevant* » : le GIEC ne fait aucune recommandation, mais il fournit aux décideurs politiques les éléments pour qu'ils puissent prendre des décisions en toute connaissance de cause. Ces mêmes gouvernements s'appuient ensuite sur le diagnostic du GIEC lors des négociations conduites dans le cadre de la Convention Climat.

Mais cette dualité n'est pas sans poser problème. En 2009, juste avant la Conférence de Copenhague (COP 15), dont l'objectif était de mettre sur pied un accord « ambitieux » pour l'après-Kyoto, le GIEC (pourtant auréolé, en 2007, du prix Nobel de la Paix conjointement avec Al Gore) avait été l'objet d'une campagne visant à le discréditer. Cette campagne commence par le « *climategate* », avec la publication d'une série de courriels piratés concernant des chercheurs britanniques de l'Université d'East Anglia, puis se renforce par la révélation d'erreurs de calcul. Les auteurs du piratage n'ont pas été identifiés. La divulgation des correspondances des scientifiques illustre, à travers des échanges d'ailleurs assez rudes, la saine divergence d'opinions qui peut exister entre des climatologues. La seule erreur avérée dans le 4^{ème} rapport portait sur la mesure de la fonte des glaciers himalayens. Cette erreur avait été identifiée, mais elle n'avait pu être corrigée, faute de processus le permettant ; une procédure *ad hoc* a été depuis mise en place. Plusieurs discours prononcés lors de

(1) Le GIEC ne réalise pas de travaux de recherche, il fait appel à des centaines de chercheurs de tous les pays pour effectuer, sur la base des publications scientifiques, une évaluation critique de l'état des connaissances en matière de changement climatique. Chaque version de ces rapports fait l'objet d'une relecture critique par des milliers de relecteurs. Enfin, leur « résumé pour décideurs » est approuvé mot par mot lors d'une session plénière des représentants de tous les pays sur la base du rapport scientifique détaillé.

la cérémonie d'ouverture de la COP 15 de Copenhague ont fait référence à ce « *climategate* », ce qui a probablement rendu les négociations plus âpres et plus difficiles. La COP 15, qui a échoué à produire un nouvel accord international, a cependant marqué un tournant dans les négociations multilatérales sur le climat. Elle a inscrit l'objectif de limiter le réchauffement à moins de 2°C et acté le principe d'une approche basée sur des engagements volontaires de chaque pays et sur laquelle s'est construit l'Accord de Paris.



Photo © Fredrick Naumann/ PANOS-REA

Remise du Prix Nobel de la paix conjointement à Al Gore et au Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat (GIEC) représenté par son président, l'Indien Rajendra Pachauri, Oslo, 2007.

« En 2009, juste avant la Conférence de Copenhague (COP 15), dont l'objectif était de mettre sur pied un accord « ambitieux » pour l'après-Kyoto, le GIEC (pourtant auréolé, en 2007, du prix Nobel de la Paix conjointement avec Al Gore) avait été l'objet d'une campagne visant à le discréditer. »

En France et dans d'autres pays, cette période est marquée par la publication de livres grand public empreints d'un climato-scepticisme largement relayé dans les médias. Il est tout à fait légitime que les travaux en sciences du climat et les conclusions du GIEC puissent être remis en cause par des scientifiques de toutes disciplines se-

lon les règles du débat scientifique, en particulier dans des publications « relues par les pairs ». Néanmoins, les débats publics relèvent davantage de la polémique que d'un débat scientifique approfondi et rigoureux, avec des attaques virulentes : ainsi, le GIEC a été qualifié de « système mafieux ». Suite à ces mises en cause, une pétition signée par plus de 600 scientifiques a demandé l'ouverture d'un débat scientifique approfondi.

Organisé à l'Académie des Sciences en septembre 2010, celui-ci a confirmé la solidité des sciences du climat et des conclusions du GIEC sur les causes humaines du réchauffement climatique. Ce constat a été renforcé en 2013-2014 par les conclusions du 5^{ème} rapport du GIEC, qui pointe de façon quasi certaine l'influence humaine comme cause principale du réchauffement climatique des dernières décennies. Ce rapport montre également les risques d'un changement climatique non maîtrisé, les limites des capacités d'adaptation et les stratégies permettant de limiter ce réchauffement tout en assurant un développement économique. Le climato-scepticisme reste néanmoins très présent dans l'arène politique, comme en témoignent les positions adoptées par Donald Trump, le candidat républicain à la présidence des États-Unis.

La société civile n'a pas attendu les années 2000 pour s'impliquer dans le débat sur le changement climatique. En France, le Réseau Action Climat (RAC-France), affilié à l'organisation internationale *Climate Action Network*, fédère dès 1996 les ONG actives sur ce créneau. Certaines ONG participent au titre « d'observateurs » aux réunions du GIEC et/ou à celles de la Convention Climat. Informer, suivre les engagements, proposer des politiques publiques, dénoncer les lobbies ou les États qui freinent l'action internationale sont au cœur des actions du RAC et d'autres ONG, lesquels ont indéniablement joué un rôle clé dans la prise de conscience par les politiques, les citoyens et les entreprises de l'ampleur des problèmes posés par le réchauffement politique.

Certains secteurs industriels ont assez longtemps eu une attitude de déni qui s'est parfois traduite par un encouragement, voire un soutien à des personnalités et à des organisations susceptibles d'apporter de l'eau au moulin des climato-sceptiques, comme en témoigne l'analyse approfondie de Naomi Oreskes et Erik Conway dans leur enquête publiée sous le titre « Les marchands de doute ». Ces acteurs ne se sont pas privés de tout faire pour affaiblir le diagnostic du GIEC. Très présent dans les années 1990, en particulier aux États-Unis et au Canada, cet état d'esprit s'est estompé au cours de la dernière décennie. En 2006, le rapport Stern soulignait que les conséquences du réchauffement climatique pourraient coûter de 5 à 20 fois plus cher que la mise en place d'une politique de lutte contre l'effet de serre. Même si les chiffres avancés sont contestés par certains économistes, ce rapport a indéniablement marqué un tournant dans l'attitude du monde économique vis-à-vis du réchauffement climatique.

En 2010, la conférence de Cancún (au Mexique) marque une étape importante pour tous ces acteurs non-étatiques répertoriés selon neuf catégories majeures par les Nations



Photo © Xiinhua/ZUMA-REA

Action de communication (« Une bouteille à la mer : sauvez des vies à #Cancún ») de l'ONG Oxfam en marge de la Conférence de l'ONU sur le climat à Cancún (Mexique), novembre 2010.

« En 2010, la conférence de Cancún (au Mexique) marque une étape importante pour tous ces acteurs non-étatiques répertoriés selon neuf catégories majeures par les Nations Unies. L'accord reconnaît que *"pour agir efficacement sur tous les aspects des changements climatiques, de multiples parties prenantes doivent être mobilisées aux niveaux mondial, régional, national et local, qu'il s'agisse de gouvernements, y compris les administrations infranationales et locales, d'entreprises privées ou de la société civile ..."* »

Unies ⁽²⁾. L'accord reconnaît que *« pour agir efficacement sur tous les aspects des changements climatiques, de multiples parties prenantes doivent être mobilisées aux niveaux mondial, régional, national et local, qu'il s'agisse de gouvernements, y compris les administrations infranationales et locales, d'entreprises privées ou de la société civile ... »*

À côté de celui des entreprises, le rôle des collectivités – de nature assez diverse d'un pays ou d'un continent à l'autre – y est mis en avant. Celles-ci n'ont pas attendu pour se mobiliser. Dès 2005, se met en place, à l'initiative du maire de Londres, le C40 qui fédère les plus grandes villes du monde ayant décidé de mettre en commun leur expérience en matière de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique. De même, en 2010, le Gouverneur de la Californie, Arnold Schwarzenegger, fonde le regroupement des régions mobilisées pour l'action vis-à-vis du climat, le R20, dont la mission est d'aider les gouvernements subnationaux à mettre en œuvre des projets à faibles émissions de carbone. D'autres initiatives de ce type existent : nous citerons *Climate Chance*, dont

l'objectif est de devenir le rendez-vous régulier des acteurs non-étatiques (collectivités locales, entreprises, associations, syndicats, organismes scientifiques, citoyens) engagés dans cette lutte, avec une première réunion qui sera organisée à Nantes en septembre 2016.

Au-delà du rôle clé des gouvernements, tous ces acteurs ont contribué au succès de la Conférence de Paris, qui s'est largement appuyée sur le 5^{ème} rapport du GIEC. Malgré les contraintes liées à la sécurité de l'événement, les acteurs non-étatiques (ONG, entreprises et collectivités, en premier lieu) ont été très présents lors de la COP 21, que ce soit sur le site du Bourget ou dans le cadre d'évé-

(2) *Les organisations non gouvernementales (ENGO), les milieux professionnels et industriels (BINGO), les administrations locales et autorités municipales (LGMA), les organisations représentant les populations autochtones (IPO), les instituts de recherche et organisations indépendantes (RINGO), les organisations syndicales (TUNGO), les organisations de Femmes et Genre (Women & Gender), les organisations de Jeunesse (YOUNGO) et les organisations agricoles (Farmers).*

nements comme ceux organisés au Grand Palais. La communauté scientifique s'est également engagée dans cette voie en organisant en juillet 2015 un colloque international interdisciplinaire intitulé *Our common future under climate change*, dont une partie importante a été consacrée au déploiement de solutions et au dialogue sciences-société. Enfin, l'année 2015 n'a pas été seulement marquée par l'Accord de Paris, elle l'a été également par la construction cohérente d'un agenda international à l'horizon 2030, qui comprend l'accord-cadre de Sendai visant à réduire les risques de catastrophes et les 17 objectifs du développement durable.

La mission d'« expertise collective », qui est celle du GIEC depuis sa création, va se poursuivre avec un 6^{ème} rapport, qui sera publié en 2022. D'ici là, le GIEC va également préparer trois rapports spéciaux. L'attention suscitée par les travaux du GIEC se reflète dans les attentes très fortes des différents pays qui avaient proposé 31 thématiques de rapports spéciaux ! En septembre 2018, il fournira un rapport spécial sur les impacts d'un réchauffement de 1,5°C au-dessus du niveau préindustriel et les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre associées, dans le contexte du développement durable et de l'éradication de la pauvreté, suite à l'invitation qui lui en a été faite par l'Accord de Paris. Deux autres rapports spéciaux seront rendus en 2019. Ils porteront, respectivement, sur le changement climatique, les océans et la cryosphère ⁽³⁾ et sur le rapport entre le changement climatique et l'usage des sols ⁽⁴⁾. Le GIEC renforcera l'analyse des aspects régionaux du changement climatique, ainsi que la prise en compte des impacts du changement climatique sur les villes, et les défis ainsi que les opportunités liés aux stratégies d'adaptation et d'atténuation de ces impacts.

Après l'Accord de Paris, les enjeux de recherche en sciences du climat restent multiples. Ainsi, pour la partie « physique du climat », le Programme mondial d'étude du climat a défini 7 défis principaux correspondant aux limites des connaissances actuelles ⁽⁵⁾. Une nouvelle initiative de recherche pour cette décennie vise à développer les connaissances permettant de répondre aux risques et aux opportunités du changement global, ainsi que les solutions de transformation vers un développement soutenable : Future Earth est une plateforme qui doit permettre

de construire une recherche orientée vers les solutions susceptibles de répondre aux besoins vitaux (alimentation, eau, énergie et santé) en conciliant développement et impacts environnementaux. Pour cela, elle va renforcer la collaboration entre sciences naturelles, sciences sociales et recherche technologique afin d'identifier les meilleures solutions susceptibles d'être apportées à ces problèmes complexes. La production de ces nouvelles connaissances renforcera les rapports d'évaluation régionaux et globaux établis à l'intention des décideurs et de la société civile, qui seront associés dans une démarche de co-design et de coproduction de connaissances. Enfin, Future Earth vise également à mobiliser une nouvelle génération de scientifiques et à renforcer les capacités des pays en développement.

Le défi posé par l'Accord de Paris est immense. Respecter l'objectif des 2°C (et *a fortiori* celui de 1,5°C) requiert un effort très important de recherche et d'innovation technologique et sociale. Le déploiement rapide des solutions existantes exige que les décideurs politiques et toutes les composantes de la société civile aillent rapidement de l'avant et que les citoyens du monde se sentent de plus en plus concernés par cette question de façon à préserver pour les jeunes d'aujourd'hui un climat auquel il leur sera possible de s'adapter.

(3) Zones enneigées et englacées.

(4) Désertification, dégradation des sols, gestion durable des terres, sécurité alimentaire et flux de gaz à effet de serre des écosystèmes terrestres.

(5) Mieux observer, comprendre et simuler les interactions entre nuages, circulation atmosphérique et sensibilité du climat ; évaluer la fonte des glaces et ses conséquences sur le climat ; caractériser, comprendre, attribuer et simuler les événements extrêmes (vagues de chaleur, précipitations torrentielles, tempêtes et sécheresses) en relation avec le changement climatique ; comprendre les mécanismes du changement de niveau des mers à l'échelle régionale et ses impacts sur les zones côtières ; évaluer les changements de disponibilité en eau et la sécurité d'approvisionnement ; développer les prévisions climatiques à l'échelle de la décennie grâce à une meilleure compréhension des mécanismes de variabilité naturelle (comme les événements El Niño) ; et, enfin, mieux comprendre les processus contrôlant les puits de carbone océaniques et continentaux et leurs relations avec l'état du climat, afin d'anticiper leur évolution future.

La place de l'environnement dans la Stratégie nationale de recherche

Par François HOULLIER

Président-directeur général de l'INRA et président de l'alliance AllEnvi

Adoption des objectifs du développement durable au sommet de l'ONU à New York en septembre 2015, exposition universelle de Milan « Nourrir la planète – Énergie pour la vie », 21^{ème} Conférence des parties à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques à Paris en décembre 2015 : les liens entre environnement et développement sont au cœur de l'agenda international. L'ampleur des transitions en cours, qu'elles soient démographique, alimentaire, climatique, écologique, énergétique..., interroge fortement les sciences de l'environnement, qui couvrent un vaste spectre disciplinaire. La programmation des recherches et le soutien à leurs infrastructures posent des questions de coordination et d'alignement, et ce, à tous les niveaux, du national jusqu'au global. Afin d'éclairer les politiques publiques, ces recherches s'enrichissent de travaux de synthèse destinés à produire des états de l'art ou à éclairer des futurs possibles. Mais elles sont aussi attendues pour stimuler des innovations.

Des recherches par essence pluridisciplinaires définies par référence à des enjeux sociétaux

En 2010, l'intitulé de la Convention de création de l'alliance pour l'environnement « AllEnvi » (alimentation, eau, climat, territoires) illustre clairement le caractère central des enjeux sociétaux pour la définition du périmètre des recherches environnementales. Aux défis de la sécurité alimentaire, de la gestion des ressources en eau, de la compréhension et de la maîtrise du dérèglement climatique, ou du développement territorial, le préambule de cette convention ajoute les enjeux liés à la biodiversité, à la mer et aux risques naturels, ainsi qu'à la « croissance verte » que l'on reformulerait, aujourd'hui, par une référence à la bio-économie et à l'économie circulaire.

Les recherches relatives à ces enjeux mobilisent tout naturellement un vaste spectre de disciplines, d'approches et de techniques allant des sciences de l'univers et des sciences du vivant jusqu'aux sciences humaines, économiques et sociales, en passant par les sciences de l'ingénieur et du numérique. La grande diversité des 12 membres et des 16 membres associés d'AllEnvi ⁽¹⁾ témoigne de l'ampleur du domaine scientifique ainsi couvert et de l'importance de l'interdisciplinarité.

L'étude des connexions entre les enjeux environnementaux et d'autres enjeux sociétaux liés notamment à la santé ou à la transition énergétique, est favorisée par le fait que certains des membres d'AllEnvi (notamment le CNRS, le CEA et l'INRA) sont également membres d'autres al-

liances centrées sur ces mêmes sujets (telles que l'Alliance pour les sciences de la vie et de la santé (AVIESAN) ou l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE)). Ces liens se matérialisent par l'existence de dispositifs partagés avec d'autres domaines, tels que des groupes de travail (par exemple, sur la résistance aux antimicrobiens ou sur l'éco-toxicologie et la toxicologie, à l'interface avec la santé, ou encore sur les usages énergétiques et chimiques de la biomasse, à l'interface avec l'énergie) ou des infrastructures de recherche (par exemple, dans le domaine des sciences du vivant).

Enfin, cette convention pointe d'autres aspects essentiels des recherches environnementales. Elle souligne la nécessité d'articuler la compréhension et la dissection fine de mécanismes et de processus, qui interviennent à différentes échelles d'espace et de temps, avec l'analyse et la modélisation de systèmes qui sont caractérisés par leur complexité et la multiplicité des interactions entre leurs composantes naturelles ou anthropiques. Elle fait également référence à la nécessité de mener de front, en les combinant, recherche, ingénierie et innovation, expérimentation, observation et formation.

De façon générale, les recherches environnementales françaises ainsi définies sont de très bonne qualité, avec des niveaux relatifs de citation des publications françaises sensiblement supérieurs à la moyenne mondiale et souvent plus élevés que dans d'autres disciplines : l'Obser-

(1) <http://www.allenvi.fr/allenvi/membres>

vatoire des sciences et technologies montre que c'est le cas dans les « sciences de l'univers » et, plus encore, en « biologie appliquée-écologie »⁽²⁾.

La place de l'environnement dans la Stratégie nationale de recherche

Faisant suite à la Stratégie nationale de recherche et d'innovation de 2009 et prévue par la loi Fioraso relative à l'Enseignement supérieur et à la Recherche du 22 juillet 2013, la Stratégie nationale de recherche (SNR) a été adoptée en 2015. Structurée autour de dix défis sociétaux et intitulée « France Europe 2020 », elle a été élaborée en cohérence avec les priorités retenues dans le cadre du programme-cadre européen Horizon 2020.

La recherche environnementale est concernée par plusieurs défis de la SNR : en tout premier lieu, par les trois défis « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique », « Sécurité alimentaire et défi démographique » et « Transports et systèmes urbains durables ». Mais elle l'est aussi par les défis « Une énergie propre, sûre et efficace » en ce qui concerne la recherche de substituts au carbone fossile pour l'énergie et la chimie, « Le renouveau industriel » dans une logique d'économie circulaire et citoyenne faisant appel de façon croissante aux matériaux biosourcés, « Santé et bien-être » au titre des interactions entre la santé humaine et l'environnement, par exemple sur des sujets tels que l'exposition humaine aux facteurs environnementaux, « Société de l'information et de la communication », les objets connectés et l'exploitation des grandes masses de données concernant l'environnement à l'instar de bien d'autres secteurs, ou encore « Une ambition spatiale pour l'Europe » au titre de l'observation de la Terre, des territoires et de leurs milieux et ressources.

Les recherches environnementales sont aussi concernées par trois des cinq programmes prioritaires d'action retenus dans ce cadre : non seulement le programme « Système Terre : observation, prévision, adaptation », notamment pour développer des services climatiques et environnementaux, mais aussi le programme « Big data » pour renforcer les capacités d'analyse, de modélisation et de simulation des phénomènes environnementaux, et « Biologie des systèmes et applications » en raison de son fort potentiel de développement dans les bio-industries.

Des infrastructures de recherche diversifiées et distribuées

L'un des volets importants des stratégies nationale et européenne de recherche concerne les infrastructures. Celles-ci prennent une place croissante dans le domaine de l'environnement et concernent aussi bien l'analyse que l'expérimentation, l'observation ou la modélisation. À titre d'exemple : l'exploration de la biodiversité des écosystèmes microbiens, marins ou continentaux mobilise les outils les plus contemporains de la génomique et de la bio-informatique ; l'étude de mésocosmes⁽³⁾ est essentielle pour tester des hypothèses sur la réponse des écosystèmes aux variations de l'environnement ou pour modéli-

ser les interactions entre géotypes végétaux, conditions climatiques et pratiques agronomiques. Par ailleurs, la simulation des modèles climatiques et leur couplage avec d'autres modèles (par exemple, écologiques ou agronomiques) requièrent des moyens de calcul de plus en plus puissants.

En complément aux dispositifs analytiques, expérimentaux ou de calcul, l'observation joue un rôle particulier au sein de ce vaste spectre d'infrastructures de recherche. Elle est en effet rendue nécessaire par la complexité des systèmes et des phénomènes étudiés, notamment lorsqu'il s'agit « de passer à l'échelle ». Ces observations s'appuient sur le développement de l'instrumentation scientifique, notamment sur celui de capteurs. Elles sont souvent distribuées ou en réseau. L'infrastructure européenne ICOS (*Integrated Carbon Observation System*)⁽⁴⁾ en est une illustration : elle-même composante d'un réseau mondial plus large, ICOS rassemble plus d'une centaine de stations (réparties dans onze pays) de mesure des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et de leurs flux au sein d'écosystèmes continentaux ou marins.

L'importance des dispositifs de programmation conjointe européens et internationaux

Dans une large mesure, les recherches environnementales traitent de crises et de transitions à l'échelle globale – dérèglement climatique, transition alimentaire et nutritionnelle, transition écologique – et de biens communs, dont la nature même suscite des collaborations internationales, soit que leur portée globale déborde du cadre national – c'est typiquement le cas du climat, des océans ou de la sécurité alimentaire –, soit qu'ils motivent des approches partagées entre pays ou entre grandes régions du monde – par exemple, en matière de biodiversité, de gestion de l'eau, de qualité de l'air ou de risques naturels.

Cette situation se traduit par l'existence d'un grand nombre de dispositifs européens ou internationaux de coordination des recherches. Au niveau européen, six des dix initiatives de programmation conjointe concernent ainsi le domaine de l'environnement : *Climate* (sur le climat), *FACCE (Initiative on Agriculture, Food Security and Climate Change)* (sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique), *Oceans* (sur les océans), *Urban Europe* (sur les aires urbaines), *Water Challenges for a Changing World* (sur l'eau) et, en commun avec le domaine biomédical, *HDHL (Healthy Diet for a Healthy Life)* (sur les liens entre alimentation et santé). À ces initiatives s'ajoutent de nombreux dispositifs européens, notamment des réseaux au premier rang desquels l'ERANET (*European Research Area Network Biodiversa*) (sur la biodiversité).

(2) Voir : http://www.obs-ost.fr/fr/indicateur/analyses_et_indicateurs_de_reference

(3) Voir, par exemple : <http://www.cnrs.fr/inee/outils/ecotrons.htm>

(4) <https://www.icos-ri.eu>

Dans le cadre international, la situation est voisine avec un ensemble de grands programmes, d'alliances ou d'initiatives qui concernent les changements globaux, avec notamment la nouvelle plateforme internationale *Future Earth* ⁽⁵⁾, qui a vocation, depuis 2015, à rassembler les grands programmes sur la biodiversité (*DIVERSITAS*), sur la géosphère et la biosphère (*IGBP, The International Geosphere-Biosphere Programme*), sur les dimensions humaines (*IHDP, The International Human Dimension Programme on Global Environmental Change*) ou encore sur le climat (*WCRP, The World Climate Research Programme*).

Dans le domaine particulier de l'agriculture et de l'alimentation, ce besoin de coordination se traduit par différentes initiatives. Par exemple : l'Alliance globale de recherche sur les gaz à effet de serre d'origine agricole (*GRA* ⁽⁶⁾) issue de la Conférence de Copenhague (COP 15, 2009) et qui associe plus de 40 pays ; le projet d'intercomparaison et d'amélioration des modèles agricoles couplés à des modèles climatiques (*AgMIP* ⁽⁷⁾) initié par les États-Unis, qui implique aujourd'hui plus de 50 organismes répartis sur tous les continents ; ou encore la grande initiative dite « 4 pour 1 000 » ⁽⁸⁾ lancée par la France au moment de la COP 21 (Paris, 2015), qui vise à accroître la teneur en matières organiques des sols agricoles et forestiers dans le triple but d'une amélioration de leur fertilité (et donc de la sécurité alimentaire), de leur adaptation au changement climatique (par exemple, grâce à une meilleure rétention de l'eau) et de la réduction des émissions nettes de gaz à effet de serre (grâce à la séquestration de carbone dans les sols).

On le comprend aisément : un enjeu majeur de la programmation des recherches environnementales porte sur l'amélioration de la capacité de la communauté scientifique à coordonner et à aligner les nombreuses initiatives nationales, européennes et multilatérales, qui émergent en réponse aux transitions actuelles.

Des recherches qui éclairent la décision publique par des expertises et des prospectives

Le fait même que les recherches environnementales concernent des biens communs et des transitions majeures qui opèrent sur des périodes longues conduit les organismes de recherche concernés à développer de nouvelles formes d'activité scientifique : des méta-analyses pour synthétiser les résultats obtenus dans différents contextes, des expertises scientifiques collectives pour réaliser des états de l'art sur des questions complexes, des études prospectives pour compléter l'analyse des situations actuelles par des scénarios qui explorent des futurs alternatifs possibles. Il s'agit donc à la fois de rassembler et de synthétiser les connaissances et d'anticiper les trajectoires des transitions engagées ou d'éventuelles ruptures.

De tels travaux sont conduits pour éclairer la décision publique à l'échelle nationale ou, de façon croissante, régionale. Ils ont aussi donné lieu à la création de dispositifs internationaux de grande ampleur, dont le plus célèbre

est certainement le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Celui-ci a été « créé en 1988 en vue de fournir des évaluations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socioéconomiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade ». Il a inspiré la création, en 2012, de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES).

C'est dans cet esprit que de nombreuses prospectives ont été par le passé, ou sont encore aujourd'hui conduites pour analyser les questions relatives à la sécurité alimentaire. Les études prospectives réalisées par le CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement) et l'INRA (Institut national de recherche agronomique) sur la sécurité alimentaire mondiale (PAILLARD et al., 2010) ou de la région Afrique du Nord-Moyen-Orient (LE MOUËL et al., 2015) illustrent bien le besoin d'explorer les interactions entre les changements de régime alimentaire, les pertes et gaspillages dans les systèmes agroalimentaires de production et de distribution, les usages des terres et des ressources naturelles (au premier rang desquelles l'eau et le sol), le commerce entre zones structurellement déficitaires ou excédentaires en produits agricoles et alimentaires, le dérèglement climatique et les progrès techniques. À l'échelle européenne, la prospective conduite sur la bioéconomie (KOVACS, 2015) a exploré les liens entre les différents usages – actuels, mais aussi futurs – des bioressources dans l'alimentation humaine et animale, l'énergie, la chimie et les matériaux.

La multiplication de ces travaux a conduit le groupe de travail « Prospectives » d'AllEnvi à répertorier et à annoter les nombreuses prospectives et études de scénarios conduites dans le monde, avec pour objectif d'en repérer les traits et les déterminants communs. C'est là un projet ambitieux, puisque, en avril 2015, le groupe avait déjà répertorié 187 documents parus depuis 2008, soit en seulement sept ans.

Des recherches qui nourrissent et stimulent l'innovation

Les recherches environnementales suscitent également diverses formes d'innovations technologiques aussi bien que sociales, qui prennent la forme de produits, de procédés, de services, de pratiques ou d'organisations. Au-delà de l'appui aux politiques publiques, leurs impacts sont également significatifs en termes d'activité économique, de création d'entreprises ou de développement territorial (voir BUTAULT et al., 2015, et COLINET et al., 2014, dans le cas particulier des recherches agronomiques). Parfois méconnue, cette diversité d'impacts socioéconomiques et d'innovations a été illustrée à l'occasion d'une audi-

(5) <http://www.futureearth.org>

(6) <http://globalresearchalliance.org>

(7) <http://www.agmip.org>

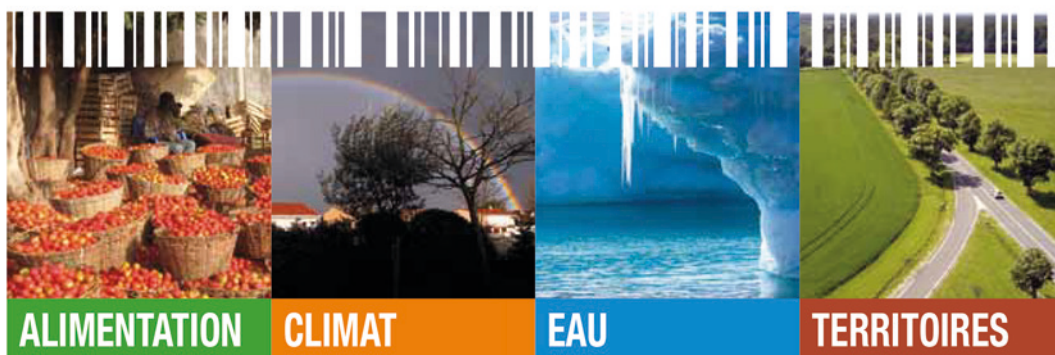
(8) <http://agriculture.gouv.fr/mots-cles/4-pour-1000>



AllEnvi

Alliance nationale de recherche
pour l'environnement

PROGRAMMER & COORDONNER la recherche environnementale française



© AllEnvi

www.allenvi.fr

« La multiplication de ces travaux a conduit le groupe de travail « Prospectives » d'AllEnvi à répertorier et à annoter les nombreuses prospectives et études de scénarios conduites dans le monde, avec pour objectif d'en repérer les traits et les déterminants communs. »

tion organisée par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (LE DÉAUT et *al.*, 2015).

Les exemples présentés à cette occasion ont porté notamment sur la création d'entreprises spécialisées dans l'extraction des principes actifs des végétaux, dans la production de matériaux biosourcés, dans la valorisation des déchets à travers la production de méthane ou dans la mise au point de diagnostics et de pronostics précoces de maladies chroniques liées à l'alimentation, sur la création de services au bénéfice d'entreprises ou de collectivités territoriales pour gérer la qualité de l'eau minérale naturelle d'hydro-systèmes souterrains, contribuer au développement de méthodes d'évaluation de la qualité de l'air ou maîtriser les risques d'inondation, sur la restauration de milieux ou de populations d'intérêt patrimonial ou économique (cas de l'esturgeon) ou encore sur le développement de méthodes de biocontrôle de la santé des cultures (méthodes alternatives aux pesticides).

Des sciences en société

La nature même des enjeux traités par les sciences de l'environnement place celles-ci dans une relation particulière vis-à-vis de la société. Cette dernière exprime en effet des attentes croissantes et multiples vis-à-vis de la communauté scientifique : non seulement l'impartialité de l'expertise scientifique, mais aussi la participation des porteurs d'enjeux et des parties prenantes à l'orientation des recherches ou encore une meilleure diffusion des connaissances.

Ces demandes donnent lieu au développement d'interactions entre des associations et des organismes de recherche. Depuis 2010, le programme REPERE⁽⁹⁾ du ministère de l'Environnement vise ainsi à accompagner la Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable à travers l'implication des parties prenantes dans l'orientation de la recherche, et ce, en facilitant les démarches d'innovation avec tous les acteurs, en associant les parties prenantes à la production des données et des connaissances et en favorisant l'accès aux données et aux résultats scientifiques.

Ces attentes se traduisent aussi par le développement des sciences participatives ou citoyennes. Ce mouvement n'est pas propre aux recherches environnementales, mais il s'agit clairement de l'un des domaines privilégiés – notamment en Europe – de ces approches, qui posent des questions méthodologiques, déontologiques et éthiques particulières (HOULLIER et MERILHOU-GOUDARD, 2016).

Conclusion

L'ampleur des transitions en cours – démographique, alimentaire et nutritionnelle, climatique, écologique, énergétique – interroge fortement les sciences de l'environnement, qui couvrent un vaste spectre disciplinaire. Elles sont ainsi concernées par plusieurs des défis et

programmes prioritaires d'action de la Stratégie nationale de recherche adoptée en 2015 et dont la mise en œuvre prend différentes formes complémentaires : la coordination et l'alignement de la programmation scientifique depuis le niveau national jusqu'au niveau global ; des expertises scientifiques collectives et des réflexions prospectives, qui sont d'autant plus essentielles que les systèmes étudiés sont par essence complexes ; le renforcement des infrastructures nationales, européennes et internationales de recherche, dont le rôle devient critique ; une attention croissante portée à l'impact des recherches, aussi bien en termes d'appui aux politiques publiques que de soutien à l'innovation sous toutes ses formes (technologique, sociale ou organisationnelle) ; le développement d'interactions denses avec la société.

Bibliographie

BUTAULT (J.-P.), MUSOLESI (A.), HUARD (F.), SIMIONI (M.) & SCHMITT (B.), « L'impact de la recherche agronomique sur la productivité agricole française. Une approche par le taux de rentabilité interne (TRI) des dépenses publiques affectées à la recherche agronomique en France », *INRA Sciences sociales*, n°1/2015, 2015, 5 p.

COLINET (L.), JOLY (P.-B.), GAUNAND (A.), MATT (M.), LARÉDO (P.) & LEMARIÉ (S.), « ASIRPA - Analyse des impacts de la recherche publique agronomique », rapport final réalisé à la demande de l'Inra, Paris, 2014, 61 p.

HOULLIER (F.) & MERILHOU-GOUDARD (J.-B.), *Les Sciences participatives en France. États des lieux, bonnes pratiques et recommandations*, 2016, 63 p. (+ annexes) DOI : 10.15454/1.4606201248693647E12.

KOVACS (B.) (Ed.), *Sustainable Agriculture, Forestry and Fisheries in the Bioeconomy: A Challenge for Europe*, European Commission, 4th SCAR Foresight Exercise, 2015, 137 p.

LE DÉAUT (J.-Y.), LE DAIN (A.-Y.) & SIDO (B.), *Construire une société nouvelle, améliorer notre compétitivité grâce à la recherche environnementale*, OPECST, rapport de l'audition publique du 3 juillet 2014 et de la présentation des conclusions du 28 janvier 2015, Assemblée Nationale, rapport n°2626, Sénat, rapport n°333, 2015, 102 p.

LE MOUËL (C.), FORSLUND (A.), MARTY (P.), MANCE-ROUN (S.), MARAJO-PETITZON (E.), CAILLAUD (M.-A.) & SCHMITT (B.), *Le Système agricole et alimentaire de la région Afrique du Nord – Moyen-Orient à l'horizon 2050 : projections de tendance et analyse de sensibilité*, rapport final de l'étude pour Pluriagri, Paris et Rennes, INRA-DEPE & INRA-SAE2, 2015, 134 p.

PAILLARD (S.), TREYER (S.) & DORIN (B.) (Eds.), *Agri-monde. Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*, Éd. Quae, Paris, 2010, 296 p.

(9) <http://www.programme-repere.fr>

Les controverses scientifiques en matière de santé-environnement

Par Marc MORTUREUX

Direction générale de la Prévention des risques (ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer)

Pesticides, nanoparticules, bisphénol A, perturbateurs endocriniens, OGM ou encore ondes électromagnétiques : voilà quelques exemples de sujets sur lesquels les controverses scientifiques font rage concernant leur impact sur la santé humaine et sur l'environnement. Sur quoi ces controverses se fondent-elles ? Quelles conséquences en tirer en matière de gestion des risques ? Cet article vise à apporter des éléments d'éclairage sur cette problématique, à partir d'exemples concrets issus notamment de mon expérience à la tête de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses).

La mise en cause de la dégradation de notre environnement dans le développement des maladies chroniques

L'Organisation mondiale de la santé interpelle depuis de nombreuses années la communauté internationale sur l'augmentation inquiétante des maladies chroniques, dont l'une des origines serait la détérioration de notre environnement. Par maladie chronique, on entend les pathologies nécessitant des traitements de longue durée, comme le diabète, les allergies, certains cancers, les maladies cardiovasculaires et neurodégénératives ou encore les troubles de la reproduction.

L'augmentation considérable et continue du nombre des personnes souffrant de maladies chroniques est en partie due à l'allongement de la durée de vie et aux progrès spectaculaires de la médecine qui permettent de réduire très fortement de nombreuses causes de mortalité. Mais cela n'explique pas tout : l'état actuel des connaissances scientifiques permet de mettre en évidence le fait que le facteur environnemental – incluant l'alimentation et le mode de vie – est une des causes majeures de la progression de certaines maladies, comme le diabète, les cancers hormonaux-dépendants, ou encore les problèmes de fertilité.

L'impact de notre environnement sur la santé publique est un sujet qui rencontre un écho grandissant dans la population. C'est une source de préoccupation qui nous concerne tous dans un quotidien que nous avons le sentiment de subir et qui génère donc, à juste titre, de l'inquiétude : nous sommes en effet tous témoins soit directement soit *via* les médias des atteintes à notre environnement. Nous en sommes souvent également des acteurs, et nous voyons bien que la dégradation de

l'environnement a ou aura à terme un impact négatif sur notre propre santé.

De plus, nous avons le sentiment d'une accélération de cette dégradation du fait des effets du changement climatique, de l'épuisement des ressources de la planète ou encore de l'impact grandissant des nouvelles technologies. Même si, dans le même temps, il faut le souligner, des progrès importants ont été réalisés sur certains sujets de préoccupation environnementale (baisse de la pollution au dioxyde d'azote autrefois dénoncée sous le terme de pluies acides, retrait des pesticides les plus dangereux, règles plus strictes en matière d'urbanisation...).

Les principaux problèmes environnementaux identifiés impactant la santé

L'origine environnementale de certaines maladies humaines est connue de longue date. Cette relation entre agent pathogène et pathologie est univoque dans quelques cas bien connus, tels que le saturnisme (plomb), le mésothéliome pleural (amiante) ou les légionelloses (*Legionella*). Mais cette relation peut interagir avec d'autres déterminants dans un grand nombre de situations, comme dans les asthmes et allergies respiratoires (toxines et substances chimiques) ou les cancers (radon, arsenic, etc.).

Les principaux problèmes environnementaux identifiés comme étant préjudiciables à la santé sont *la pollution de l'air*, avec notamment les particules fines ; *la multitude des substances chimiques* auxquelles nous sommes exposés dans notre quotidien (substances cancérigènes et mutagènes, perturbateurs endocriniens, métaux lourds, nanoparticules...) ; *les nouveaux virus et bactéries* à l'origine de maladies infectieuses, dont le développement est favori-

anses

agence nationale de sécurité sanitaire
alimentation, environnement, travail



Connaître, évaluer, protéger



Rapport d'activité 2015

Produits phytopharmaceutiques,
matières fertilisantes, supports
de culture et biocides

© ANSES

« Les avancées de la science permettent de mieux caractériser les dangers intrinsèques des nombreux agents biologiques, chimiques et physiques qui nous entourent. Mais pour évaluer les risques, il faut pouvoir croiser ces données avec les niveaux d'exposition réels des personnes à ces multiples sources de danger. »

sé par la mondialisation des échanges et qui deviennent résistants aux antibiotiques ou encore, mais avec moins de certitude, les ondes électromagnétiques et les radiofréquences qui ont littéralement envahi notre espace avec le développement spectaculaire des nouvelles technologies de l'information et de la communication.

Les avancées de la science permettent de mieux caractériser les dangers intrinsèques des nombreux agents biologiques, chimiques et physiques qui nous entourent. Mais pour évaluer les risques, il faut pouvoir croiser ces données avec les niveaux d'exposition réels des personnes à ces multiples sources de danger. Comme nous y sommes exposés tout au long de notre vie, aussi bien en milieu professionnel, que *via* l'alimentation, l'air, l'eau, les transports, ce travail de recoupement est complexe et suscite beaucoup de controverses scientifiques (en fonction des méthodologies retenues pour évaluer ces risques). Nous allons prendre quelques exemples d'une grande actualité pour illustrer, d'une part, la façon dont ces controverses se développent et, d'autre part, le rôle joué par les différents acteurs dans ces débats non seulement scientifiques, mais aussi sociétaux.

Le cas des perturbateurs endocriniens, ou la remise en cause des fondements de la toxicologie

Un des grands défis scientifiques actuels à être au cœur de fortes controverses est celui posé par un nombre croissant d'expérimentations mettant en évidence de possibles effets délétères de certains composés chimiques, et ce, à des niveaux d'exposition très inférieurs aux doses considérées jusqu'à présent comme sûres.

Il s'agit de molécules qui agissent directement sur le système endocrinien en imitant ou en bloquant les hormones et qui produisent des effets même à de très faibles doses.

On appelle ces substances « perturbateurs endocriniens », parmi lesquelles figurent le bisphénol A, des phtalates et des parabènes, qui ont tous été particulièrement étudiés. Il s'agit de substances chimiques très couramment utilisées dans de nombreux produits de consommation courante.

En ce qui concerne le bisphénol A, qui était, il y a quelques années encore, présent dans les plastiques des biberons, une revue de l'ensemble des études disponibles permet de conclure à des effets avérés chez l'animal, mais qui ne sont que suspectés chez l'homme, suscitant ainsi un débat scientifique particulièrement vif à l'échelle mondiale sur les conséquences à en tirer au regard de l'approche toxicologique classique. Cette dernière part en effet du principe que c'est « la dose [qui] fait le poison », c'est-à-dire que plus on augmente la dose du produit que l'on veut tester, plus l'effet est important. Cette approche conduit donc à fixer, par voie réglementaire, des seuils à ne pas dépasser.

Or, pour les perturbateurs endocriniens, à de plus faibles doses (parfois à des doses inférieures à un niveau de concentration du produit où sa toxicité semble avoir disparu), des expériences scientifiques mettent en évidence

des effets d'une nature parfois différente. La logique de dose d'exposition à ne pas dépasser est ainsi remise en cause au profit d'une notion de « fenêtre d'exposition » : c'est-à-dire la période durant laquelle une personne a pu être soumise à de telles expositions, ce qui semble être un critère essentiel pour en mesurer les effets potentiels. Ainsi, une exposition *in utero* (ou pendant les phases critiques du développement de l'enfant) semble pouvoir conduire à des effets qui se développeront tard dans la vie, voire qui se transmettront aux générations suivantes. Ces constatations sont issues d'expérimentations chez l'animal, sachant qu'il est très difficile d'en apporter la preuve chez l'homme.

L'enjeu est de taille. En effet, si l'on arrive à valider la pertinence des effets perturbateurs endocriniens de certaines substances, il conviendra alors de changer de paradigme quant aux mesures de gestion associées : il s'agirait non plus de fixer des seuils, mais de bannir définitivement tout usage des substances concernées pour éviter toute exposition.

L'Anses travaille très activement sur ce sujet avec ses homologues européennes et américaines. Dans un premier temps, il faut préciser ce qui caractérise un perturbateur endocrinien, puis dans un second temps, il faudra définir une approche méthodologique qui soit adaptée à ces nouveaux défis.

Le nouveau concept d'exposome

Comme indiqué précédemment, il existe de nombreuses sources de dangers potentiels (biologiques, physiques, chimiques...), auxquels les populations peuvent être exposées dans leur vie quotidienne. Les principaux agents susceptibles de présenter une menace pour la santé peuvent être présents dans l'air, l'eau, l'alimentation, les sols ou les déchets. Ils peuvent aussi être présents dans des articles ou dans des produits mis sur le marché.

Les normes et réglementations visent à maîtriser le risque pour la population en limitant son niveau d'exposition à ces sources de danger, en particulier d'origine environnementale. Cette approche réglementaire est construite en général pour une source de danger donnée et pour un milieu d'exposition donné (air, alimentation et eau de consommation, milieu professionnel...). Elle s'appuie sur un travail d'évaluation du risque menée en trois étapes : a) la caractérisation de la source de danger, celle-ci pouvant conduire à l'élaboration de valeurs toxicologiques de référence (VTR) associées à la substance considérée (notamment en matière de risque chimique), b) le niveau d'exposition potentiel de l'homme à cette source de danger – en s'appuyant sur des scénarios d'exposition conçus de manière à couvrir les cas les plus défavorables et, enfin, c) en combinant ces deux éléments et en intégrant des facteurs de sécurité, une évaluation du niveau de risque pouvant conduire à recommander la fixation de seuils de concentration des produits à ne pas dépasser dans tel ou tel milieu, le but étant d'éviter tout risque de dépassement des valeurs toxicologiques de référence, et ce, même dans les cas les plus défavorables.

Mais cette approche « substance par substance » et « milieu par milieu » ne permet pas de prendre en compte de façon satisfaisante des expositions combinées à plusieurs sources de danger et/ou les différentes sources d'exposition à un même danger.

L'un des enseignements de l'expertise contemporaine est le nécessaire retour à une vision intégrative du vivant, c'est-à-dire à la prise en compte de la complexité physiologique et environnementale. Cette démarche scientifique tient compte de la situation réelle de l'exposition des populations à un ensemble de substances chimiques. Traditionnellement, l'approche toxicologique visait jusqu'ici à évaluer des effets potentiels d'une molécule donnée sur différents systèmes biologiques. Or, un degré supplémentaire dans cette complexité apparaît de plus en plus, à travers la notion de « mélanges », c'est-à-dire de cocktails de substances toxiques pouvant avoir, tant au niveau de la cellule qu'au niveau de l'organisme, des effets pathogènes additifs ou synergiques.

D'importants travaux ont été ainsi réalisés sur les effets combinés des différents composés de la famille des dioxines et des PCB (polychlorobiphényles), ces substances chimiques très persistantes désormais interdites mais qui se sont largement disséminées dans l'environnement durant les années 1980 et 90, s'accumulant dans les sols et les sédiments et se retrouvant de ce fait dans la chaîne alimentaire, en particulier dans certaines variétés de poisson. Ces travaux ont conduit à développer une approche de l'additivité des doses équivalentes, qui permet de fixer au-delà des seuils propres à chacun des types de congénère un seuil global à comparer à la somme des doses équivalentes des composés du mélange initial.

Dans un tout autre domaine, le phénomène actuel de la mortalité des abeilles constaté dans de nombreux pays constitue également une bonne illustration des défis qui nous attendent en matière de compréhension de problèmes d'origine multifactorielle. De plus en plus d'études mettent en évidence de possibles effets combinés d'agents pathogènes affaiblissant les ruches, et de l'exposition des abeilles aux produits phytosanitaires. Ces constatations doivent conduire à l'élaboration de nouveaux cadres méthodologiques pour pouvoir prendre en compte ces multiples phénomènes.

La gestion des risques en situation d'incertitude

Les décisions à prendre pour protéger les populations face aux risques sanitaires et environnementaux s'appuient sur des évaluations scientifiques des risques. C'est l'approche *science based*, qui, reconnue au niveau international, vise à objectiver scientifiquement les risques et à prendre des décisions proportionnées pour y faire face. Tout le monde est bien sûr d'accord avec cette approche. Mais elle se heurte au fait qu'un travail scientifique n'aboutit que rarement à des conclusions certaines. Les résultats d'une évaluation s'accompagnent presque toujours d'un niveau d'incertitude, et beaucoup de controverses scientifiques se cristallisent autour de la façon de prendre en compte ces incertitudes dans les processus de décision.

Dans un processus d'évaluation de risque, il y a de nombreuses sources de débat, au sein même de la communauté scientifique, autour de la méthodologie à mettre en œuvre :

- il y a d'abord *la formulation* de la question à laquelle les experts scientifiques sont invités à répondre. Une formulation trop étroite peut conduire à « passer à côté » du vrai sujet. À l'Agence de sécurité sanitaire (Anses), que je dirigeai encore récemment, nous avons pris le parti non seulement de reformuler les questions, si nécessaire, mais aussi de prendre en compte les questionnements des différentes parties prenantes, et pas seulement les questions posées par les pouvoirs publics.
- en matière de *critères de sélection des études et des données* prises en compte dans le processus d'évaluation du risque, faut-il ne prendre en compte que les seules études répondant aux « bonnes pratiques d'expérimentation » (BPE) imposées aux industriels dans le cadre des différentes réglementations ? Ou bien faut-il plutôt prendre en compte principalement les études faisant l'objet de publications scientifiques internationales dans des revues à comité de lecture ? À l'Anses, nous avons répondu à cette question en n'excluant *a priori* aucune source d'études et de données, le processus d'évaluation intégrant un examen collectif et contradictoire de chacune de ces études pour en évaluer le degré de validité selon une approche multicritère.
- en ce qui concerne *l'indépendance* de l'expertise, la question des liens et des conflits d'intérêts des scientifiques intervenant dans le processus d'expertise s'est retrouvée ces dernières années au cœur des controverses scientifiques tant en France qu'en Europe. La sélection des experts sur la base de déclarations publiques d'intérêt, le caractère collectif, contradictoire et pluridisciplinaire de l'expertise et la transparence de la méthodologie mise en œuvre sont les trois piliers majeurs permettant de reconstruire la confiance dans une expertise indépendante et impartiale au regard des multiples pressions qui peuvent s'exercer sur les experts.
- enfin, *le niveau de preuve et la prise en compte des incertitudes* constituent un ultime point majeur de débat, la façon de quantifier et de restituer le niveau de preuve établi scientifiquement dans un lien de cause à effet étant essentielle dans la prise de décision en matière de gestion de risque. Il y a différentes échelles qui ont été établies dans certains domaines, comme la classification de l'Organisation mondiale de la santé (et, plus précisément, celle du Centre international de recherche sur le cancer relative aux substances chimiques qualifiées de cancérigènes « certains », « probables » ou « possibles »). Les débats sont très vifs sur cette question : les uns considèrent que l'approche *science based* ne peut légitimer des mesures de réduction des risques qu'en cas d'existence de liens de cause à effet scientifiquement avérés, et les autres estiment que, dans le cadre du principe de précaution, l'action est légitime (et même indispensable) dès lors qu'il y a une présomption de risque mise en évidence scientifiquement, même si l'on ne dispose pas du recul suffisant pour en apporter la preuve. Il s'agit alors de prendre des mesures tempo-

raires et proportionnées, dans l'attente d'une dissipation des incertitudes.

Aujourd'hui, ce débat fait rage en ce qui concerne les expositions à certains produits chimiques, aux rayonnements électromagnétiques ou encore aux nanomatériaux (dont les usages se multiplient sans qu'ait été apporté de réponse claire aux interrogations sur les effets sanitaires et environnementaux de certains types de nanoparticules).

Le sujet des organismes génétiquement modifiés (OGM) ou des pesticides est encore un peu plus complexe, car au-delà du débat scientifique sur les effets sanitaires et environnementaux de ces produits et de ces pratiques culturelles, des visions différentes s'opposent sur les modèles agricoles et agro-alimentaires à promouvoir ou à combattre, ainsi que sur la pertinence de laisser les grands acteurs privés mondiaux déposer des brevets dans des domaines relevant des besoins essentiels des populations.

Les controverses scientifiques dans le domaine de l'environnement sont loin de s'éteindre, et c'est là une bonne

chose, car elles sont intrinsèquement liées aux progrès considérables réalisés dans le domaine des sciences du vivant et à la vitalité de nos systèmes démocratiques. La science apporte certes des réponses, mais plus elle avance et plus elle pose de nouvelles questions, dont le pouvoir politique et la société tout entière doivent se saisir.

Toute remise en question de savoirs considérés comme acquis suscite des résistances, mais nous avons le devoir de tirer avec courage les conséquences de ces nouvelles connaissances qui, au-delà des contraintes qu'elles génèrent, ouvrent des opportunités nouvelles en imposant la recherche de solutions de substitution aux produits ou aux procédés mis en cause. Mais cet appel à l'action, même en situation d'incertitude, doit s'accompagner d'un effort soutenu et constant en faveur de la recherche, car ce n'est que grâce à une avancée constante de la science que nous pourrions concilier durablement une dynamique de progrès et d'innovation avec la protection des personnes et de l'environnement.

Les attentes d'une entreprise comme Veolia vis-à-vis des sciences de l'environnement

Par le Dr Philip ABRAHAM

Directeur de la Recherche & Innovation de Veolia

Veolia accompagne ses clients dans leur usage optimisé des ressources afin d'en augmenter l'efficacité économique, environnementale et sociale.

Veolia s'appuie sur l'innovation et la co-construction pour remplir la mission qu'elle s'est fixée, celle de « Ressourcer le monde ».

En se dotant de ces deux leviers, les sciences de l'environnement participent au développement de solutions permettant d'élargir l'accès aux ressources naturelles essentielles tout en les préservant et en veillant à leur renouvellement.

Pour que les entreprises puissent bénéficier de l'apport de ces sciences, il est nécessaire que ces entreprises se fixent des objectifs et qu'elles intègrent lesdites sciences à leur organisation. Il faut aussi qu'elles contribuent à la diffusion de ces dernières.

En contrepartie, Veolia a trois attentes. La première est de lui permettre de mesurer les impacts environnementaux de ses activités. Les deux autres sont de trouver de nouvelles pistes pour réduire ces impacts et, enfin, d'y apporter des solutions concrètes.

Au travers de quelques exemples de co-construction, nous illustrerons ces différents éléments qui déterminent les usages et les attentes d'une entreprise comme Veolia en matière de sciences de l'environnement.

Présent sur les cinq continents avec ses 174 000 salariés, Veolia, leader mondial de la gestion optimisée des ressources, accompagne les industriels, les villes et leurs habitants dans l'usage optimisé des ressources afin d'en augmenter l'efficacité économique, environnementale et sociale.



C'est ainsi que Veolia conçoit et déploie des solutions pour la gestion de l'eau, la gestion des déchets et la gestion énergétique, participant par là même à la compétitivité et au développement durable de ses clients.

Grâce à ces trois cœurs de métiers complémentaires et en synergie, Veolia contribue à développer l'accès aux ressources tout en les préservant et en veillant à leur renouvellement.

Pour ce faire, Veolia s'appuie naturellement sur l'innovation, partie intégrante de son ADN d'entrepreneur innovant, pour atteindre ses objectifs de croissance et remplir la mission qu'il s'est fixée, celle de « Ressourcer le monde ».

Mais pour atteindre cette mission, la co-construction est plus qu'une nécessité, c'est un autre levier de croissance. La co-construction se décline de trois manières :

- inventer de nouveaux modes de collaboration (qu'ils soient contractuels ou économiques) avec ses clients et ses partenaires ;
- rechercher la complémentarité d'expertises (associées aux siennes) qui permettront de saisir de nouvelles opportunités ;
- être un activateur de partenariats, un pivot entre des partenaires issus d'horizons divers pour créer de la valeur.

Chez Veolia, les sciences de l'environnement participent, en s'associant à ces deux leviers que sont l'innovation et la co-construction, au développement de nouvelles solutions permettant d'élargir l'accès aux ressources essentielles en les préservant et en les renouvelant.

Pour que l'entreprise puisse bénéficier de l'apport des sciences de l'environnement, il est tout d'abord nécessaire que celle-ci se fixe des objectifs et qu'elle aménage son organisation pour pouvoir les intégrer pleinement.

Il faut aussi qu'elle participe à la diffusion de la culture de ces sciences.

Nous utiliserons deux exemples pour mettre en lumière certaines des attentes que peut avoir une entreprise comme Veolia vis-à-vis des sciences de l'environnement.

La première de ces attentes est de permettre de mesurer les impacts de nos activités ou de celles de nos clients en intégrant la complexité des mesures et en ayant pour but de réduire le champ des incertitudes.

Une autre attente vis-à-vis des sciences de l'environnement pour une entreprise comme Veolia est d'explorer l'inconnu pour ouvrir de nouvelles pistes.

Enfin, une dernière attente est bien entendu d'apporter des solutions concrètes aux problèmes posés afin de permettre à l'entreprise et à ses clients de répondre aux problématiques environnementales en soutenant une nouvelle dynamique économique et sociale créatrice d'emplois et plus soucieuse de la préservation de la planète et du bien-être des hommes.

Le premier exemple, qui est un modèle de co-construction développé en collaboration avec des acteurs académiques, renvoie à l'un des objectifs de Responsabilité Sociale et Environnementale de Veolia pour 2020, qui prévoit la réalisation d'un diagnostic et le déploiement d'un plan d'action qui doit être réalisé dans 100 % de ses sites identifiés à fort enjeux en matière de biodiversité.

Parmi plusieurs actions engagées pour participer à la réalisation de cet objectif, il y a la création, en 2009, par Veolia, l'École polytechnique et le Muséum national d'Histoire naturelle de la chaire « Modélisation mathématique et Biodiversité » dans le cadre d'un partenariat scientifique public-privé. Cette chaire a pour objectif de répondre à des enjeux environnementaux pour lesquels une modélisation fine du comportement des écosystèmes s'avère



Logo de la chaire « Modélisation mathématique et Biodiversité ».

essentielle et de favoriser la diffusion des connaissances scientifiques afférentes.

Dans cette logique d'innovation et de co-construction, Veolia a réaffirmé, en décembre 2015, son soutien à cette chaire pour une durée de cinq ans avec les partenaires académiques précités, permettant de recruter des doctorants, d'accueillir des chercheurs étrangers et d'organiser des colloques scientifiques dans le monde entier.

En effet, en plus d'exploiter une synergie originale entre les mathématiques appliquées, l'écologie, la biodiversité et l'évolution dans une perspective de formation et de recherche au niveau international, Veolia et ses deux autres partenaires attachent aussi une grande importance à la vulgarisation des idées développées dans le cadre de cette chaire en organisant des conférences s'adressant au grand public.

Cette diffusion de la connaissance s'est déjà traduite par un colloque au cours duquel les chercheurs et les participants ont pu échanger sur les défis et les opportunités à venir en matière de surveillance et d'évaluation de l'état de l'environnement : comment utiliser les nouvelles technologies intelligentes au service d'une surveillance environnementale de meilleure qualité et plus rentable ? Comment évaluer et documenter la valeur des données et des connaissances sur les écosystèmes environnementaux ?

Dans ce cadre, la Recherche & Innovation de Veolia a contribué aux débats en communiquant les résultats d'une campagne de suivi (pendant deux ans) des eaux de rivières alimentant certaines de ses usines de production d'eau potable en France. Ce suivi a porté sur divers microorganismes (bactéries, virus et parasites) potentiellement pathogènes, qui ont été simultanément concentrés en recourant à une méthode unique d'ultrafiltration et détectés grâce à des méthodes de biologie moléculaire et de microscopie.

Un autre exemple associant innovation, co-construction et sciences de l'environnement peut être donnée à travers la participation de Veolia au projet européen BIOTTOPE (Programme LIFE + de l'Union européenne), qui a débuté en 2011 et qui a été reconnu comme l'un des meilleurs projets LIFE dans la section Environnement (avec 24 autres) parmi les 113 projets évalués par la Commission européenne en 2015.

Ce projet BIOTTOPE (Outils Biologiques pour Optimiser les Technologies de Traitement pour l'élimination des micro-Polluants et des perturbateurs Endocriniens) issu d'une collaboration entre Veolia et une PME (WatchFrog) avait pour objectifs :

- de développer un équipement, la « FrogBox », permettant d'évaluer en ligne les perturbations endocriniennes générées par des effluents de STations d'Épuration des eaux usées (les STEP) ;
- d'évaluer la performance d'une technologie développée par la Recherche & Innovation de Veolia en tant que traitement tertiaire pour réduire des composés récalcitrants et l'effet perturbateur endocrinien potentiel des effluents de STEP.

Photo DR



Le kit d'analyse en continu des perturbateurs endocriniens éventuellement présents dans un milieu aquatique, kit élaboré par la société WatchFrog en collaboration avec Veolia.

Nouvel exemple de co-construction, ce projet a nécessité de mobiliser plusieurs composantes des sciences de l'environnement dans le but d'obtenir un résultat concret.

Cette collaboration s'est matérialisée dès 2013 par un prototype d'équipement permettant la lecture en flux de la présence de perturbateurs endocriniens dans des effluents de STEP. Cet équipement mis en test dans une station d'épuration en Belgique a apporté des résultats probants.

Nous aurions pu détailler bien d'autres exemples, comme la réalisation d'une boîte à outils pour l'évaluation des impacts de rejets dans le milieu aquatique, ou bien encore l'établissement d'une aide au diagnostic des sources d'émission de micropolluants dans les réseaux d'assainissement.

Mais rien de tout cela ne pourrait réellement fonctionner si Veolia n'avait pas intégré les sciences de l'environnement dans son organisation.

La Recherche & Innovation du groupe Veolia s'appuie sur trois piliers complémentaires : une Recherche & Innovation interne localisée notamment au sein de six principaux centres de recherche, un réseau d'innovation interne mondial et une démarche d'*Open Innovation*.

Pour réaliser ses missions, elle peut compter sur les expertises de ses chercheurs dont certains sont regroupés au sein d'un département spécifique « Environnement et

Santé », qui traite des solutions d'analyses environnementales, d'analyse et d'évaluation des ressources et des impacts environnementaux et qui aborde les questions environnementales sous l'angle socio-économique.

Sans cette organisation, la réalisation de mesures d'impacts et l'établissement d'outils d'évaluation, tels que les analyses de cycles de vie ou les mesures de l'empreinte eau, de l'empreinte CO₂, seraient beaucoup plus difficiles.

L'établissement d'un diagnostic et la réalisation d'un plan d'action seraient eux aussi plus délicats sans une telle organisation. Miroir de nos partenariats dans les sciences de l'environnement, le département « Environnement et Santé », associé aux autres départements de R&I, permet très concrètement à Veolia de co-construire et d'innover pour proposer à ses clients, outre un accompagnement dans la longue durée, des solutions innovantes, performantes et économiquement accessibles.

Pour conclure, une entreprise comme Veolia peut certes attendre un retour sur investissement et utiliser de manière très profitable les sciences de l'environnement, mais c'est à la condition de s'être assurée, au préalable, de disposer en interne des compétences indispensables et de s'être structurée pour pouvoir échanger dans le domaine tant avec le monde académique qu'avec le monde entrepreneurial.

Il faudra aussi que ces sciences soient utilisées afin de mesurer les impacts de nos propres activités et que ces sciences soient mises à profit pour explorer de nouveaux horizons.

Mais, comme le montre les quelques exemples que nous venons de donner, il faut aussi que ces sciences apportent des solutions concrètes aux problèmes qui se présentent, nous permettant ainsi d'anticiper et d'offrir de nouveaux services à nos clients.

C'est là une tâche délicate, car les sciences de l'environnement font souvent appel à des notions de coût évité ou d'externalité qui sont difficiles à monétiser, voire sujettes à interprétation.

À technologies constantes, les défis auxquels le monde moderne est confronté seraient certainement perdus d'avance, mais les sciences de l'environnement et les nouvelles solutions technologiques et non technologiques associées peuvent apporter leur pierre au service du progrès humain et de la performance des entreprises et des territoires, tout en respectant notre planète.

Chez Michelin, une recherche orientée par la mobilité durable

Par Terry GETTYS

Directeur de la Recherche et du Développement, membre du comité exécutif du groupe Michelin

Chez Michelin, cela fait plus d'un siècle que nous sommes convaincus que la mobilité des personnes et des biens est indispensable au développement humain et économique. Cette idée est à l'origine même de l'entreprise et elle est, aujourd'hui encore, sa raison d'être : offrir à chacun une meilleure façon d'avancer. C'est justement parce que la mobilité est au service des hommes qu'il est nécessaire d'en limiter les impacts négatifs aussi bien au plan sociétal qu'environnemental. C'est là, plus que jamais, le défi que Michelin veut contribuer à relever.

Diminuer les émissions polluantes, améliorer la sécurité et la fluidité du trafic jusqu'au cœur des villes grâce au digital, favoriser la transition du transport vers des énergies renouvelables non émettrices de CO₂, imaginer ce que sera l'intermodalité dans les grandes métropoles, repenser le fret longue distance, tester les solutions d'auto-partage, élargir l'accès à la mobilité en la rendant plus abordable économiquement, ce sont là autant de sujets qui occupent les hommes et les femmes qui travaillent chez Michelin en ce début de XXI^e siècle !

On peut être bons seuls, mais on est toujours meilleurs à plusieurs !

Pour trouver les réponses à toutes ces questions, nous ne travaillons pas tout seuls. Ces problématiques globales ne pourront aboutir à de vraies solutions qu'en mettant en commun les expériences et les intelligences. C'est pourquoi nous nous associons à des programmes d'étude sur les transports du futur au sein d'un écosystème large qui a pour vocation la mobilité durable.

Cette volonté de nous associer avec d'autres grands acteurs, qui, comme nous, veulent trouver des solutions, se traduit par notre participation à de nombreuses instances internationales, telles que le *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD). Au-delà de cette idée d'association, c'est la volonté de fédérer les énergies qui a donné naissance à ce qui est devenu un événement référent en matière de mobilité durable, le Michelin Challenge Bibendum.

Après une douzaine d'éditions, cet événement itinérant qui a réuni, à chaque fois, des milliers de représentants des mondes politique, industriel et scientifique, s'est récemment développé avec un *innovative and collaborative Think (and Do) Tank aimed at promoting better life through sustainable mobility* [une « boîte à idées » innovante et

collaborative visant la promotion d'une vie meilleure au moyen d'une mobilité durable]. Les termes les plus importants de cette phrase sont « *better life* ». En effet, c'est cela le véritable enjeu : améliorer la qualité de vie de chacun d'entre nous.

Quand on parle de la responsabilité des manufacturiers de pneumatiques en général, et de celle de Michelin en particulier, de quoi parle-t-on concrètement ?

Nous nourrissons de fortes ambitions en matière de réduction des émissions de CO₂

95 % de l'impact environnemental du pneu est lié à son utilisation. Intéressons-nous, par conséquent, à cette phase d'usage : le transport routier représente 18 % des émissions de CO₂ issues de l'activité humaine ; sur ce total, la part des pneus s'élève à 4 % (soit, *in fine*, moins de 1 %).

Cette part est directement corrélée à la quantité de carburant consommée pour compenser ce que l'on appelle la *résistance au roulement*. Simplifions, en disant qu'il s'agit de l'énergie que dissipe le pneu en se déformant pour assurer toutes ses missions d'adhérence, de confort...

Ce n'est pas rien. Pour une voiture, par exemple, un litre de carburant sur cinq (soit 20 %) est consommé uniquement pour vaincre cette résistance. Pour un camion, on passe à un litre sur trois ! Plus la part consacrée à compenser la résistance au roulement est faible, et plus un pneu sera considéré comme efficace en termes énergétiques.

L'efficacité énergétique des pneus est une question qui a toujours occupé Michelin. L'invention du pneu à carcasse radiale a marqué une étape importante. Depuis, nos efforts se sont encore intensifiés. Ainsi, en 1992, est née la gamme MICHELIN Energy™. De génération en géné-

ration de pneus, nous avons toujours cherché à en améliorer les performances. C'est là un savoir-faire qui intéresse le consommateur, quand celui-ci passe à la pompe, mais qui a aussi convaincu les constructeurs automobiles notamment pour accroître l'autonomie de leurs véhicules électriques.

Le groupe s'est officiellement engagé dans la lutte contre le changement climatique global, en étant notamment partenaire de la 21^{ème} Conférence des Parties (COP 21) qui s'est tenue à Paris en décembre 2015. Michelin y a réaffirmé son soutien à l'idée de l'instauration d'un tarif du carbone à l'échelle mondiale, seule façon, selon nous, pour arriver à faire bouger les lignes dans ce domaine. Jean-Dominique Senard, notre président, qui est également président d'EpE (Entreprises pour l'Environnement) y a annoncé notre ambition pour 2030, à savoir réduire de 20 % (par rapport à 2010) les émissions de CO₂ liées à l'usage des pneus MICHELIN, c'est-à-dire réduire leur résistance au roulement. Toutes gammes confondues, cela représente une amélioration de l'efficacité énergétique moyenne de 1 % par an... et, donc, pas mal de « nuits blanches » en perspective pour nos chercheurs !

On s'attend à un doublement du nombre des véhicules et des kilomètres parcourus d'ici à 2050. Aussi Michelin cherche-t-il avant tout à agir sur la pollution (y compris sonore), sur la sécurité des personnes et sur la réduction des encombrements urbains. Tous ces impacts dégradent aujourd'hui sérieusement la qualité de vie de milliards de personnes dans le monde. Il convient d'y ajouter l'accessibilité (maillage routier et coûts) : en effet, le manque de moyens de transport est, partout dans le monde, la première source d'inégalité des chances en matière d'éducation et d'emploi.

Produire mieux est pour nous un engagement complémentaire

Limiter l'impact de nos activités de production sur l'environnement est un enjeu que Michelin prend très au sérieux (les membres du COMEX ont d'ailleurs une part de leur rémunération indexée sur cet objectif de limitation !).

Selon l'analyse du cycle de vie du pneu, sa production ne représente que de 5 à 6 % de son impact environnemental. C'est peu. Mais sur ces 5 % là, des progrès sont possibles et, surtout, ces progrès dépendent de nous. Nous nous sommes fixé, au niveau mondial, trois objectifs : a) réussir à faire des pneus encore plus performants en utilisant moins de matière première, b) réduire les émissions de CO₂ de notre logistique et, enfin, c) piloter, à la baisse, le MEF (pour *Michelin Environmental Footprint*), un indicateur composite qui mesure l'impact de nos usines sur les aspects pertinents que sont pour notre industrie : la consommation de ressources (eau, énergie), les émissions dans l'air (composés organiques volatils et CO₂) et les déchets mis en décharge. Dans ce contexte, il va sans dire que le respect de la norme environnementale ISO 14001 est une exigence qui n'est négociable pour aucun de nos sites industriels.



Photo © In Effecto - Michelin

La croissance d'une jeune pousse d'hévéa sous le regard protecteur de Bibendum.

L'innovation fait partie de l'ADN de Michelin : depuis son origine, l'innovation technique est au cœur de notre entreprise

Historiquement, c'est au sein du groupe qu'ont été réalisés tous les grands sauts technologiques : ceux concernant l'architecture du pneu (le Démontable, le Métallique, le Radial, le très basse pression) comme ceux concernant les matériaux (le caoutchouc synthétique, la silice et, aujourd'hui, les bio-composants). Notre groupe joue donc un rôle moteur dans les progrès de son industrie depuis plus de cent vingt-cinq ans et possède toujours une avance, reconnue par ses pairs, sur les segments les plus exigeants.

Cette position n'est pas le fruit du hasard. Près de trois cent cinquante métiers contribuent à la conception et à la réalisation d'un pneu ! Des tribologistes (spécialistes des frottements), des métallurgistes, des chimistes de l'analyse, des mécaniciens des fluides, des spécialistes des matériaux. Ce sont autant de spécialités qui collaborent à travers le monde pour imaginer des solutions innovantes. Ce sont ces hommes et ces femmes de toutes les nationalités qui font que Michelin est aujourd'hui considéré comme un leader engagé en matière de mobilité durable.

De plus, l'innovation, ça n'est pas uniquement de la technique. Michelin est aussi un pionnier de l'économie de fonctionnalité qui consiste à commercialiser un service ou l'usage d'un bien plutôt que ce bien lui-même. C'est ainsi que nous ne vendons plus de pneus aux compagnies aériennes : ce que nous leur vendons, ce sont... des atterrissages (les décollages sont offerts !).

Chez Michelin, la recherche-développement ne se fait pas en vase clos. Nous avons récemment signé trois partenariats afin de créer de nouvelles filières d'élastomères bio-sourcés. Le premier, signé avec Amyris, spécialiste des carburants et des produits chimiques issus de matières premières renouvelables, a pour but de développer et de commercialiser un isoprène renouvelable baptisé « No Compromise ». Le deuxième, un partenariat de recherche avec Axens et IFPEN, est destiné à produire du butadiène à partir de biomasse : pour fournir l'alcool nécessaire à ce projet, le groupe s'est aussi associé à Tereos, spécialiste de la transformation industrielle de matières premières agricoles. Enfin, nous nous sommes rapprochés du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) afin de développer deux voies innovantes de valorisation de pneumatiques usagés, en collaboration avec SDTech et Protéus.

Michelin développe également de longue date des partenariats de recherche dans le domaine très particulier de l'hévéaculture

Les propriétés du caoutchouc naturel rendent ce matériau irremplaçable dans de nombreuses fabrications ; c'est tout particulièrement le cas dans l'industrie du pneu qui consomme 70 % du caoutchouc naturel produit dans le monde. En Afrique, en Amérique latine ou bien encore en Asie, nous investissons beaucoup sur le terrain pour tester le résultat de nos travaux avec des producteurs locaux. Certaines innovations mises au point avec ces derniers permettent de doubler le rendement à l'hectare des plantations d'hévéas sans générer d'impact sur l'environnement. Ce type de progrès permet d'améliorer les conditions de vie des populations locales et de répondre à la demande croissante de latex sans avoir besoin d'augmenter la surface des terres cultivées.



Photo © Jean-Jacques Peltard - Michelin

Culture *in vitro* d'une plantule d'hévéa.

C'est important. En effet, non seulement il y a des endroits, sur la planète, où le manque de terres cultivables est un problème, mais de plus, et surtout, le marché du caoutchouc naturel connaît de fortes fluctuations de prix. Mieux vaut donc, pour les producteurs, améliorer leur productivité à l'hectare (celle-ci restant modulable à la baisse en cas de besoin) qu'en augmenter la superficie, ce qui générerait pour eux des frais fixes. C'est aussi cela, une hévéaculture durable tout au long de la chaîne de valeur (pas mal de gens semblent oublier que le troisième pilier du développement durable, c'est... l'économie !).

En 1905, déjà, André Michelin est allé à Manaus, en Amazonie, pour faire son premier voyage d'étude du marché du caoutchouc !

Notre expérience et notre approche du sujet sont tellement prises au sérieux par les experts, qu'en 2015, une ONG d'envergure internationale a voulu signer avec nous un traité de coopération d'une durée de quatre ans visant au développement d'une hévéaculture responsable. Avec eux, nous sommes en train de définir pour les instances internationales de la filière ce que doivent être les meilleures pratiques depuis la plantation jusqu'à l'utilisation finale. Par exemple, nous avons été les premiers à avoir analysé dans sa globalité la chaîne d'approvisionnement du caoutchouc naturel. Ces meilleures pratiques sont d'abord testées chez nous, dans la plantation que nous possédons, conjointement avec Barito Pacific Group, en Indonésie. Le WWF (*World Wildlife Fund*) siège au sein de l'organe de gouvernance de cette plantation pilote et nous profitons de cette synergie locale pour protéger aussi les parcs naturels de Tiga Pulu et de Limau (deux forêts à haute valeur environnementale où certaines espèces sont menacées).

À mobilité durable, performances durables !

Parvenir à une mobilité qui soit véritablement durable, c'est-à-dire bénéfique pour tous et pour la planète, cela nécessite avant tout de faire un usage raisonné des matières premières, et ce d'autant plus si elles sont d'origine fossile. Or, et c'est là un paradoxe, certains manufacturiers de pneumatiques militent en ce moment pour une évolution des normes qui obligerait les automobilistes à renouveler leurs pneumatiques avant que ceux-ci n'aient atteint la limite légale d'usure. Leur argument étant qu'à partir d'un certain seuil d'usure, les pneus verraient leurs performances diminuer, notamment en termes de sécurité. Prendre une telle mesure serait synonyme d'un énorme gaspillage de ressources naturelles, mais l'argument mis en avant mérite d'être pris en considération quelques instants.

Quelques instants, mais pas plus. Car la seule réponse responsable que l'on puisse opposer à cet argument, c'est que la technique doit faire en sorte que les performances du pneu restent constantes tout au long de sa vie. C'est une problématique intéressante, car elle est révélatrice de ce qui nous distingue de beaucoup d'autres



Photo © Carlo-Eduardo Pinho - Michelin

Vue aérienne de la plantation d'hévéas Edouard Michelin au Matto Grosso (Brésil).

manufacturiers. En effet, chez Michelin, nous concentrons nos efforts sur la conception de pneus plus légers, dans lesquels chaque gramme de matière doit remplir le plus longtemps possible sa fonction.

En gros, nous voulons des produits plus légers, plus robustes et qui durent plus longtemps. Tout plaide en faveur de leur longévité, non seulement pour une question d'économie de matière première, mais aussi parce que l'efficacité énergétique d'un pneu s'améliore à mesure qu'il s'use (l'amélioration de cette efficacité atteint +20 % en fin de vie du pneu). Par conséquent, plus un pneu roulera longtemps, et plus son impact environnemental au kilomètre

sera faible ! Et en ce qui concerne la sécurité, je ne pense pas que l'on puisse soupçonner Michelin d'avoir jamais négligé cet aspect, c'est tout le contraire. Simplement nous sommes capables, nos chercheurs sont capables, nos ingénieurs et nos développeurs sont capables de mettre sur le marché des pneus qui conservent leur haute fiabilité jusqu'à l'extrême limite, jusqu'à l'affleurement du témoin d'usure.

Il est fort possible que ce ne soit pas le cas pour toutes les marques de pneu. Mais c'est au client qu'il appartient de faire son choix !

Where next for global environmental research? The answer is Future Earth

By **Corinne LE QUÉRÉ**

Professor and director of the Tyndall Centre for Climate Research

and **Asher MINNS**

Head of Communication for Future Earth Europe at the University of East Anglia in the United Kingdom

It is likely that you live in a crowded European city. You want fresh air when you cross the road, you want to see that everyone everywhere has quality of life, you want to know that plants and animals are safe from extinction through local habitat destruction and globally from climate change. This world that we want needs a different type of scientific research to what has gone before. It needs research that can help solve environmental problems as well as better analyse and understand them. Future Earth has been created for scientists across all disciplines to work together with societies' experts to find solutions to the most pressing challenges facing people and the planet. Here we describe this new global organisation called Future Earth and what it wants to achieve in Europe and how.

A new beginning for the global environment

2015 in the future could be considered the date that politicians, economists, lawyers and technologists see as the visionary year when progress on global sustainability really began. 2015 is the year that humans began to heal the planet.

First, in 2015, in September in New York, the United Nations General Assembly agreed the Global Sustainable Development Goals, more frequently called the SDGs or Global Goals. Almost 200 countries signed-up to them after the UN's largest ever consultation to ensure engagement, participation and agreement. The Global Goals are 17 goals to be achieved by 2030 with 169 targets for the benefit of people, planet and prosperity. All countries will assess their progress against the targets. They attempt to balance the three pillars of sustainable development - Economy, Society and Environment - by ending poverty, combatting climate change, and fighting inequality and injustice. No single powerful international organisation is working on the three pillars together, without which significant progress towards sustainability would be unachievable.

The Global Goals build on the 15 Millennium Development Goals (MDGs) that were adopted in 2000 until 2015. Great progress has been made on the MDGs with progress on reducing hunger, disease, inequality, and access to water and sanitation. The MDGs show the strength of a unified agenda of progress based on goals and targets. The

SDGs go much further, addressing the causes of poverty: that benefits rich and poor and the planet alike.

Second, in 2015, in December in Paris, the UN agreed The Accord de Paris, after 21 years of negotiating. 175 countries have now signed-up to limit their carbon dioxide pollution into the atmosphere from the burning of coal, oil and gas that power all our economies. The Paris Accord is where global politics finally agreed with the data and the recommendations of climate scientists. It is without doubt that the five international assessments led by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) were fundamental to this landmark political outcome. The most recent IPCC Assessment concluded in 2013 that human influence on the warming of the climate system is clear.

In the years before and even during the two weeks of Paris negotiations, scientists and the environmental movement were focused on stressing the importance of an agreement, ideally with a target of a global average warming of not beyond 2°C by 2100. The politicians went further than anyone expected and agreed less than 2°C and ideally only 1.5°C.

New global environmental governance

The process behind the Paris Agreement is new and it is powerful. In time for Paris, each country's governments voluntarily declared their emissions targets that they want to achieve, called their Intended Nationally Determined Contribution (INDC). This too was a new bottom-up consultative and participatory approach to climate gover-



Photo © IISD/Sean Wu

Ouverture par Mme Anne Lagauderie de la quatrième réunion plénière de la Plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), dont elle est la secrétaire générale, Kuala Lumpur (Malaisie), février 2016.

“International recognition of the value of these ‘free’ life-support services that ecosystems provide us with means that a new UN assessment has started, the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES).”

nance that worked for reaching an agreement. It is very different from the top-down wrangling over emissions cuts that went before when none of the major emitting countries wanted to volunteer their perceived economic disadvantage of being the first to cut their emissions.

Current commitments with INDCs are headed for a global average temperature of around 3°C this century, a long way above well below 2°C and 1.5°C. Each nation will revisit its INDC targets every 5 years with the idea of strengthening its national contribution as the route to transforming societies to zero carbon energy systems becomes clearer. 3°C still carries the likelihood of significant climate impacts, so researching consequences and preparedness for high-end climate change remains essential.

France’s leadership on the Paris Agreement means that it is now well respected the world over for its environmental diplomacy. The Paris Agreement was under the Presidency of Laurent Fabius, rebranding France’s reputation. For example, the French Ambassador to Bangladesh Mme Sophie Aubert, spoke in April at a climate change workshop in Bangladesh, a low-lying and poor nation where preparedness for sea-level rise, water shortages or floods and storms is more essential to Bangladeshi scien-

tists and citizens than a zero carbon energy system.

There are some signs that it might be possible to decouple economic growth from emissions, although it is far too early to tell. After years of global cumulative increase, carbon dioxide emissions have stalled in the past two years. This is mostly due to a slowdown of coal burning in China in line with its economy. Also, over half of new energy needs in China in 2014 were met from renewables and non-fossil fuels, energy collected from hydropower, wind turbines, solar power, and nuclear energy. On the other hand, behind this recent global flattening of the line on the emissions graph is growth in most Asian developing economies, the Middle East, and a slight decrease in Europe and some industrial countries.

Into The Anthropocene Epoch

The consultative approach to agreeing the UN’s Sustainable Development Goals and the bottom-up INDCs that paved the foundations for the Paris Accord are a transformation to participatory methods of successful global governance. A similar transformation is happening in environmental change research, with a new global initiative called Future Earth.

Who Governs Global Future Earth?

The Governing Council of Future Earth consists of the International Council for Science, the International Social Science Council, the Belmont Forum of funding agencies, the UN educational, scientific and cultural organisation (UNESCO), UN environmental programme (UNEP), UN University (UNU), World Meteorological Organisation (WMO), Sustainable Development Solutions Network (SDSN) and the Science and Technology in Society forum (STS).

Environmental change research has been astoundingly successful in a few decades at better understanding the natural environment, identifying problems, monitoring problems, and assessing the consequences. For example, our well recorded loss of biodiversity includes the pollinators that reproduce our crops for us; we need fresh water and clean air to safeguard our health; we need unpolluted and fertile soils to grow our crops; we need healthy and productive oceans, and of course a relatively stable climate.

International recognition of the value of these 'free' life-support services that ecosystems provide us with means that a new UN assessment has started, the Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Global fisheries, for example, is a \$100 billion annual economy, employs 700 million people, and more than 3 billion people get more than 30% of their diet from the sea. Restoring the environment and the natural services that it provides us with is interlinked with ending poverty, injustice and inequality and combating climate change. The environment is not 'other' – it is at the heart of progress with the other two pillars of sustainable development, economy and society.

The Anthropocene is our proposed new geological epoch because mankind is now the dominant force influencing the global environment. It is only now in this new epoch that environmental science understands enough about environmental problems to turn its focus to the solutions. No-one in science, policy or technology knows yet how to solve global environmental problems, including climate change. While problems are solved at the small scale of a river or a lake or a forest, a community or a coastline, global problems are less tractable, complex, and interlinked with economy and society. The cost of the loss of global fisheries, for example, is shared across many millions of people and thousands of communities, invisible from any balance sheet and therefore undetectable but has huge impact on national economies, livelihoods and well-being. While workable solutions are not yet clear, what is well understood is that the method of science and research has to radically change to meet the challenge of the Anthropocene. Changing the method of science towards seeking and contributing to environmental solutions is the purpose of Future Earth.

Future Earth evolves from the Anthropocene

Third in 2015 was the formal start of Future Earth, a new global, regional and local organisation to support and promote global environmental research, whose vision is for people to thrive in a sustainable and equitable world. It is born of the recognition that science needs to better contribute to solving the problems of the Anthropocene in addition to better understanding them. Future Earth is recognition by its funders that society requires a new type of science that bridges across traditionally separate academic disciplines, including health, engineering, and humanities (social, natural and physical) to produce a new type of useful knowledge in partnership with society, not separate from society.

Future Earth in France

Paris hosts one of the five global secretariat hubs of Future Earth located at Université Pierre et Marie Curie (UPMC). It is funded by a consortium of the Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Centre national de la recherche scientifique, Alliance nationale de recherche pour l'environnement and Agence nationale de la recherche. The French hub's focus is on synthesis and foresight of research knowledge and co-leads the starting-up and coordinating three areas of Future Earth's thematic research activities, called Future Earth Knowledge Action Networks. The French team's focus is on the nexus of food, water, and energy, oceans, and natural assets. Further focus is on advancing transdisciplinary knowhow and promoting skills of Early Career Researchers. At the country level, the French National Committee for Global Change Research oversees Future Earth's research in France. Its Chair is Wolfgang Cramer of CNRS at Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE).

To engage across disciplines, Future Earth is working with society using a technique called coproduction of knowledge where it asks society what it wants to know, discusses how research can help, incorporates all available expertise into the research. It then works alongside these societal partners and engages widely through tested and effective as well as innovative science communication, for example the Future Earth New Media Lab.

Future Earth is building on the unique foundation of the researchers within four Global Environmental Change Programmes that for 30 years was coordinating environmental research worldwide. These four programmes all delivered excellent science that better assessed and understood the problems, but the issues of the Anthropocene need a coming together of separate disciplines as well as better engagement with policy, business, economic and societal

futureearth

research for global sustainability



© Future Earth

Corinne LE QUÉRÉ and Asher MINNS

“Future Earth is currently in consultation with the environmental and sustainability sciences research community about its new research themes, called Future Earth Knowledge Action Networks, for joining academic disciplines with societal experts on the themes of environment and society.”

Interview with Thorsten Kiefer the Director of the Paris Hub of Future Earth

You call Future Earth a platform. What is the difference between a platform and a network?

We call Future Earth a platform because we want to cultivate a new level of openness and inclusiveness and participation than a predetermined 'programme' would otherwise suggest. Within our new platform of Future Earth, a diverse range of international transdisciplinary interaction is developing. Our Knowledge-Action Networks are a globally interactive participatory theme. They connect existing research organisations across different disciplines with each other and with society and experts outside of academia for the purpose of collaborating on complex sustainability issues.

How will Future Earth handle scientific controversies such as have happened on climate, on health or on biodiversity impacts?

There are many experts that Future Earth can mobilise, for example for the Synthesis and Foresight that we co-lead from the office in Paris. Controversies of contested knowledge, for example impacts on biodiversity, could make it into the research priorities of Future Earth as essential questions where global evidence is needed. Fabricated controversies in the media such as on climate change can be addressed from a communications perspective, scientifically backed up by our pool of global experts from across many disciplines.

What other organisations do you work with in France?

Future Earth is timely because lots of organisations are integrating traditionally different disciplines into their work to make better and more useful research, and we look forward to working with such organisations in France. We network them with other organisations in other regions for greater international partnerships and for learning and sharing for greater research outcomes.

Do you have the capacity to use all existing research, or do you base yourself more at the interface between IPCC and IPBES, for example?

IPCC and IPBES are currently among our most obvious stakeholders, but in our Knowledge Actions Networks and globally connecting research we aim far beyond, in particular through engaging with wider society and expertise that is outside of traditional academia. Future Earth facilitates high quality research that is equally useful.

Future Earth refers a lot to the Global Goals. The human goals of the Millennium Development Goals that went before have seen significant progress or been met. Environmental goals on the contrary have mostly regressed. Is it going to be the same with the SDGs?

The purpose of Future Earth is to help deliver knowledge to achieve politically agreed or societally wanted transformations to sustainability. It is impossible to make significant progress on sustainability without bridging across all three of the pillars, economy, society, and environment, together.

expertise. Future Earth is both refreshing and making a step-change in the design, the doing, and the communication of global change research. Joined-up thinking is required to solve complex social-environmental problems, and that thinking is not the sole domain of the sciences. Like the bottom-up and consultative process that led to the agreements of the global goals in New York and the climate change targets in Paris, a similar reorganisation of process is required that delivers on what went before.

Future Earth is currently in consultation with the environmental and sustainability sciences research community about its new research themes, called Future Earth Knowledge Action Networks, for joining academic disciplines with societal experts on the themes of environment and society. The Knowledge Action Networks focus on the nexus of water, energy and food; healthy oceans; transformations to sustainable societies; protecting natural assets; implementing the global goals; sustainable cities; and safeguarding human health. Essential for all of these themes is searching for sustainable finance and economics. Most of these Knowledge Action Networks are not

new themes of research, what is different is that Future Earth research will be done differently, through coproduction and partnership to solve environmental problems at the level of global, regional and local organisation, as well as it will monitor and deepen understanding of how the environment works.

As an example, the top-level questions for the Ocean Knowledge Action Network are science and solutions-oriented. How do human activities, combined with natural variability, affect the health of oceans, coasts, and their ecosystem and economic services? How can negative effects on ocean health be avoided? How can ocean health and ecosystem services be preserved or restored for the benefit of people? Each Knowledge Action Network has a set of questions that combine the concepts of science-based sustainability and fair stewardship for livelihoods and well-being, better understanding interactions across ecosystems and society, and developing effective management and governance. In all cases, this is researchers working alongside expertise from wider society.

Seeking global environmental solutions

A further innovation of Future Earth is the way that it is organised so that it engages with policy and societies everywhere and that this learning is connected together. Like any traditional large organisation it has a Headquarters, but this one is distributed, across Montreal, Stockholm, Paris, Tokyo, and Boulder and Fort Collins in Colorado. To further devolve global research that also engages with essential local priorities, Future Earth has regional offices in Uruguay, Rwanda, Cyprus, Japan and the UK, with much sharing of practical expertise between regions. New Centres in important regions are also planned, such as India. And at the very local level, Future Earth has in-country national committees and networks. All of these structures are autonomous but collaborating internationally and providing momentum so that the intellectual total is more than the sum of its parts. Future Earth is global, regional, and local.

We close with a recent assessment of what scientific knowledge already exists in support of the UN's new Sustainable Development Goals. An analysis of journals 2009-2013 shows that there were 334,000 academic peer reviewed publications on the topic of sustainability. This is only 3% of the world's academic output during this time, though the growth rate of sustainability publications is high at 7.5% per year. Academic publications are not a good indicator of societal impact as most journals are unread and uncited except by their authors, but these results do show how much more science knowledge is emerging and is needed to transition towards global sustainability.

Future Earth is merging the expertise and know-how of the Global Environment Change Programme that better understood environmental problems with this emerging field of sustainability science, for research that will be done in partnership with society. Future Earth's transdisciplinary and coproduced research over the next 15 years will greatly strengthen the sciences' contribution to the solutions needed to deliver the Sustainable Development Goals and the Paris Accord on climate change.

Further sources of information

The UN Sustainable Development Goals: www.global-goals.org

The UN Framework Convention on Climate Change: <http://unfccc.int/>

Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services IPBES: www.ipbes.net

Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC www.ipcc.ch

Future Earth began in 2015: www.futureearth.org/knowledge-action-networks

French National Committee for Global Change Research <http://cnfcg.ipsl.fr/>

Contact wolfgang.cramer@imbe.fr +33-4-42-90-84-86

For Future Earth in Europe contact: a.minns@uea.ac.uk +44 1603 593900

www.futureearthurope.org

Une dramaturgie des sciences ?

Par David WAHL

Écrivain, auteur de *La Visite curieuse et secrète* ⁽¹⁾

D'où vient la haine que les hommes ont longtemps portée aux manchots ? Sait-on que ces derniers ont bien failli disparaître dans d'horribles circonstances ? Dans quelle mesure cette histoire nous en apprend-elle beaucoup sur le rapport de l'homme à son environnement ?

Comment s'emparer des sciences pour en tirer des histoires, porter un questionnement environnemental au théâtre, partager avec le public son étonnement et ses recherches ?

Suite à une collaboration avec des biologistes d'Océanopolis de Brest, le centre de culture scientifique et technique des océans, un auteur raconte sa recherche d'une construction émotionnelle du savoir – et de sa transmission.

Tout part du désir de raconter des histoires. Des histoires vraies, des récits tissés de réalités. Et de réalités souvent méconnues, ou mal connues, peu transmises, trop ardues. Il faut alors réfléchir à comment les trouver, comment les interpréter, comment les raconter. Comment les rendre audibles, attrayantes, épiques, merveilleuses...

Je suis auteur de textes, de récits appelés « Causeries », que j'interprète au théâtre. Ces « Causeries » ont chacune un thème propre : historique, scientifique, littéraire. Et elles sont le résultat d'une enquête assez longue au cours de laquelle j'entre en immersion documentaire : j'explore en néophyte de vastes bibliographies et je rencontre des historiens, des scientifiques, des spécialistes. Je recueille des histoires oubliées, des audaces philosophiques ignorées, des découvertes scientifiques encore confidentielles. Je mélange les genres, les époques, les sciences, les domaines d'appréhension du monde. Puis, à partir de cela, il me faut bâtir une dramaturgie, une narration, une poésie. Donner à toute cette réalité l'aspect d'un conte, d'une épopée. Pour, *in fine*, arriver à transmettre au public l'émerveillement qui fut mien lors de cette recherche.

Et c'est lors de l'écriture de l'une de ces « Causeries » que je me suis trouvé confronté à la question des rapports complexes de l'homme à son environnement.

La Visite curieuse et secrète, ou relation véritable de choses inouïes se passant en la mer et ses abysses est née d'une demande du Quartz, la scène nationale de Brest. Il fallait réfléchir à un spectacle conçu et créé au sein d'Océanopolis, un aquarium et un centre scientifique tenu par des biologistes et des océanologues.

Pendant un an, j'y ai mené mon enquête. Au départ, il faut bien le reconnaître, mon procédé de recherche et d'écriture restait quelque peu mystérieux aux yeux des scientifiques, et ces derniers ne savaient pas trop quoi me ra-

conter, peut-être par peur de m'alourdir l'esprit avec des éléments semblant trop complexes pour un profane.

Il n'y avait pas non plus, de mon côté, d'idée précise de ce que j'allais raconter. Il me fallait glaner, converser, errer – bref explorer, en tous sens..., dépasser les inventaires, faire naître une émotion. Trouver en ces sciences naturelles une matière poétique propre à les incarner en une histoire. On l'oublie trop souvent : à la base de toute connaissance, il me semble qu'il n'y a pas que la froide raison, ni une cruelle pulsion dominatrice qui viserait à asservir le monde, mais une manifestation émotionnelle, sensible nous révélant tout d'abord ceci : depuis toujours, l'homme est quelque peu anxieux d'être au monde. Son environnement l'effraie, autant qu'il le fascine. Bien qu'en en faisant partie, quelque chose semble le pousser à la solitude.

Quel contraste entre une perception extérieure de l'homme – si petit au monde, si excentré en l'univers, si récent dans l'histoire, si éphémère dans le temps – et son intériorité, si grande, le rendant capable de méditer sur la mort, de penser l'éternité, de découvrir les lois physiques d'un univers qu'il n'explorera jamais qu'en pensée, de voir ce qui apparemment n'est pas, d'inventer un moyen – le langage – de se relier aux générations passées comme de se transmettre aux générations futures.

Contraste, toujours, de cette fragilité extrême fraternisant avec une invraisemblable capacité de nuisance et de destruction. Comment comprendre cela ?

C'est pourquoi nous serons toujours guettés par la folie. Et c'est la raison pour laquelle, afin d'éviter d'y sombrer totalement, l'homme s'est donné à la science et à la connais-

(1) *La Visite curieuse et secrète, ou relation véritable de choses inouïes se passant en la mer et ses abysses*, Éditions Riveneuve/Archimbaud, 2014.



Photo © Alain Matart-Renodier/BIOSPOTO

Un groupe de manchots royaux sur les Îles Malouines (Atlantique Sud).

« Ma mission était fort simple : je devais tendre des maquereaux à de petits manchots nommés « papous », me tenant à distance de manchots beaucoup plus imposants nourris plus au loin, les magnifiques manchots royaux. »

sance. Pour entrer en dialogue avec cet environnement qui semble tellement le menacer et le réduire à rien.

Il s'agit donc de retrouver l'émotion fondatrice de toute science, et de la transmettre. On pensera d'abord sans aucun doute que la peur y a tenu un grand rôle. Peur des bêtes sauvages, du froid, du chaud, du manque de nourriture, de l'errance... Et l'on n'aurait pas totalement tort. Après tout, en Occident, on a toujours accordé à la peur de grandes vertus, une force agissante, qu'elle permette une conversion dans les pensées et les actes ou dans les modes de vie.

Mais il y a peur... et peur. Au XVII^e siècle, en France, un débat passionné a profondément divisé l'opinion publique sur la nature et la finalité de la peur. Il s'agissait à l'époque, tout comme à la nôtre, de questionner notre capacité au changement d'état d'esprit, à la conversion des habitudes et des mœurs. En ce siècle-là, c'était le rapport à Dieu et au Salut qui dessinait l'horizon de cette pensée. Deux clans s'affrontaient alors. Le premier soutenait qu'une conversion efficace ne peut s'obtenir que par ce que l'on appelait alors l'« attrition » : une crainte de mal faire aux yeux de Dieu, par peur du châtement éternel. Les autres penchaient plutôt pour la « contrition », qui était un sentiment de regret du péché, parce que l'on avait fait de

la peine à Dieu, pourtant indéfectible dans l'amour qu'il porte à ses créatures. La peur d'être puni, contre la peur de blesser. La première, soutenue par Richelieu, qui ne pensait pas que l'on pût aimer Dieu sans la peur de l'enfer, l'emporta sur la seconde. Cependant, pour ma part, je reste persuadé que cette crainte de décevoir ou, pour le dire autrement, ce lien d'amour que l'on serait navré de briser reste une force plus profonde et plus marquante. Mettre une relation personnelle, existentielle à la place d'un rapport de force et de peur. Privilégier l'abandon à la rencontre et à l'émerveillement.

Et c'est ainsi qu'en genèse à *La Visite curieuse*, il y eut cette rencontre providentielle et merveilleuse. Comme j'aime les histoires, je vais raconter celle-ci.

Un jour, la directrice scientifique d'Océanopolis, Céline Liret, qui ne savait trop quoi faire avec moi (nous sommes par la suite devenus fort complices), me conseilla d'aller nourrir les manchots en leur « manchotière ». Peut-être pensait-elle qu'une rencontre directe avec l'animal plutôt qu'avec l'homme ou qu'un travail pratique plus qu'une conversation s'avérerait très inspirant. De mon côté, l'idée de m'approcher et de donner leur pitance à des bêtes fort mystérieuses et peu courantes quand on habite Paris, m'enchantait. Accompagné de soigneuses, je péné-

traï dans la manchotière. Ma mission était fort simple : je devais tendre des maquereaux à de petits manchots nommés « papous », me tenant à distance de manchots beaucoup plus imposants nourris plus au loin, les magnifiques manchots royaux.

Alors que j'étais absorbé par ma tâche, penché sur mes petits « papous », je sens soudainement à mon côté une masse imposante. Un manchot royal se lovait contre moi !

Ma surprise fut grande. Ma stupeur aussi. Ce manchot me donnait des petits coups d'ailes, il cherchait le contact physique et poussait de longues mélodées sonores. Il semblait vouloir entrer en contact avec moi.

J'en avertis les soigneuses, qui me répondirent : « Ah, ne t'inquiète pas : c'est Dominique... Mais, comme il a l'air de bien t'aimer, on va être obligées de te faire sortir... »

Le manchot me suivit. Et je vis à regret la grille nous séparer de force. Très ému par cette improbable rencontre, je filai dans le bureau de la directrice scientifique pour en savoir plus.

Cet animal s'appelait bien Dominique. Suite à un accident précédent sa naissance, on avait placé l'œuf d'où il était sorti en couveuse artificielle. Né ainsi parmi les hommes, ce manchot, pendant les mois qu'il avait vécus parmi eux, s'était imaginé être l'un des nôtres. Replacé dans sa manchotière, étranger parmi les siens, il attendait qu'un homme lui rendît visite. Même si, en vérité, je l'appris par la suite, ce n'est pas un ami que cherche ce manchot, ni même un frère, mais... une femelle reproductrice ! Nos odeurs devaient être compatibles. Et elles le sont restées. À chaque fois que je suis retourné le voir, j'ai eu droit à une parade nuptiale...

C'est à la suite de cette rencontre émouvante et personnelle, que j'eus l'envie d'en savoir plus sur ces animaux. Et c'est ainsi que je découvris l'étonnante et malheureuse histoire des manchots. J'avais trouvé l'entrée en matière de mon récit.

Car, à n'en pas douter, l'histoire de la rencontre entre les hommes et ces pauvres animaux représente à elle seule le pire condensé de tout ce qu'il peut y avoir de tragique dans le rapport de l'homme à son environnement.

Les Européens les découvrent à la fin du XV^e siècle, lors de l'exploration de l'hémisphère austral. On ne sut trop quel nom lui donner. L'apparence de cet animal semblait hésiter entre deux natures, l'aquatique et la volatile, causait une répulsion aux scientifiques œuvrant en cette aurore de la modernité.

Les marins, moins délicats, lui donnèrent un nom indicatif, l'oise magellane, pour signifier simplement aux autres marins que cette bête était comestible et avait bon goût. On en fit un carnage pour en remplir les cales. Puis les commerçants remplacèrent les explorateurs et l'on se rendit compte que, vraiment, les manchots étaient un bon investissement. Leurs plumes servirent au rembourrage de matelas, et leur peau à la confection de chaussures, de sacs et autres chapeaux. Puis ce fut la Révolution industrielle. À ce moment-là, on crut le manchot perdu pour toujours,

car il fallait d'énormes quantités d'huile animale pour alimenter nos technologies naissantes, et les manchots, au même titre que les phoques ou les baleines, en étaient remplis. Ils devinrent ainsi une matière première pour nos industries. On fit même de ces pauvres oiseaux... des briquettes de chauffage. Et c'est pourquoi le manchot a bien failli disparaître dans d'horribles circonstances... Pour couronner le tout, ce pauvre animal auquel on a mis tant de temps à donner un nom en possède à présent deux : un « faux » nom, *pingouin*, parce qu'un navigateur anglais complètement myope l'avait confondu avec le Grand Pingouin, un autre oiseau marin vivant en Europe du Nord, aux ailes également atrophiées, à présent bel et bien éteint, lui – et un « vrai » nom, *manchot*, qu'un scientifique français lui donna en 1760, mais qui n'est guère plus reluisant pour notre malheureux animal, puisqu'il signifie « estropié ».

Voilà un exemple s'il en fut jamais de ce qu'il y a de pire dans le rapport de l'homme à la nature. Une exploitation sans vergogne motivée par une soif de pouvoir et de ressources, assortie au mépris abyssal pour une créature jugée bâtarde. Et aucune inquiétude quant à la disparition de l'espèce et de l'impact que cela pourrait avoir sur le reste de l'écosystème.

Je continuais mes recherches et rencontrais d'autres scientifiques, comme Gilles Boeuf, alors président du Muséum d'histoire naturelle. Tout, au fil de ces rencontres, me paraissait stupéfiant – autant que mes vieilles histoires exhumées lors de mes recherches dans les vieilles annales de l'histoire. Les découvertes récentes en embryologie, qui nous rapprochent d'un poisson plus qu'on ne l'avait jamais pensé, les recherches sur le microbiote et le mystérieux océan intérieur que chaque homme recèle en soi, tout cela témoigne d'une autre approche de notre environnement, plus intrinsèque qu'extrinsèque. Loin de nous faire face, l'océan et son écosystème nous contiennent autant que nous les contenons, en quelque sorte.

À l'opposé de considérer notre environnement comme un self-service où tout est permis, un terrain de chasse ou encore une source inépuisable de bénéfices financiers, il y aurait donc une toute autre manière de considérer ce dernier : prendre conscience que le monde qui nous entoure est bien plus relié à nous que nous ne l'imaginons. À voir dans les animaux et la nature bien plus qu'un échange marchand, y voir une véritable communauté de destin. Je me suis dit que ça valait la peine de continuer sur cette voie et de bâtir un récit subjectif qui montrerait le passage d'une relation utilitariste à une relation plus sensible et responsable, telle que la science nous le découvre à l'heure actuelle.

D'ailleurs, par quel miracle le manchot a-t-il échappé à l'extermination ? Entre toutes les causes invoquées, une me paraît particulièrement.

Au début du siècle dernier, un romancier à succès alors très célèbre, Anatole France, publie une parodie de l'histoire de France vécue par des manchots, que, par la faute des Anglais, il appelle lui aussi des pingouins. *L'Île des pingouins* connut un succès considérable. Lire une his-

toire de manchots qui vivaient une histoire similaire aux hommes rendit ces animaux éminemment sympathiques auprès du grand public.

Et d'universellement méprisé, notre animal qui nous rappelait tant à nous-même devint la mascotte que l'on connaît aujourd'hui. Ce qui signifie que, pour passer de l'indifférence, voire du mépris, à la considération, il a fallu tisser un lien poétique entre lui et nous ; on a mis quelque chose de l'homme dans le manchot et quelque chose du manchot dans l'homme. On a créé une destinée commune grâce à un lien poétique et littéraire.

C'est pourquoi le rôle de la littérature dans la transmission des sciences me semble d'une extrême importance. On a en mémoire de nombreux scientifiques qui furent de grands écrivains, comme Buffon ou Cuvier (pour ne citer qu'eux), et des écrivains qui furent des passeurs de science incontournables, à l'image de Jules Verne.

Pour que se rencontrent science et récit, il s'agit avant tout, et c'est là le cœur de mon travail, de parvenir à obtenir et à partager une construction émotionnelle du savoir. On relie ainsi – pour reprendre une idée chère au sociologue Edgar Morin –, en injectant une subjectivité bien-faite et sensible, des espaces de pensée auparavant séparés. On fait naître un sentiment, une relation, bien avant une description froide. On crée un récit collectif, une histoire commune. Et la connaissance perd de sa froideur. Après tout, que signifient les adjectifs dont on se sert pour décrire ce que l'on voit, si l'on ignore le sentiment qui en est la cause ? Ce n'est pas parce que cette femme est la

plus belle du monde que l'on en est amoureux, mais bien parce que l'on en est amoureux qu'elle est la plus belle du monde. Sans expérience personnelle et sans manifestation émotionnelle qui posent les bases d'une relation à ce qui nous entoure, ne risquons-nous pas, comme on le voit si souvent, de céder à une science arrogante ?

Le philosophe gréco-romain Plotin le disait déjà : « *Tout désir est un désir de connaître* ». Et puisque le désir, c'est la chair de l'homme, on peut se poser la question suivante : la connaissance serait-elle une malédiction ?

Si la connaissance a pour but la connaissance en elle-même ; pour le dire autrement, si la connaissance ne sert qu'à connaître davantage, à avoir plus, à dresser des inventaires en vue d'une emprise et d'une domination accrues sur le monde, alors il y a fort à parier que la science qui en résultera sera toujours plus corrompue et corruptrice.

Mais si le but de la connaissance, c'est l'émerveillement, voire la contemplation, c'est-à-dire l'union avec ce que l'on regarde, si c'est l'« être mieux » plutôt que l'« avoir plus », alors, oui, peut-être que chercher à connaître, ce ne sera plus seulement chercher à posséder, mais aussi chercher à aimer.

Se réalisera alors sans doute le vœu du poète Novalis, dont la foi se plaisait à rêver aux noces des sciences et d'une quête intérieure : « *Les naturalistes et les poètes, en parlant une seule et même langue, ont toujours indiqué qu'ils ne formaient qu'un seul et même peuple.* »

Sciences environnementales et théologie : le cas exemplaire de l'encyclique *Laudato Si'* (1)

Par le Père Frédéric LOUZEAU

Directeur du Pôle de recherche du Collège des Bernardins, Paris

Jamais, depuis leur séparation moderne, l'urgence d'une nouvelle rencontre entre sciences et religions n'était plus nettement apparue que de nos jours. Les solutions aux défis environnementaux ne sauraient procéder d'un regard unique et totalisant sur la réalité.

Nous examinons ici la manière exemplaire dont, dans son encyclique *Laudato Si'* parue le 18 juin 2015, le pape François intègre dans un parcours éthique et spirituel les résultats des diverses sciences environnementales et l'apport de la pensée écologique.

Jamais, depuis leur séparation moderne, la possibilité et surtout l'urgence d'une nouvelle rencontre entre sciences et religions n'étaient plus nettement apparues que de nos jours. Les défis environnementaux nous pressent. Leurs solutions, en effet, ne sauraient procéder d'un regard unique et totalisant sur la réalité (2). Les sciences empiriques, en particulier, ne peuvent expliquer complètement « la vie, la structure de toutes les créatures et la réalité dans son ensemble (3) »

« Toute solution technique que les sciences prétendent apporter sera incapable de résoudre les graves problèmes du monde si l'humanité perd le cap, si l'on oublie les grandes motivations qui rendent possibles la cohabitation, le sacrifice et la bonté (4). »

C'est ici la question des motivations ou, en termes philosophiques, des finalités de l'action humaine qui est en jeu, une question que l'éthique et les religions doivent prendre en charge : ce qui fait que les hommes sont des hommes et non des robots, des êtres capables de poursuivre des fins, de se fixer des buts, et surtout de donner ou non un sens à leurs actions, comme à leur vie. Si les sciences et les techniques préemptaient le domaine de l'origine, du sens et des finalités, elles outrepasseraient « de façon indue leurs frontières méthodologiques (5) ».

« La science et la religion, qui proposent des approches différentes de la réalité, peuvent entrer dans un dialogue intense et fécond pour toutes deux (6) », fécond surtout pour l'humanité elle-même aux prises avec un des plus graves défis de son histoire. Voyons comment la pensée du pape François nous, dans l'encyclique *Laudato Si'* parue le 18 juin 2015, une alliance exemplaire entre, d'une part, un parcours éthique et spirituel et, d'autre part, les résultats des diverses sciences environnementales (7) et l'apport de la pensée écologique.

Le diagnostic des sciences « exactes » : prendre la mesure de ce que l'humanité a détruit

« Nous n'avons jamais autant maltraité ni fait de mal à notre maison commune qu'en ces deux derniers siècles (8). » Selon le souhait du pape François, *Laudato Si'* se présente à la fois comme un *cri* relayant la clameur de la terre autant que celle des pauvres (9), et comme un *appel* invitant l'humanité à une conversion écologique. Néanmoins, cette interpellation planétaire paraîtrait abstraite et incantatoire, si elle ne se confrontait pas à la réalité des dégradations multiformes qui affectent la nature et une grande partie des hommes (10).

(1) Lettre encyclique du Saint-Père François sur la sauvegarde de la maison commune, 24 mai 2015 (référée dans la suite de ces notes par le sigle : LS). Nous en recommandons l'édition commentée avec texte intégral, réactions et commentaires, sous la direction de F. Louzeau et B. Roger, Préface de Mgr Jérôme Beau, Éditions Parole et Silence, Collège des Bernardins, septembre 2015, 300 p. (avec les contributions de Dominique Bourg, François Euvé, Alain Grandjean, Philippe Joubert, Jean Jouzel, Bruno Latour, Corinne Lepage, Gérard Payen, Bernard Perret, Pascal Roux et Bernard Saugier).

(2) Voir LS n°63.

(3) Voir LS n°199.

(4) Voir LS n°200 (c'est nous qui soulignons).

(5) Voir LS n°199.

(6) Voir LS n°62.

(7) Nous préférons l'expression « sciences environnementales » à l'expression « sciences de l'environnement » pour marquer combien la pensée écologique propose une véritable réorganisation des cadres de pensée habituels (voir BOURG (Dominique) et FRAGNIERE (Augustin), La Pensée écologique. Une anthologie, Paris, PUF, 2014, pp. 4-5). Voir, *infra*, « L'apport des sciences humaines et sociales. L'option de l'écologie intégrale ».

(8) Voir LS n°53.

(9) Voir LS n°49.

(10) Voir LS n°17.



Photo © G. M. B. Akash / PANOS-REA

Réfugiés climatiques fuyant leur village menacé par l'érosion des berges de la Yamuna, une des sept rivières sacrées de l'Inde, 2014.

« Tant l'expérience commune de la vie ordinaire que l'investigation scientifique démontrent que ce sont les pauvres qui souffrent davantage des plus graves effets de toutes les agressions environnementales. »

Or, sans les sciences « exactes » de l'environnement, il est impossible de *prendre l'entière mesure* des dégâts infligés à la biosphère. Certes, indépendamment des multiples analyses scientifiques, un simple regard sur le monde permet déjà d'observer les violences exercées contre la nature et les hommes les plus fragiles : « Il suffit de regarder la réalité avec sincérité pour constater qu'il y a une grande détérioration de notre maison commune ⁽¹¹⁾. »

Cependant, tous les grands indicateurs du drame environnemental échappent à nos sens, qu'il s'agisse de la composition chimique de l'atmosphère (et notamment du cycle du carbone), de la température moyenne à la surface de la terre, de l'acidification des océans, du rythme d'effondrement de la biodiversité et de détérioration des écosystèmes. Sans l'apport des recherches scientifiques les meilleures, il est impossible de se représenter l'ampleur véritable des dégradations, leur rythme d'évolution dans les temps futurs et, par-là, le danger réel qui pèse sur l'avenir de l'humanité et sur celui d'un nombre incalculable d'espèces vivantes.

Le sérieux d'un examen de conscience et d'un itinéraire de conversion exige que l'on cherche à recueillir le meilleur des résultats de la recherche scientifique disponible, et plus encore à en faire ressentir la portée ⁽¹²⁾. Pour le pape François, la prise en compte des modèles de pré-

vision fait partie de la transformation morale et spirituelle à laquelle l'humanité est appelée. C'est pourquoi, sans néanmoins citer le moindre chiffre ni reproduire le moindre schéma, le premier chapitre de l'encyclique propose un état des lieux panoramique de « ce qui se passe dans notre maison commune ».

Il ne s'agit pas simplement de reproduire, comme en écho, ce que d'innombrables publications diffusent par ailleurs. Plus profondément, l'objectif poursuivi par le pape est de « métaboliser » les alertes scientifiques en attitude spirituelle, c'est-à-dire d'aider le lecteur à « prendre une douloureuse conscience, [à] oser transformer en souffrance personnelle ce qui se passe dans le monde ⁽¹³⁾ ».

Ce faisant, et ceci n'a pas toujours été bien compris, le pape n'aspire nullement à juger ou à débattre de questions scientifiques en se substituant aux chercheurs eux-mêmes ⁽¹⁴⁾. Comme il en va pour toute société et pour toute l'humanité, chaque fois qu'il est question de son avenir, la réflexion commune doit intégrer toutes les données dis-

(11) Voir LS n°61.

(12) Voir LS n°15.

(13) Voir LS n°19.

(14) Voir LS n°188.

ponibles, qu'elles proviennent des sciences de la nature comme des sciences humaines ou de l'expérience sociale et politique des peuples, pour parvenir à une vision la plus lucide possible de la situation, puis à une évaluation de ce que requièrent les changements nécessaires. Cette « métabolisation » – spirituelle, morale et politique, pourrait-on dire – des études scientifiques vaut également pour tous les processus de décision concernant l'impact environnemental d'un projet concret ⁽¹⁵⁾.

L'apport des sciences humaines et sociales : l'option de l'écologie intégrale

Un deuxième aspect de l'intégration des sciences environnementales dans l'analyse du pape François est, lui aussi, très significatif. En effet, à de multiples reprises, l'encyclique entérine ce que certaines écoles des sciences humaines et sociales ont fortement mis en lumière depuis des décennies, à savoir l'*interdépendance* entre les *défis environnementaux* et l'ensemble des *problèmes humains et sociaux*, à commencer par le sort réservé aux plus pauvres.

« *L'environnement humain et l'environnement naturel se dégradent ensemble, et nous ne pourrions pas affronter adéquatement la dégradation de l'environnement si nous ne prêtons pas attention aux causes qui sont en rapport avec la dégradation humaine et sociale. De fait, la détérioration de l'environnement et celle de la société affectent d'une manière spéciale les plus faibles de la planète : tant l'expérience commune de la vie ordinaire que l'investigation scientifique démontrent que ce sont les pauvres qui souffrent davantage des plus graves effets de toutes les agressions environnementales* ⁽¹⁶⁾. »

Pour la pensée écologique et les disciplines académiques associées, non seulement la séparation absolue entre les sciences de la nature et les sciences humaines doit être dépassée, mais l'environnement doit aussi être pris en compte non plus comme un paramètre d'extension des paradigmes rationnels adoptés jusque-là, mais bien comme un élément essentiel de la vie des sociétés humaines qui oblige à une reconfiguration des catégories et des cadres de pensée ⁽¹⁷⁾. C'est bien cette thèse centrale que l'on retrouve dans l'encyclique, lorsque le Souverain Pontife propose, dans le chapitre IV, la solution d'une « écologie intégrale » qui incorpore la place spécifique de l'être humain dans le monde et dans toutes les relations qu'il entretient avec la réalité qui l'environne ⁽¹⁸⁾. Ce concept clé désigne l'option pour un mode de résolution des défis environnementaux qui tienne compte de tous les éléments constitutifs d'un monde profondément marqué par l'interdépendance entre les êtres, tout spécialement entre l'homme et la biosphère.

« *Il est fondamental de chercher des solutions intégrales qui prennent en compte les interactions des systèmes naturels entre eux et avec les systèmes sociaux. Il n'y a pas deux crises séparées, l'une environnementale et l'autre sociale, mais une seule et complexe crise socio-environnementale. Les possibilités de solution requièrent une ap-*

proche intégrale pour combattre la pauvreté, pour rendre la dignité aux exclus et, simultanément, pour préserver la nature ⁽¹⁹⁾. »

Au reste, l'intégralité de l'approche atteint, conformément au réquisit des humanités environnementales, la sphère même de la *culture* ici définie comme le « monde des symboles et des habitudes de chaque groupe humain ⁽²⁰⁾ ».

« *Voilà pourquoi l'écologie suppose aussi la préservation des richesses culturelles de l'humanité, au sens le plus large du terme culturel. D'une manière plus directe, elle exige que l'on fasse attention aux cultures locales lorsque l'on analyse les questions en rapport avec l'environnement, en faisant dialoguer le langage scientifique et technique avec le langage populaire. C'est la culture, non seulement dans le sens des monuments du passé, mais surtout dans son sens vivant, dynamique et participatif, qui ne peut pas être exclue lorsque l'on repense la relation de l'être humain avec l'environnement* ⁽²¹⁾. »

Comme pour le diagnostic des destructions envisagé plus haut, il n'est certes pas besoin d'avoir accès aux huma-

(15) « Il devient indispensable, au moment de déterminer l'impact d'une initiative concrète sur l'environnement, de donner aux chercheurs un rôle prépondérant et de faciliter leur interaction, dans une grande liberté académique » (LS n°140). Voir également LS n°182-188 : « Dialogue et transparence dans les processus de décision ».

(16) LS n°48. « Parmi les composantes sociales du changement global figurent les effets de certaines innovations technologiques sur le travail, l'exclusion sociale, l'inégalité dans la disponibilité et la consommation d'énergie et d'autres services, la fragmentation sociale, l'augmentation de la violence et l'émergence de nouvelles formes d'agressivité sociale, le narcotrafic et la consommation croissante de drogues chez les plus jeunes, la perte d'identité » (LS n°46). (17) Voir BOURG (Dominique) et FRAGNIERE (Augustin), op. cit., pp. 4-5.

(18) Voir LS n°15. « En même temps, devient actuelle la nécessité impérieuse de l'humanisme qui, en soi, fait appel aux différents savoirs, y compris à la science économique, pour un regard plus intégral et plus intégrant. Aujourd'hui, l'analyse des problèmes environnementaux est inséparable de l'analyse des contextes humains, familiaux, de travail, urbains, et de la relation de chaque personne avec elle-même qui génère une façon déterminée d'entrer en rapport avec les autres et avec l'environnement. Il y a une interaction entre les écosystèmes et entre les divers mondes de référence sociale, et ainsi, une fois de plus, il s'avère que "le tout est supérieur à la partie" » (LS n°141).

(19) LS n°139. « Nous ne pouvons pas nous empêcher de reconnaître qu'une vraie approche écologique se transforme toujours en une approche sociale, qui doit intégrer la justice dans les discussions sur l'environnement, pour écouter tant la clameur de la terre que la clameur des pauvres » (LS n°49). « Toute approche écologique doit incorporer une perspective sociale qui prenne en compte les droits fondamentaux des plus défavorisés » (LS n°93).

(20) LS n°144. Benoît XVI avait déjà souligné les racines sociales et culturelles de la dégradation de la Terre, comme le pape François le rappelle en LS n°6. « Une sorte d'écologie de l'homme, comprise de manière juste, est nécessaire. La dégradation de l'environnement est en effet étroitement liée à la culture qui façonne la communauté humaine : quand l'« écologie humaine » est respectée dans la société, l'écologie proprement dite en tire aussi avantage. De même que les vertus humaines sont connexes, si bien que l'affaiblissement de l'une met en danger les autres, ainsi le système écologique s'appuie sur le respect d'un projet qui concerne aussi bien la saine coexistence dans la société que le bon rapport avec la nature » (BENOÎT XVI, Caritas in veritate, 2009, n°51).

(21) Voir LS n°143.

nalités environnementales pour avoir conscience de l'interdépendance entre toutes les créatures. Certains hommes, souvent en raison de leur vie mystique, ont adopté l'écologie intégrale bien avant de disposer des instruments de vérification actuels, comme ce fut le cas de François d'Assise ⁽²²⁾. Toutefois, les sciences environnementales apportent une assise rationnelle à une vision d'ensemble qui considère que, dans le monde, tout est intimement lié. Au passage, elles fournissent également des arguments pour nous aider à surmonter la tendance des savoirs, déjà repérée par Benoît XVI ⁽²³⁾, à s'isoler et à s'absolutiser dans la spécialisation ⁽²⁴⁾. Des connaissances fragmentaires et solitaires peuvent même « devenir une forme d'ignorance, si elles refusent de s'intégrer dans une plus ample vision de la réalité ⁽²⁵⁾ ».

L'interprétation fournie par la pensée écologique : se libérer de l'emprise du paradigme technoscientifique

Dernier point, capital, de notre courte étude : il nous reste à montrer comment *Laudato Si'* reprend à son compte les lignes principales de la « pensée écologique ». Élaborée par les sciences environnementales, celle-ci invite en réalité à rien de moins qu'à concevoir et à faire ressentir une autre manière, pour l'homme, d'être en relation avec la Terre. Pour percevoir l'ampleur de la « révolution culturelle ⁽²⁶⁾ » dont il est question, citons d'abord une définition de la pensée écologique.

« *La pensée écologique consiste en une interprétation à nouveaux frais de la place de l'humanité au sein de la nature en termes de limites de la biosphère, de finitude de l'homme et de solidarités avec l'ensemble du vivant. Une telle interprétation s'est construite à la faveur d'une critique plutôt radicale de la modernité occidentale. Elle se décline au travers d'une double affirmation : premièrement, la croissance matérielle comme la démographie connaissent nécessairement des limites et nos techniques ne sauraient répondre à toutes les difficultés qu'elles rencontrent ou provoquent ; deuxièmement, l'anthropocentrisme mérite d'être critiqué, car on ne peut comprendre l'humanité en dehors de son appartenance à la nature ⁽²⁷⁾.* »

Que l'encyclique *Laudato Si'* tente de renouveler radicalement les catégories retenues depuis Descartes pour concevoir le rapport entre l'homme et la nature, cela ne fait aucun doute ⁽²⁸⁾, spécialement à la lecture du chapitre III : « La racine humaine de la crise écologique ». Ce renouvellement visant le cœur du dérèglement actuel concerne plus particulièrement la manière dont la civilisation occidentale a progressivement conçu son rapport à la technique. D'une part, si l'essor prodigieux des techniques confère à ceux qui en disposent un pouvoir sans précédent sur l'ensemble de l'humanité comme sur la biosphère, les sociétés doivent se doter d'une éducation et d'une culture qui soient à la hauteur des risques.

« *Le fait est que "l'homme moderne n'a pas reçu l'éducation nécessaire pour faire un bon usage de son pouvoir", parce que l'immense progrès technologique n'a pas été accompagné d'un développement de l'être humain en*

responsabilité, en valeurs, en conscience. [...] En ce sens, l'homme est nu, il est exposé à son propre pouvoir toujours grandissant, sans avoir les éléments pour le contrôler ⁽²⁹⁾. »

D'autre part, et beaucoup plus profondément, il est nécessaire que l'humanité se libère de l'emprise d'un mode de pensée tout-puissant que François appelle le « paradigme technocratique », c'est-à-dire « la tendance, pas toujours consciente, à faire de la méthodologie et des objectifs de la technoscience ⁽³⁰⁾ » le modèle d'interprétation de toute l'existence individuelle et sociale ⁽³¹⁾. Les conséquences de cette « colonisation » des esprits sont incalculables.

Plus ce paradigme s'est étendu, et plus s'est imposée l'idée d'une croissance infinie ou illimitée. « Cela suppose le mensonge de la disponibilité infinie des biens de la planète, qui conduit à la « presser » jusqu'aux limites, et même au-delà des limites ⁽³²⁾. » Par ailleurs, appliqué à l'économie et au politique, ce même paradigme entretient l'illusion que « l'économie actuelle et la technologie résoudreont les problèmes environnementaux ⁽³³⁾ ». Enfin, la spécialisation de la technologie elle-même a rendu de plus

(22) Parmi les trois raisons qui ont poussé le pape François à choisir le Poverello d'Assise comme modèle de conversion écologique, la première tient justement à ce que celui-ci tenait pour inséparables « la préoccupation pour la nature, la justice envers les pauvres, l'engagement pour la société et la paix intérieure » (LS n°10).

(23) Voir Caritas in veritate, n°31.

(24) Voir LS n°201.

(25) LS n°138. Voir également LS n°110 : « La fragmentation des savoirs [...] empêche de trouver des chemins adéquats pour résoudre les problèmes les plus complexes du monde actuel, surtout ceux de l'environnement et des pauvres, qui ne peuvent pas être abordés d'un seul regard ou selon un seul type d'intérêt » (C'est nous qui soulignons).

(26) Le terme même est assumé par le pape François (LS n°114).

(27) BOURG (Dominique) et FRAGNIERE (Augustin), op. cit., p. 4 (c'est nous qui soulignons).

(28) Dès l'introduction, le pape affirme que l'écologie intégrale requiert « une ouverture à des catégories qui transcendent le langage des mathématiques ou de la biologie, et nous orientent vers l'essence de l'humain » (LS n°11). Il propose de trouver ces catégories du rapport entre l'homme et la nature dans le monde des relations familiales : « frère », « sœur », « mère » (voir notre article : « Spécificité et originalité de *Laudato Si'* », *Revue théologique des Bernardins*, janvier-avril 2016, spécialement les pages 51 à 53).

(29) LS n°105. Voir aussi les réflexions sur la recherche biologique et la biotechnologie (LS n°130-136).

(30) LS n°107.

(31) Le pape François reconnaît que l'éducation environnementale tend aujourd'hui à inclure « une critique des "mythes" de la modernité (individualisme, progrès indéfini, concurrence, consumérisme, marché sans règles) fondés sur la raison instrumentale ; elle tend également à s'étendre aux différents niveaux de l'équilibre écologique : au niveau interne avec soi-même, au niveau solidaire avec les autres, au niveau naturel avec tous les êtres vivants, au niveau spirituel avec Dieu » (LS n°210).

(32) LS n°106. Voir également LS n°78 : « Si nous reconnaissons la valeur et la fragilité de la nature, et en même temps les capacités que le Créateur nous a octroyées, cela nous permet d'en finir avec le mythe moderne du progrès matériel sans limite. Un monde fragile, avec un être humain à qui Dieu en confie le soin, interpelle notre intelligence pour reconnaître comment nous devrions orienter, cultiver et limiter notre pouvoir » (C'est nous qui soulignons). Sur la nécessité de repenser simultanément croissance et décroissance ainsi que le progrès, voir spécialement les n°191-194.

(33) Voir LS n°109.

en plus difficilement perceptible « le sens de la totalité » et celui « des relations qui existent entre les choses ⁽³⁴⁾ ».

Conformément au mouvement de la pensée écologique, *Laudato Si'* aperçoit donc dans les dégradations socio-environnementales les symptômes d'une crise éthique, culturelle et spirituelle – celle de l'anthropocentrisme moderne qui, dans sa démesure, « a fini par mettre la raison technique au-dessus de la réalité ⁽³⁵⁾ ».

Naturellement, le pape François n'ignore pas que certains courants de la théologie chrétienne médiévale ont pu, au nom d'une vision erronée de leur propre tradition éthique et spirituelle, justifier cet anthropocentrisme, et par là même le mauvais traitement infligé à la Terre ⁽³⁶⁾. Le retour à une interprétation ajustée des sources bibliques à ce sujet ⁽³⁷⁾, aujourd'hui largement achevé, permet de considérer le rôle de l'homme au sein de la nature comme celui d'un intendant responsable ⁽³⁸⁾. Il apporte aussi une raison supplémentaire de rouvrir le dialogue entre les sciences et les religions.

Conclusion

La nécessité d'un dialogue entre les sciences environnementales et la réflexion éthique, à la fois philosophique et religieuse, ne s'exprime peut-être nulle part avec plus d'acuité que dans la perspective d'une révolution culturelle sans précédent qui reste à faire. On apprécierait bien mal l'enjeu du défi écologique si l'on omettait de percevoir l'emprise du paradigme technoscientifique sur les esprits et la nécessité de s'en délivrer. Comment serait-il possible d'éveiller les motivations requises sans une nouvelle alliance entre sciences, éthique et convictions de foi ?

Si les scientifiques ont alerté l'humanité grâce aux modèles de prévision que leur rationalité permet de formuler, cette dernière ne saurait diagnostiquer la racine morale et spirituelle de la crise, ni déterminer les solutions qui relèvent du dialogue entre les hommes sur la société qu'ils veulent édifier et laisser aux générations futures. De son côté, la responsabilité de sa réflexion éthique, et par là même de ses fondements religieux, engage bien le Souverain Pontife à repérer dans le cœur des hommes les origines du mal, puis à convaincre l'humanité d'habiter autrement la Terre. Toutefois, ce travail de conversion ne peut éluder la nécessité de mesurer le plus exactement possible les préjudices causés à la Terre, au fur et à mesure des progrès des sciences « exactes » permettant de le faire, ni celle d'explorer davantage cette interdépendance entre toutes choses que l'écologie intégrale met peu à peu en lumière. Si la conversion écologique tente d'arracher le monde à la tragédie de l'orgueil, les théologiens et les philosophes, comme les scientifiques, joueraient un bien mauvais jeu s'ils restaient enfermés dans leur tour d'ivoire épistémologique !

(34) Voir LS n°110.

(35) Voir LS n°115.

(36) Voir, par exemple, LS n°200. Sur la manière dont *Laudato Si'* examine la responsabilité des chrétiens dans le tournant anthropocentrique moderne, voir l'analyse fouillée de Fabien REVOL : « Les chrétiens sont-ils responsables de la crise écologique ? », *Revue théologique des Bernardins*, n°16, janvier-avril 2016, pp. 75-90.

(37) Voir « La sagesse des récits bibliques », LS n°65-75.

(38) Voir LS n°115.

Prix bas du pétrole et crise financière internationale : un couple à hauts risques

Par Dominique DRON

Ingénieure générale des Mines

et Didier PILLET

Ingénieur en chef des Mines, tous deux en fonction au Conseil général de l'économie ⁽¹⁾

Le contexte 2016 de l'économie mondiale, dans ses composantes énergétiques et financières, est souvent qualifié d'exceptionnel, avec des taux de l'argent très bas voire négatifs, une création monétaire surabondante depuis 2008 (appelée « *quantitative easing* » ou QE) par plusieurs banques centrales (américaine, européenne, japonaise), l'effondrement des prix du pétrole au tiers de leur valeur en un an et demi, des dettes publiques gonflées par le sauvetage du système bancaire et ses conséquences déflationnistes, une morosité économique mondiale parfois renommée « stagnation séculaire » et l'Accord de Paris, qui reconnaît la nécessité d'une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre entérinée en 2015 par la COP 21. Si les conséquences de ces différentes caractéristiques sont souvent bien connues par chacun des secteurs de l'économie, leur conjonction inédite ouvre des perspectives nouvelles.

Une production pétrolière américaine stimulée par les politiques d'assouplissement monétaire (QE)

En 2014-2015, la chute du prix du baril a été colossale au regard de la différence offre-demande qui l'a suscitée : une division par 3 entre octobre 2014 (~100\$/baril (bbl)) et février 2016 (30\$/bbl), pour un excès de 2 millions de barils par jour (Mb/j) selon l'OPEP (dépêche AFP du 16 février 2016) sur une production quotidienne s'étant établie fin 2015 à 96 Mb/j tous liquides confondus (agrégation des pétroles bruts « *crude* », des condensats, des liquides de gaz naturel, des gains de raffineries et des biofuels) ⁽²⁾.

À l'origine de la surproduction de pétrole actuelle, on trouve la baisse de la demande liée aux difficultés économiques, mais aussi la production domestique américaine, dont la seule composante pétrole de schiste a connu une progression de 4 Mb/j en quatre ans, la production américaine de pétrole « *Crude + Condensats* » passant de 5,5 Mb/j en 2011 à 9,5 Mb/j en 2015 – une production largement stimulée par les niveaux élevés atteints par les prix du baril, qui se sont maintenus à des niveaux de l'ordre de 100\$ le baril de *West Texas Intermediate* (WTI) entre 2011 et 2014, un niveau de prix en grande partie imputable à l'accroissement de la demande des pays asiatiques, au premier rang desquels la Chine et l'Inde.

Cette intense activité autour des pétroles de schiste a été également alimentée par trois phases de création monétaire américaine (*quantitative easing* – QE) en réponse à la crise des *subprimes* de 2008, par des taux de l'argent historiquement bas et par un cadre fiscal très favorable aux forages ⁽³⁾ – sans pour autant rendre les États-Unis indépendants ⁽⁴⁾ ⁽⁵⁾ des approvisionnements étrangers.

Avec l'afflux des pétroles de schiste, ces deux facteurs ont par ailleurs poussé les financements privés à se tourner vers le stockage de pétrole (rendement financier estimé à 10 % nets sans risque ⁽⁶⁾). Les stocks américains de pétrole brut ⁽⁷⁾ ont ainsi atteint un niveau jamais égalé depuis quatre-vingts ans, avec 534 Mbbl au 25 mars

(1) Les auteurs de cet article s'expriment ici à titre personnel.

(2) L'énergie totale disponible exprimée en Mbep (milliards de baril équivalent pétrole) donnerait des valeurs inférieures à celles indiquées, car un certain nombre de ces produits sont moins denses en énergie (les biofuels, par exemple).

(3) http://www.international-economy.com/TIE_Sp15_Verleger.pdf

(4) <http://www.agefi.fr/asset-management/actualites/hebdo/20151210/etats-unis-revolution-petrole-schiste-est-en-147794>

(5) Ils importent 30% de leur consommation – PII Briefing 16-3, chapter 3 "Lower prices are good for the United States", BLANCHARD (O.) & ALCALIN (J.).

(6) http://www.international-economy.com/TIE_Sp15_Verleger.pdf

(7) http://www.upi.com/Business_News/Energy-Industry/2016/01/05/US-oil-storage-at-record-high/9211451991945/

2016⁽⁸⁾ ⁽⁹⁾ et de nouveaux stockages en construction au Texas, pour un objectif global de 551 Mbbl⁽¹⁰⁾.

La vigueur de la production américaine de pétrole de schiste a surpris nombre d'analystes qui s'attendaient, en toute logique, à une baisse de la production américaine⁽¹¹⁾ en conséquence de l'effondrement des prix amorcé dès octobre 2014.

Les raisons avancées pour expliquer cette résilience sont multiples : une concentration des opérateurs sur les zones les plus productives (*sweet spots*), la poursuite de l'amélioration des techniques conduisant à de plus grandes productivités par puits, la baisse des prix des services parapétroliers, la couverture des pétroles produits (*hedging*) à des niveaux de prix compatibles avec les seuils de rentabilité (*break-even*), la poursuite de la production de puits actifs à coût marginal très faible... La baisse de la production américaine n'est donc intervenue qu'à partir de juillet 2015 (avec un pic à 9,6 Mb/j)⁽¹²⁾, avec un début d'écroulement des PME du secteur des hydrocarbures de schiste (au moins 52 faillites rapportées depuis début 2015⁽¹³⁾). Depuis cette date, le secteur s'est aussi fortement concentré, les majors rachetant à bas prix les matériels des PME ayant fait faillite.

Cependant, le risque d'un développement de l'activité sismique induit par les champs de fracturation hydraulique se précise et se renforce (dépêche AFP du 28 mars 2016, USCS (Unified Soil Classification System)). Outre l'engagement pris en 2015 par le gouvernement américain de mieux encadrer les conditions environnementales de production, les suites judiciaires de ces études vont sans doute renchérir la production du gaz (voir *infra* « Bas prix du pétrole et coûts de développement : un ciseau physico-économique plus rapide qu'il n'y paraît ? », pour les conditions géologiques des gisements nouveaux).

Les prix bas du pétrole et du gaz ont déclassé le charbon

Surproduction gazière américaine et chute des prix du charbon

La forte production de gaz de schiste avait fait chuter les prix du gaz américain. Le charbon était de ce fait devenu moins compétitif. Il n'est pas étonnant qu'avant la COP 21, de nombreux investisseurs aient annoncé leur sortie totale ou partielle de certains pans de l'activité charbonnière⁽¹⁴⁾. *Peabody Energy Corp* a dû se déclarer en faillite mi-avril 2016. 44 % de la production de charbon américaine proviennent dès lors de sociétés en faillite⁽¹⁵⁾. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la part du charbon dans la production mondiale d'électricité devrait passer de 41 % en 2013 à 37 % en 2020 du fait du ralentissement de la consommation de la Chine et de la substitution au charbon d'autres énergies, notamment du gaz, dans une majorité de pays (de l'OCDE ou non). Toujours selon l'AIE, il devrait encore représenter 30 % de l'électricité mondiale produite en 2040. Cependant, l'objectif de 2°C de réchauffement en 2100 (avec 50 % de chances qu'il soit atteint) ne représente que 20 ans d'émissions au rythme actuel (sans compter les dégazages carbonés du

permafrost, ni les conséquences des incendies de forêts et de tourbières russes, canadiens et indonésiens), ce qui raccourcit beaucoup l'horizon de rentabilité des investissements éventuels.

Avec la transformation prévisible du phénomène El Niño, très intense en 2015-2016, en une La Niña également marquée, certains anticipent l'arrivée d'un été chaud et sec aux États-Unis : une augmentation de la consommation électrique (et donc gazière) en 2016 du fait d'un usage accru de la climatisation est alors vraisemblable⁽¹⁶⁾, surtout si, par référence aux années 2006-2008, on y ajoute de probables spéculations indicielles⁽¹⁷⁾. Le marché américain du gaz pourrait donc regagner en attractivité aux yeux des producteurs.

Conséquences économiques et financières des bas prix du pétrole

Bas prix du pétrole et géopolitique des approvisionnements

La baisse des prix du baril constatée depuis octobre 2014 a réduit le rôle de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) sur le marché pétrolier et mis en difficulté plus ou moins prononcée les pays producteurs : Moyen-Orient, Russie, pays pétroliers de la rive sud de la Méditerranée (Libye, Algérie), Amérique latine (Venezuela, Mexique). Une des conséquences importantes est en effet la forte diminution des excédents dégagés par les pays exportateurs de pétrole. On notera ainsi que les pays du

(8) <http://marketrealist.com/2016/02/us-crude-oil-storage-utilization-reached-60-capacity/> ; <http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/the-u-s-is-a-big-oil-importer-again>
Le record de stockage fut de 545 Mb/j en 1929, juste avant la grande dépression.

(9) *Business Index UK* 02.03.16 : 518 Mb stockés aux États-Unis (AIE), production de pétrole de schiste en baisse de 25 kb/jour la semaine du 15 mars 2016, 33,7 \$ le baril WTI ; consommation américaine 7 Gbl/an de produits pétroliers, soit 19 Mb/jour. Bloomberg.

(10) <http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/the-u-s-is-a-big-oil-importer-again>

(11) http://www.lemonde.fr/economie/article/2015/04/14/la-production-de-petrole-de-schiste-va-baisser-aux-etats-unis_4615746_3234.html

Cela rappelle la situation de 2007-2008 rapportée dans « The big short », quand les cours des subprimes restèrent élevés durant des mois malgré l'accroissement rapide des défauts de paiement (complicité des agences de notation et des acteurs institutionnels, le temps de les revendre).

(12) http://www.xerficanal-economie.com/emission/Marie-Claire-Aoun-Le-monde-face-au-trop-plein-de-petrole_3190.html

(13) <http://www.lenouveleconomiste.fr/financial-times/la-baisse-des-prix-du-petrole-fait-flamber-les-dettes-30256/>

(14) Dépêche AFP du 1^{er} décembre 2015 : « 500 investisseurs sortent partiellement du charbon ».

(15) Opponents eye potential massive bankruptcy of nation's largest coal miner, KUYKENDALL (T.), 3 mars 2016. Selon les analystes, seuls un rebond de la demande métallurgique en Chine ou une baisse de la production de gaz nord-américaine pourraient redresser la situation. AFP, dépêche du 13 avril 2016.

(16) Bloomberg, cité dans : A Natural Gas Trade, by RYLE (Briton), Wednesday, March 9, 2016.

(17) MASTERS (Michael W.) & WHITE (Adam K.), "The accidental hunt brothers: How institutional investors are driving up food and energy prices", special report, 2008 (31 juillet).

Photo © Qian Yi-Xinhua/REA



Conférence de presse du ministre de l'énergie et de l'industrie du Qatar et président de l'OPEP, Mohammed bin Saleh al-Sada, avant la tenue d'une réunion de l'OPEP à Vienne (Autriche), juin 2016.

« La baisse des prix du baril constatée depuis octobre 2014 a réduit le rôle de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) sur le marché pétrolier et mis en difficulté plus ou moins prononcée les pays producteurs : Moyen-Orient, Russie, pays pétroliers de la rive sud de la Méditerranée (Libye, Algérie), Amérique latine (Venezuela, Mexique). »

Golfe consacrent chaque année 240 G\$ aux subventions énergétiques et qu'ils disposaient, fin 2014, de 1 200 G\$ de réserves ⁽¹⁸⁾, tombées à 500 G\$ en 2015, puis à 350 G\$ en 2016.

Les niveaux des prix du baril nécessaires pour équilibrer les budgets nationaux étaient en 2014 de 140 \$ pour l'Iran, de 90 \$ pour l'Arabie saoudite, de 77 \$ pour le Qatar et de 70 \$ pour les Émirats Arabes Unis (EAU). En 2016, le Qatar pourrait être en déficit ⁽¹⁹⁾ ; ce pays a donc décidé en avril de cette même année d'interrompre les subventions allouées aux énergies fossiles ⁽²⁰⁾. Le Qatar, comme la Norvège, utiliserait aujourd'hui ses fonds souverains pour financer de 20 à 40 % de ses dépenses courantes (source : MC Aoun, IFRI). En 2015, comme le déficit saoudien était de 98 G\$ ⁽²¹⁾, le prix nécessaire à l'équilibre budgétaire est monté à 106 \$/bbl, et le FMI prévoit l'assèchement des réserves saoudiennes en 5 ans, pour un prix se situant à 50 \$/bbl ⁽²²⁾. Dans l'ensemble, à 50 \$ le baril, les pays pétroliers du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord pourraient perdre 300 G\$ en 2016 ⁽²³⁾, après 360 G\$ en 2015 ⁽²⁴⁾ ; la résistance financière de l'Iran est estimée à 10 ans, tandis que les EAU, le Koweït et le Qatar disposeraient de plusieurs dizaines d'années de résilience ⁽²⁵⁾.

La capacité de ces États à conserver le contrôle politique de leur territoire et de leurs gisements est donc en question. La baisse des devises a par ailleurs poussé de nombreux pays à adopter des mesures d'austérité pouvant aboutir à des révoltes sociales dont les échéances pourraient coïncider avec, voire précéder, celles de la remontée des prix du pétrole causée de façon indépendante par un étranglement de la production.

Récession et prix bas du pétrole s'alimentent mutuellement

En général, des prix élevés de l'énergie sont liés à des pé-

(18) <http://www.lp.com/2014/11/12/low-oil-prices-affecting-the-middle-east/>

(19) <http://www.wsj.com/articles/qatar-risks-budget-deficit-in-2016-due-to-low-oil-prices-imf-says-1427983369>

(20) Voir la dépêche AFP du 24 avril 2016.

(21) <http://knowledge.wharton.upenn.edu/article/how-low-oil-prices-are-battering-the-mena-region/>

(22) <http://money.cnn.com/2015/10/25/investing/oil-prices-saudi-arabia-cash-pec-middle-east/index.html>

(23) Idem note 21.

(24) Idem note 22.

(25) Idem note 22.

riodes de récession : les exemples historiques abondent où le PIB et la consommation remontent lorsque l'énergie devient moins chère ⁽²⁶⁾. Effectivement, avec les prix bas du pétrole, les achats de véhicules thermiques puissants ont repris aux États-Unis au détriment des véhicules électriques ou des véhicules à basse consommation ⁽²⁷⁾. *A contrario*, les investissements de sobriété et de substitution énergétique sont retardés.

Mais, du fait de la financiarisation globalisée ⁽²⁸⁾, la plupart des économies sont impactées par les variations des flux financiers. Ainsi, en 2015, les fonds souverains ont retiré 46 G\$ des fonds de gestion et vendu 200 G\$ d'actifs ; une intensification de 25 % du phénomène est attendue pour 2016 ⁽²⁹⁾, le FMI estimant la perte des pays producteurs de pétrole à 1 000 G\$. C'est autant qui ne s'investit pas dans les achats d'actifs dans les pays industrialisés ou émergents (FDI). Si la nouvelle n'est pas forcément mauvaise en termes d'indépendance économique et technologique nationale, elle se traduit par une moindre croissance.

Facteur aggravant, les anticipations de déflation des investisseurs poussent ceux-ci à conserver leurs liquidités et à retarder leurs décisions d'investir, attendant que les prix d'acquisition baissent encore : c'est la « trappe à liquidités » ⁽³⁰⁾. Cette situation impacte notamment les cours des sociétés cotées, pas seulement dans le domaine énergétique (voir *infra* le point « La course entre les taux et le pétrole : vers la fin d'une bulle énergétique ? »). Il peut donc y avoir association entre une abondance de pétrole peu cher et une économie mondiale atone ⁽³¹⁾.

Les pays industrialisés, fortement ébranlés par le sauvetage des banques en 2008 et la récession consécutive, sont d'autant plus sensibles à ces reflux financiers qu'ils n'ont plus de ressources publiques pour les compenser, alors que les besoins en investissements lourds vont croissant ⁽³²⁾. Par ailleurs, le secteur financier, selon une inclination accentuée par les règles de Bâle, n'oriente qu'une faible partie des QE vers des investissements réels moins liquides que les produits financiers, et *a fortiori* vers des actifs nouveaux (transition écologique), sauf lorsqu'ils s'accompagnent d'une garantie de recettes, comme les prix d'achat des énergies renouvelables (ENR), les péages des autoroutes (avec garantie publique sur le trafic) et des parkings, les redevances pour services publics..., ou lorsqu'il peut titriser ou collatéraliser ces financements. En effet, les acteurs bancaires délestent de plus en plus leurs bilans des risques liés aux investissements, les transforment en titres négociables éventuellement structurés (comme dans le cas des *subprimes*), ou prêtent provisoirement leurs actifs à des acteurs moins encadrés qui peuvent à leur tour les utiliser pour effectuer leurs propres opérations : c'est ce que l'on appelle le *shadow-banking*, qui accroît l'effet de levier des opérations purement financières au détriment de l'attractivité de l'économie réelle.

C'est pourquoi la Banque centrale européenne (BCE), lorsqu'elle a réduit ses taux directeurs et intensifié sa création monétaire, a tenté par deux fois (en 2014 et en 2016) de conditionner celle-ci à des prêts effectifs des banques à l'économie (TLTRO). Ce conditionnement essaie aussi de

contrebalancer les politiques d'austérité budgétaire que les États s'imposent pour réduire leur dette post-2008 sous la pression des marchés. Cependant, cette création monétaire alimente la formation de bulles et favorise les concentrations financières opportunistes au détriment des investissements stratégiques des entreprises (voir *infra* le point « La course entre les taux et le pétrole : vers la fin d'une bulle énergétique ? »).

Bas prix du pétrole et coûts de développement : un ciseau physico-économique plus rapide qu'il n'y paraît ?

Depuis les débuts de l'exploitation du pétrole dans les années 1860, les technologies ont été sans cesse améliorées tant dans le domaine de l'exploration que dans celui de l'extraction. Et ce sont précisément ces avancées techniques continues qui ont permis de dégager des volumes croissants de pétrole, à des coûts relativement peu élevés.

Cependant, au début des années 2000 s'est installée une tendance nette au renchérissement des coûts de développement des pétroles marginaux (comme l'illustre la Figure 1 de la page suivante) avec l'évolution des *Capital Expenditures* (CapEx) et des productions des principales majors sur la période 2000-2012.

Deux interprétations de ce phénomène, pas forcément exclusives l'une de l'autre, se présentent : soit les compagnies ont profité des prix élevés du pétrole pour déclencher des projets à fort coût de développement, dans une optique de précaution et quel qu'ait été l'état de leurs réserves meilleur marché, soit la hausse de la demande a permis d'absorber les coûts des nouveaux gisements disponibles pour les majors, tous à coûts élevés (*offshore*...).

La demande fortement croissante dans les années 2002-2008 a porté le prix du baril vers ses plus hauts jusqu'en juillet 2008, où il atteignit 147 US\$, avant de retomber aux alentours de 40 \$ avec la crise économique de 2008-2009. À l'issue de cette crise, le prix du baril est progressivement remonté vers 100 \$ et est resté dans cette zone jusqu'en août 2014, période à laquelle il a, comme évoqué

(26) Jancovici, site...

(27) « L'année 2015 s'est conclue sur un record historique pour les voitures particulières neuves vendues aux États-Unis, avec 17,47 millions d'unités. Dans le même temps, les immatriculations de voitures électriques et hybrides rechargeables ont reculé, passant de 123 000 à 116 500, soit 0,66 % du marché du neuf. En revanche, les ventes de crossovers, SUV, pick-ups et autres 4x4 gourmands en carburant ont atteint des niveaux record » (dépêche AFP du 11 janvier 2016).

(28) Les produits dérivés circulants font 10 fois le PIB mondial ; les transactions quotidiennes dépassent 5 300 G\$ par jour, dont seulement 5 % représentant des biens réels (dont services et investissements) et 2 % des marchandises.

(29) Wansquare Focus, 23 février 2016.

(30) PIIE Briefing 16-3, chapitre 3 "Lower prices are good for the United States", BLANCHARD (O.) & ALCALIN (J.).

(31) Dépêche AFP du 19 janvier 2016, FMI.

(32) Voir, par exemple, le Livre blanc pour le financement de la transition écologique, 2013, ou les investissements envisagés pour le parc nucléaire français.

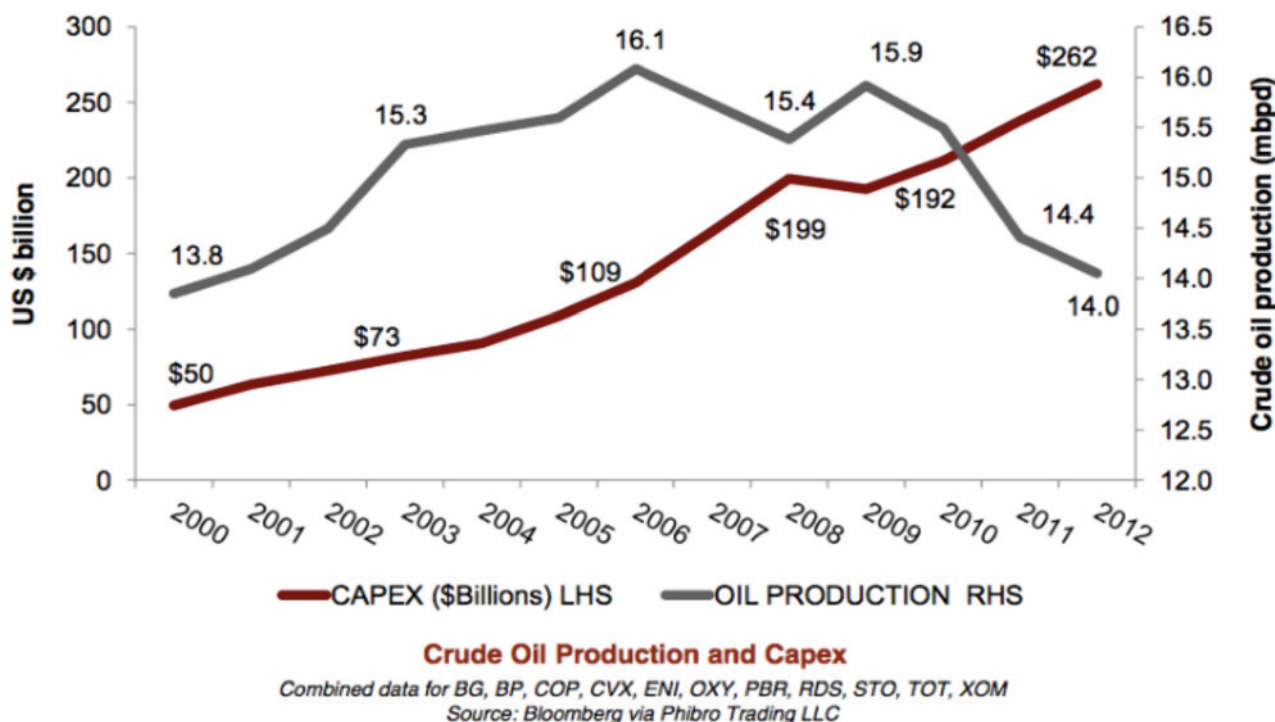


Figure 1 : Évolution CAPEX-Production de pétrole crude pour les principales majors sur la période 2000-2012.

plus haut, entamé une chute l’amenant vers les 30 \$ en février 2016. Le cours du baril s’est ensuite repris, évoluant ces dernières semaines autour de 45-50 \$. Ces différentes séquences sont illustrées par la Figure 2 ci-dessous), où le prix du baril de Brent est mis en relation avec les productions de pétrole « tous liquides ».

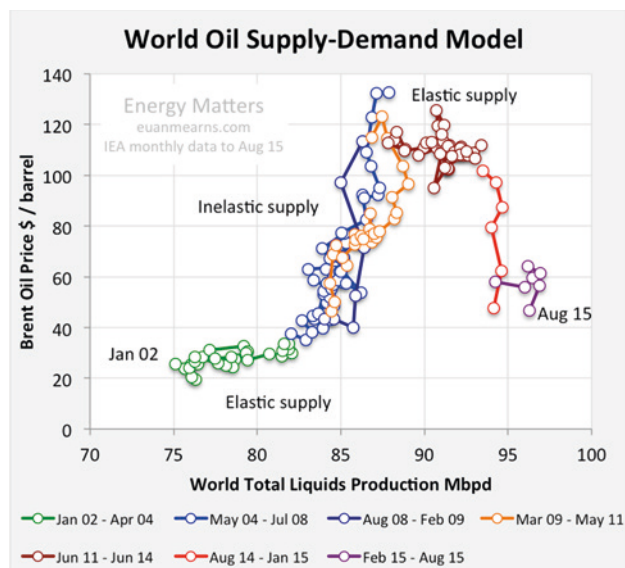


Figure 2 : Évolution du prix du baril de Brent en fonction des volumes produits de pétrole « tous liquides ».
 Source : Euan Mearns – Energy Matters, à partir de données IEA.

Sur cette figure, on distingue d’abord la séquence janvier 2002-avril 2004 qui se caractérise par une relative élasticité de l’offre au regard de la demande, avec des prix n’aug-

mentant que très peu avec l’offre. À l’inverse, la séquence suivante, mai 2004-juillet 2008, fait apparaître une forte inélasticité traduisant l’incapacité de l’offre à répondre à la demande, d’où une forte augmentation du prix du baril sur cette période. Les séries associées aux séquences ultérieures (août 2008-février 2009 et mars 2009-mai 2011) confortent le caractère inélastique de la réponse de l’offre aux prix du baril dans la plage de production 85-88 Mb/j.

Il est intéressant de rapprocher la forme « en croche de hockey » obtenue entre janvier 2002 et mai 2011 du profil des coûts de production des différents pétroles recensés juste avant l’émergence des pétroles de schiste américains (voir la Figure 3 de la page suivante). Cette similitude a pu suggérer que les capacités de production des pétroles tous liquides avaient atteint leurs limites – jusqu’à l’entrée en scène des pétroles de schiste, sans lesquels l’annonce en 2010⁽³³⁾ par l’AIE de l’atteinte du pic de production dès 2006 des pétroles conventionnels (de type *crude*) se serait traduite par des difficultés concrètes d’approvisionnement⁽³⁴⁾.

(33) WEO 2010 de l’AIE, p. 48 : “Crude oil output reaches an undulating plateau of around 68-69 mb/d by 2020, but never regains its all-time peak of 70 mb/d reached in 2006”.

(34) Cette annonce de l’AIE sur les pétroles conventionnels est à rapprocher de la prévision avancée par Colin Campbell et Jean Laherrère dans leur article The end of cheap oil (Scientific American, mars 1998), où ils estimaient très probable la survenue d’un pic de production des pétroles conventionnels durant la première décennie du XXI^e siècle. En 2000, l’Association for the Study of Peak Oil and gas (ASPO) a été créée par Colin Campbell pour traiter de cette problématique et partager plus largement les données relatives aux réserves pétrolières mondiales.

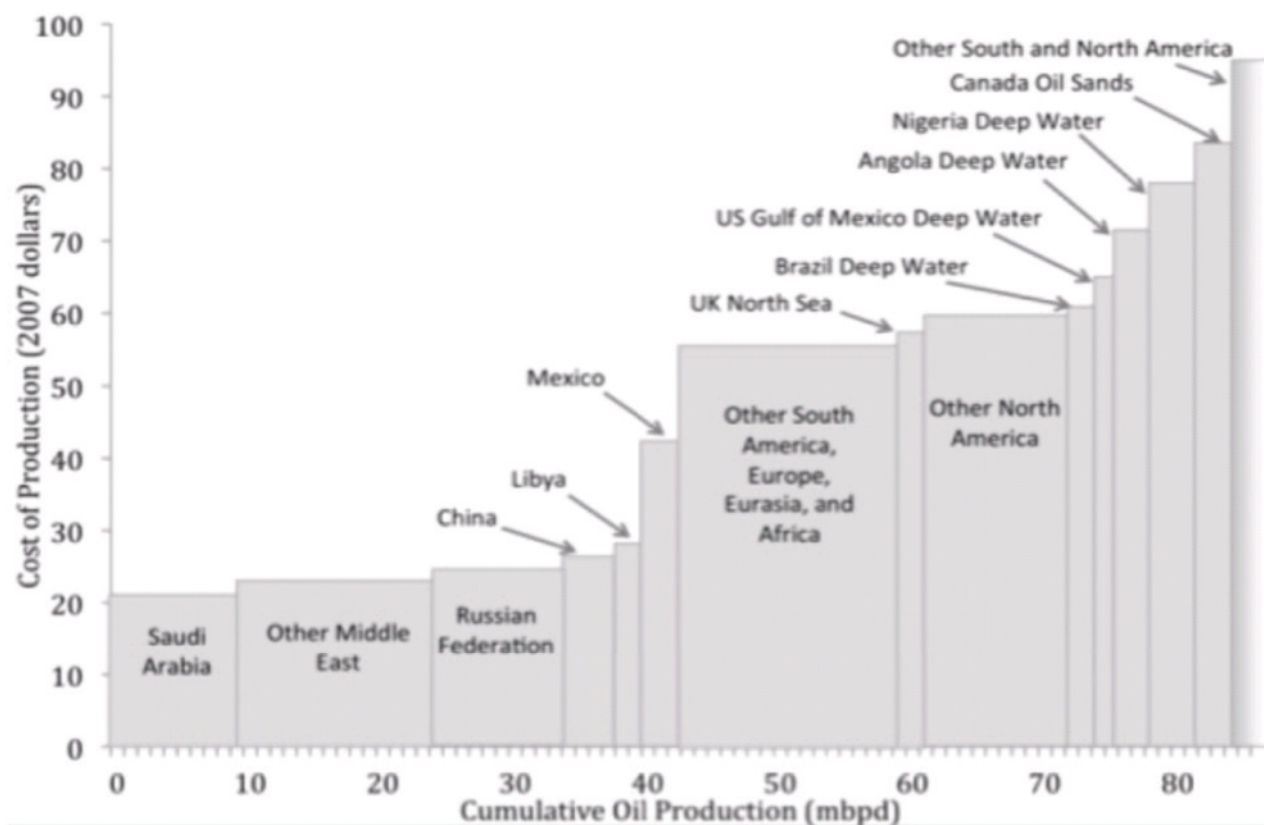


Figure 3 : Évolution des coûts de production du pétrole en fonction des volumes cumulés.
Source : Bloomberg, via Phibro Trading LLC.

De fait, les volumes de pétroles de schiste, notamment ceux produits à partir de 2011, ont plus que compensé le déclin des pétroles conventionnels amorcé en 2006, le déblocage de ces ressources apparaissant clairement sur la Figure 2 de la page précédente (séquence juin 2011-juin 2014).

À partir d'août 2014 (séquence août-janvier 2015, voir la Figure 2), les prix du baril ont connu une forte chute, dont l'interprétation, selon nombre d'experts, fait intervenir la conjugaison de la surproduction de pétrole avec le ralentissement de la croissance économique actuellement observé en Chine. Cette chute tendancielle des prix s'est poursuivie jusqu'en février 2016, où le prix du baril a atteint un point bas, à environ 30 \$, pour remonter ensuite vers les 45-50 \$ (leur niveau actuel), et ce malgré l'anticipation du retour des productions de l'Iran. À cela s'ajoute la volonté de l'Arabie Saoudite de conserver ses parts de marché, son brut restant l'un des moins chers à produire ⁽³⁵⁾.

Or, les prix élevés du baril entre 2011 et 2014 avaient déclenché des investissements importants d'exploration-production, notamment en Mer du Nord et dans le golfe du Mexique. En lien avec de grands projets *off-shore* très capitalistiques ne pouvant être stoppés sans provoquer des pertes importantes pour les opérateurs pétroliers, ces investissements ont ainsi permis de compenser partiellement le déclin des pétroles de schiste aux États-Unis et d'enrayer celui de la production de pétrole en Mer du Nord. Mais, de 685 G\$ en 2014, les investissements d'exploration-production d'huile et de gaz sont passés à

environ 540 G\$ en 2015 (soit 21 % de baisse) et de 20 à 25 % pourraient encore disparaître en 2016 ⁽³⁶⁾.

Cette situation n'est pas sans conséquence sur les productions de pétrole à venir dans les 4 à 5 ans. En effet, ces niveaux de prix effacent l'intérêt de toute exploration-production dans les zones qui portaient les 4/5 du renouvellement de l'offre depuis 15 ans (85 % des découvertes en pétrole et gaz et 30 % de la production de pétrole sont de l'*offshore* ⁽³⁷⁾). Or, selon la société Total ⁽³⁸⁾, en l'absence d'investissements, la production pétrolière se réduirait tous les ans de 4 Mb/j. Par ailleurs, si l'on souhaite assurer une montée de la production de 1 Mb/j par an d'ici à 2020, cela supposerait donc d'amener sur le marché environ 5 Mb/j nouveaux annuels, soit 25 Mb/j d'ici à 2020.

Ainsi, le niveau actuel des investissements conduirait à un déficit de l'offre sur la demande de l'ordre de 4 à 5 Mb/j à horizon 2020. Une inadéquation offre-demande sur le pé-

(35) Il est plus facile à Ryad de demander à l'Aramco de réduire sa production qu'à Washington d'exiger la même chose de plusieurs dizaines d'entreprises privées : le royaume saoudien reste le « swing producer » mondial, même si les États-Unis peuvent jouer un rôle similaire un certain temps (jusqu'à l'épuisement de leurs stocks) (518 Mb au 2 mars 2016).

(36) Conférence « Que reste-t-il de l'OPEP ? » organisée par le Centre de géopolitique de l'énergie et des matières premières (CGEMP) – Université Paris-Dauphine, 8 mars 2016.

(37) IFPEN, Panorama 2016.

(38) Audition de Patrick Pouyanné devant la Commission économique du Sénat, le 18 mai 2016.

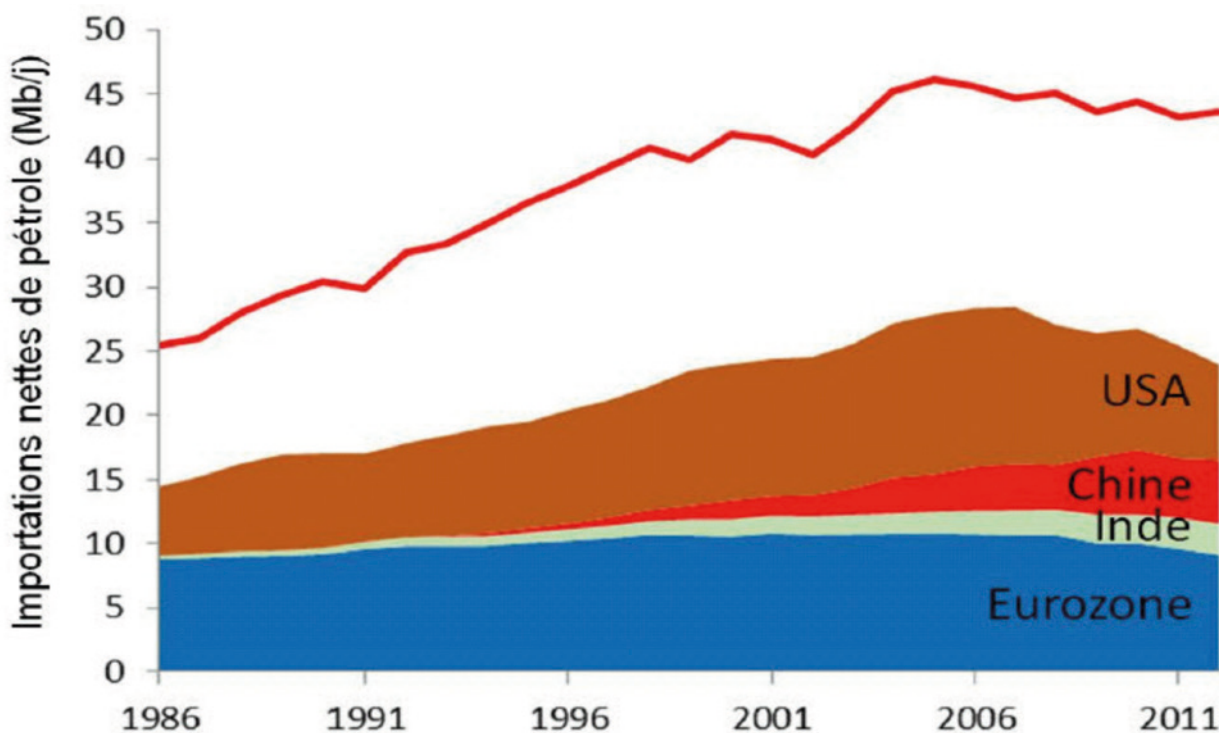


Figure 4 : Évolution des importations mondiales nettes de pétrole « tous liquides ».

Source : Patrick Brocogens ASPO Belgique, « Rapport d'enquête publique du Parlement wallon sur les liens entre l'économie et les pics pétroliers ».

trole, mais en sens inverse de l'actuelle, est ainsi attendue d'ici 4 à 5 ans ⁽³⁹⁾.

Sur le plan économique, une baisse du prix du baril de pétrole se traduit généralement par une reprise des activités. L'ampleur de cette reprise n'est cependant pas à la hauteur des attentes, les perspectives de faible croissance mondiale confortant par ailleurs un maintien des bas prix du baril.

Toutefois, à supposer que l'économie mondiale reparte franchement, son approvisionnement en pétrole se ferait au mieux à coût élevé ⁽⁴⁰⁾, du fait notamment des coûts de production élevés des pétroles non conventionnels. Cela renverrait donc assez rapidement les prix du pétrole vers les sommets, compte tenu de l'inélasticité production-prix mentionnée plus haut.

Cette évolution des prix à la hausse serait amplifiée par le fait que la baisse de 10 % de la part des pays de l'OCDE, en crise depuis 2008, sur les volumes « net export » disponibles sur le marché international a été compensée depuis par les pays émergents, au premier rang desquels la Chine et l'Inde. Sur la Figure 4 ci-dessus, on note en particulier le repli des importations américaines, qui est à mettre en relation avec l'augmentation de leur production domestique de pétrole de type *crude* (pétroles de schiste). Il ne fait pas de doute que la récente diminution de cette production ⁽⁴¹⁾, ainsi que la reprise de la consommation de carburants liquides stimulée par la baisse importante du prix du baril, provoqueront à terme une augmentation de la demande américaine sur le marché international –

même si, en parallèle, les producteurs américains agissent afin de pouvoir exporter leur pétrole en levant l'interdiction fédérale, notamment pour ne pas être piégés par une éventuelle saturation des capacités de stockage ⁽⁴²⁾.

Ce regain de la demande nette des États-Unis sur le marché mondial pourra cependant être modéré par l'utilisation des importants stocks de pétrole brut accumulés ces dernières années, et retarder d'autant le renchérissement du baril. En tout état de cause, des tensions sur le marché international du pétrole apparaissent plus que probables d'ici à la fin de la présente décennie.

Parmi les autres facteurs susceptibles de conduire à un renchérissement du baril, on peut citer le secteur parapétrolier, essentiel pour l'autonomie dans l'accès aux gisements, qui a été particulièrement mis à mal par la chute des prix, et la reconstitution des équipements et des compétences humaines laquelle prendra un temps sans doute plus important que celui de la remontée des cours.

(39) http://www.xerficanal-economie.com/emission/Marie-Claire-Aoun-Le-monde-face-au-trop-plein-de-petrole_3190.html ; <http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/the-u-s-is-a-big-oil-importer-again>

(40) Tous les pétroles dont le coût de production est inférieur à 75 \$/baril seraient en déclin, selon certains experts.

(41) Une diminution de l'ordre de 600 kb/j (pétroles « crude » + condensats + liquides de gaz) depuis le pic d'avril 2015 à 13,24 Mb/j, selon les données de l'administration américaine (IEA).

(42) <http://www.forbes.com/sites/christopherhelman/2015/04/01/busting-the-myth-of-oil-storage-hitting-tank-tops/#654661167237>

Une remontée significative du prix du baril serait-elle susceptible de relancer la production de pétrole de schiste américaine, de sorte à retrouver, voire à dépasser, le pic de production de 2015 ? Rien n'est moins sûr, et on peut citer plusieurs raisons à cela :

- les zones les plus productives (*sweet spots*) ont été largement exploitées et une reprise de l'activité suppose de se tourner dorénavant vers les zones les moins favorables, ce qui imposera une activité de forage plus intense que dans la phase précédente, et donc des coûts de production plus élevés par baril produit. En outre, les conditions environnementales de production se sont durcies (voir *supra* le point « Bas prix du pétrole et géopolitique des approvisionnements »). Certains experts annoncent ainsi une progression du seuil de rentabilité, allant jusqu'à pronostiquer un *break-even* moyen de l'ordre de 80 US\$;
- si les progrès des méthodes de forage et de fracturation ont permis d'améliorer grandement la productivité par puits ces quatre dernières années, les perspectives semblent à ce jour limitées, la productivité ayant atteint un optimum économique dans plusieurs comtés des États-Unis. Ainsi, dès 2013, Schlumberger avait indiqué que les forages dans le Bakken (dans l'État du Dakota du Nord), qui comprennent 30 étapes de fracturation sur des branches latérales de 3 kilomètres de long, correspondaient à l'optimum économique pour ce gisement⁽⁴³⁾ ;
- lors de la première phase de développement des pétroles de schiste américains, les opérateurs indépendants n'ont pas eu de difficulté à trouver les financements nécessaires au développement de ces ressources non-conventionnelles, les investisseurs ayant été convaincus de l'avenir de cette industrie et ayant bénéficié de la facilité des QE associés aux bas taux de l'argent. Mais il n'en va plus de même aujourd'hui, où les faillites se multiplient suite à l'effondrement des prix du baril et où la FED laisse entrevoir une remontée des taux (voir ci-après) ;
- avec la chute des prix du baril de pétrole et la baisse du nombre d'appareils de forage actifs sur le sol américain, la demande de services parapétroliers a elle aussi diminué, entraînant une baisse des tarifs de ces services (ce fut d'ailleurs là une des raisons de la résilience de la production américaine de pétroles de schiste). À l'inverse, une reprise des activités de forage serait de nature à dopper la demande de ces services, et donc à orienter les prix à la hausse.

La course entre les taux et le pétrole : vers la fin d'une bulle énergétique ?

Dans ce contexte, le risque d'explosion d'une bulle des pétroles et gaz de schiste, à partir d'un montant cumulé directement investi estimé à 235 G\$ (sans les titrisations ni les utilisations collatérales vraisemblables, que certains évaluent à plusieurs milliers de G\$⁽⁴⁴⁾), est de plus en plus évoqué⁽⁴⁵⁾. Selon la Banque des règlements internationaux, ce serait globalement de 1 000 à 3 000 milliards de dollars d'investissement dans le pétrole et le gaz qui seraient ainsi menacés. En effet, « de 2004 à 2013, les dépenses annuelles en capital de dix-huit des plus grandes

compagnies pétrolières du monde ont presque quadruplé, [passant] de 90 milliards de dollars à 356 milliards »⁽⁴⁶⁾.

Or, la valorisation des majors pétrolières a beaucoup diminué, car plus de la moitié de leur valeur repose sur l'anticipation des réserves économiquement exploitables à plus de 10 ans⁽⁴⁷⁾ : les actions du secteur auraient baissé de 2 000 G\$ depuis la mi-2014. Cette chute de rentabilité a fragilisé les majors et pourrait conduire à de nouveaux regroupements, d'autant plus que les acteurs financiers misent sur un maintien de prix assez bas sur l'année⁽⁴⁸⁾. La dette de Petrobras serait ainsi de 23 milliards de dollars en 2016-2017. « *Quatre banques françaises sont parmi les dix plus exposées. Parmi celles-ci, le Crédit Agricole, dont l'exposition de 29,8 milliards de dollars est la seconde en importance en Europe* » et JP Morgan Chase a annoncé 1,250 G\$ de provisions pour pertes en 2016 dans ce secteur⁽⁴⁹⁾. Le succès du mouvement « *divest from carbon* » en 2015, avant la COP 21, incluant Rockefeller et Warren Buffet, trouve sans doute une part de ses motivations dans la crainte de l'éclatement de cette bulle que certains redoutent, à l'instar de celle de l'immobilier en Floride qui, semble-t-il, déclencha le krach de 1929. Cela constitue certes un facteur favorable à la réduction des émissions de GES. En revanche, ce rythme de réduction répondant à une logique financière instantanée n'est pas forcément compatible avec un repli techniquement progressif des consommations d'hydrocarbures, ni avec une reprise prolongée d'une croissance, même modeste.

Aujourd'hui, selon l'IFRI⁽⁵⁰⁾, les prix bas du pétrole aideraient les États-Unis à dégonfler lentement cette bulle et à préparer la remontée des cours (les *futures* de mars 2016 sont orientées vers une hausse modeste à 6 mois⁽⁵¹⁾) au détriment, dans l'intervalle, de larges pans de leur secteur énergétique (charbon, gaz).

La construction de stockages se poursuit à un coût compris entre 40 et 50 \$/b. Dans cette perspective, les États-Unis importent de plus en plus de pétrole peu cher pour le stocker (les importations américaines de brut nigérian ont par exemple décuplé en mars 2016, par rapport à la

(43) Rapport IFRI, « *La révolution des pétroles de schiste aux États-Unis : le test du business model est en cours* », par Sylvie CORNOT-GANDOLPHE, janvier 2015, selon une source Schlumberger : "Has the Economic Stage Count Been Reached in the Bakken Shale?"

(44) <http://la-chronique-agera.com/petrole-subprime/>

(45) <http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-02/sandridge-said-to-be-unnamed-company-in-mcclendon-indictment>

(46) <http://www.lenouveleconomiste.fr/financial-times/la-baisse-des-prix-du-petrole-fait-flamber-les-dettes-30256/>

(47) Mac Kinsey et Carbon Trust, "Climate change: a business revolution?", cité dans Sortons de l'âge des fossiles, COMBES (Maxime), 2015.

(48) Mon Apr 4, 2016, 8:48 AM EDT, Reuters, "Oil touches one-month low on scepticism over potential freeze deal".

(49) <http://www.lenouveleconomiste.fr/financial-times/la-baisse-des-prix-du-petrole-fait-flamber-les-dettes-30256/>

(50) http://www.xerficanal-economie.com/emission/Marie-Claire-Aoun-Le-monde-face-au-trop-plein-de-petrole_3190.html

(51) <http://www.bloomberg.com/news/articles/2016-03-31/the-u-s-is-a-big-oil-importer-again>

moyenne de 2015). Les raffineries importent depuis le Mexique et le Venezuela plutôt que d'utiliser du pétrole peu cher, car elles se sont équipées pour traiter du brut lourd ⁽⁵²⁾. Plus les stocks augmentent, et plus l'anticipation d'un écart entre un prix aujourd'hui faible et sa probable remontée pousse les investisseurs à prêter aux producteurs (qui poursuivent l'exploitation des puits déjà forés) et aux stockeurs, en raison des taux bas actuels (effets des QE précédemment cités). L'objectif semble être de stocker et de s'endetter dans l'attente de la remontée des prix, en usant du privilège du dollar. À l'avenir, l'utilisation monétaire et géopolitique que les États-Unis pourraient faire de leur stockage pourrait avoir des conséquences au moins aussi importantes que son usage strictement énergétique.

En chemin vers un sous-investissement énergétique et une flambée des prix à court-moyen terme

Les taux d'intérêt bas profitent principalement aux activités financières

Paradoxalement, alors que les taux bas de l'argent pourraient encourager l'investissement dans l'économie réelle, c'est le contraire qui est observé. Du côté des États, les finances publiques ont été durablement mises à mal par l'après-crise de 2008, d'autant plus que les États avaient perdu leur pouvoir de création monétaire au profit des banques privées depuis les années 1970. Du côté du secteur privé, le devenir des grands acteurs cotés est conditionné par la recherche de rendements du secteur financier, qui en trouve de moins en moins du côté des obligations d'États (leur rachat par les banques centrales – QE – les rendant sans risques, d'où de faibles rendements). Pour maintenir leurs cours et leurs dividendes, ces sociétés placent leurs bénéfices éventuels de préférence dans le rachat d'actions, réduisant de ce fait leur capacité à investir, à embaucher, ou à en faire bénéficier la part salariale et donc la demande.

Par ailleurs, les taux bas incitent à emprunter des sommes considérables pour réaliser des fusions-acquisitions de très grande taille (*mega-deals*), ces opérations étant également profitables pour les intermédiaires financiers. Elles ont représenté en 2015 plus de 4 500 G\$, un niveau jamais atteint depuis la fin des années 1990, et se poursuivent en 2016, à l'instar de l'offre de rachat de Monsanto par Bayer pour 62 G\$, en mai 2016. Selon certains économistes ⁽⁵³⁾, elles constituent une « bombe à retardement », car :

- elles sont financées avec un fort effet de levier pour rechercher des rendements et, ce faisant, les fonds d'investissement épuisent les entreprises ;
- ces deals se font surtout dans des secteurs matures, par opportunisme commercial ou fiscal ou pour réduire les coûts, plutôt que pour des raisons stratégiques constructives ;
- ils détruisent de ce fait des emplois et du capital en des quantités que les *start-ups* ne pourront compenser ;
- ils renforcent dans les sociétés cotées la vigilance finan-

cière au détriment de la réflexion stratégique pour relever leur rentabilité de court terme.

Dans le cas du secteur charbonnier, par exemple, la « frénésie d'acquisitions fondée sur la dette, alors que le marché était au plus haut » est considérée comme « un facteur majeur des banqueroutes charbonnières récentes » ⁽⁵⁴⁾.

Paradoxalement, taux bas et monnaie abondante jouent contre l'investissement énergétique

Les taux faibles ou négatifs conduisent, *via* les fusions-acquisitions, à étendre le pouvoir de marché de quelques grands acteurs dans de nombreux domaines ⁽⁵⁵⁾. Faute de capitaux, et sauf en cas d'une limitation du secteur financier dans la recherche de hauts rendements, ce qui est peu probable à court terme, le renouvellement d'infrastructures devenues obsolètes (voir les infrastructures de transport aux États-Unis, des parcs électriques...) ne pourra vraisemblablement pas avoir lieu dans les volumes et spécifications requis par la transition et selon les calendriers nécessaires ⁽⁵⁶⁾.

À structure financière inchangée, un scénario dans lequel les financements des investissements structurants, notamment de recherche et d'utilisation d'hydrocarbures ou de combustibles nucléaires (sur une trajectoire compatible avec les objectifs climatiques), arriveraient trop tard pour appuyer le redémarrage économique voire simplement pour assurer la continuité des fournitures, n'est donc pas invraisemblable, d'autant que même les acteurs majeurs du secteur ne disposent pas forcément de réserves financières aptes à soutenir à elles seules un tel programme et que selon la plupart des économistes les facteurs financiers d'un nouveau krach se sont mis en place. Le pouvoir de marché d'oligopoles entretemps renforcés risquerait d'être d'autant plus défavorable aux États et aux citoyens, et le manque d'investissements de sobriété ou de substitution énergétique pourrait devenir très préjudiciable.

(52) *Idem* note 42.

(53) http://www.xerficanal-economie.com/emission/Olivier-Passet-Pourquoi-les-fusacs-vont-battre-des-records-en-2016_3116.html?IdTis=XTC-FZ0L-G2FL6N-DD-HQ7C-GVMM&utm_source=Newsletter&utm_medium=email&utm_term=http___www.xerficanal-economie.com_emission_Olivier-Passet-Pourquoi-les-fusacs-vont-battre-des-records-en-2016_3116.html&utm_campaign=16+01+13+Xerfi+Canal+544&utm_content=6721521_1_7270

(54) *Opponents eye potential massive bankruptcy of nation's largest coal miner, KUYKENDALL (T.)*, 3 mars 2016.

(55) *Parmi les secteurs stratégiques exposés aux fusions-acquisitions figure l'ingénierie parapétrolière, qui constitue un élément d'indépendance décisionnelle nationale, ainsi que les savoir-faire techniques brevetés ou non. Par exemple, la fermeture annoncée le 17 mars 2016 du site de Thiers produisant des vannes pour le secteur, une filiale de la compagnie américaine Flowserve.*

(56) *Ou dans des conditions telles qu'ils appauvrissent les citoyens et les usagers (garanties et subventions d'États, envol des tarifs...) : voir, par exemple, Money and Sustainability, LIETAER (B.) & al., pp. 91-93 : 44 États américains étant en faillite début 2012, les pouvoirs publics sont conduits à vendre des infrastructures publiques, dont les acquéreurs augmentent considérablement les tarifs d'utilisation. Ainsi, la municipalité de Chicago a concédé la gestion de ses parcmètres au tiers de leur valeur raisonnable, soit 1,2 G\$: les tarifs furent aussitôt multipliés par 4 ou 5, voire davantage, alors que des emprunts sur 20 ans à bénéfices partagés auraient rapporté 3 fois plus à la collectivité.*

La question des évolutions susceptibles d'assurer le meilleur service énergétique se poserait alors sous un jour différent des décennies précédentes, secteur par secteur. Elle demanderait de concevoir des scénarios de transition énergétique intégrant la possibilité d'un manque de capitaux disponibles aux moments requis, et peut-être d'un manque d'énergie fossile disponible à certains moments pour construire les capacités énergétiques souhaitées : il faut du pétrole même pour construire des éoliennes, des panneaux photovoltaïques et des réacteurs nucléaires. Cette perspective réactive les considérations géopolitiques en matière d'approvisionnements fossiles.

Et... si les taux remontaient ?

Un retour de l'inflation accéléré par la volatilité des énormes masses monétaires en circulation (du fait du *trading* à haute fréquence et de la spéculation indicielle) et par la sensibilité plus forte des coûts de production à la demande (voir *supra* le point « Conséquences économiques et financières des bas prix du pétrole ») entraînerait vraisemblablement une remontée des taux des banques centrales, le renchérissement des dettes et l'explosion de la bulle obligataire mondiale (P. ARTUS, Xerfi Canal, 24 février 2016). Or, les fluctuations des prix provoquent des comportements financiers contrastés à un rythme nettement plus élevé que l'adaptabilité des équipements et des compétences des industries.

De son côté, la Banque centrale américaine (FED) laisse régulièrement entendre qu'elle pourrait relever ses taux directeurs. Une remontée des taux de l'argent ralentirait les fusions-acquisitions en en diminuant l'effet de levier. Elle pourrait réduire la pression sur les valorisations boursières en offrant d'autres possibilités de rendement et ramènerait les acteurs financiers dans un monde où emprunter coûte et prêter rapporte, et non le contraire (taux négatifs⁽⁵⁷⁾).

Elle permettrait de freiner les bulles financières⁽⁵⁸⁾ (sont évoqués, aux États-Unis, outre l'énergie, les crédits automobiles, les crédits étudiants...). Elle induirait peut-être une baisse provisoire du PIB en affectant sa composante financière et les emplois du secteur bancaire et assurantiel. Elle ferait aussi croître les intérêts des dettes publiques, et par là elle resserrerait les marges de manœuvre des États et des contribuables, ainsi que celles des entreprises, notamment intensives en énergie, surtout dans les pays et/ou pour les secteurs où l'énergie est peu taxée et subit de plein fouet les fluctuations des cours.

Pour le secteur énergétique, accentuerait-elle le départ des investisseurs vers d'autres actifs, ce qui pourrait induire une nouvelle vague de consolidations dans le secteur pétrolier, mais aussi une crise de liquidités sur ces actifs⁽⁵⁹⁾, et donc une fragilisation des banques fortement exposées sur ces secteurs ? Pourrait-elle aussi pousser à revendre du pétrole stocké, et donc refaire momentanément baisser les prix ?

Une inconnue majeure est le moment où le privilège commercial du dollar vis-à-vis des matières premières et énergétiques serait fragilisé du fait des institutions et relations financières multilatérales créées par plusieurs grands

pays (Chine, Inde, Russie, Iran...). La capacité de l'euro à soutenir un programme d'investissements de la transition énergétique pour les dix années à venir pourrait peut-être se renforcer, paradoxalement, avec la détention de stocks accrus de pétrole (voire de gaz) dans une perspective non seulement énergétique, mais aussi monétaire⁽⁶⁰⁾.

Conclusion

La période qui s'ouvre verra vraisemblablement se succéder une volatilité accrue des prix du pétrole, puis leur forte remontée dans les 3 à 5 ans. L'Union européenne pourrait favoriser, comme les États-Unis, la constitution de stocks publics et privés importants, ne serait-ce que pour prévenir un à-coup brutal à un moment de reprise économique, alors qu'il faudrait réaliser les équipements de la transition, qui soient efficaces, décarbonés et économes des ressources naturelles.

En attendant, le maintien de prix bas alimente la récession mondiale et freine les possibilités, pour les fonds publics et privés, d'investir dans la transition énergétique, malgré les taux bas de l'argent et des disponibilités monétaires inédites. Le chemin est étroit entre le maintien de taux faibles (qui entretiennent les bulles et les concentrations sectorielles) et leur remontée, dont les effets sont difficiles à prévoir : une chute des obligations au profit d'autres placements plus rémunérateurs à court terme ? Quelle attractivité financière du secteur des hydrocarbures, entre des prix redevenus élevés, et des investissements chers du fait des caractéristiques des gisements disponibles et limités en quantité et en horizon du fait des objectifs adoptés lors de la COP 21 ?

En tout état de cause, l'accès au pétrole et au gaz devrait devenir plus onéreux dans les cinq années à venir, accroissant l'intérêt de la transition énergétique, mais renchérisant aussi les investissements (y compris décarbonés). L'Union européenne devrait prendre en compte ces éléments dans ses perspectives géopolitiques et intégrer effectivement dans ses objectifs prioritaires la réduction de sa dépendance vis-à-vis du pétrole (notamment pour l'alimentation - engrais - et les transports).

(57) Le 29 janvier 2016, la Banque centrale japonaise adoptait des taux négatifs (-0,1 %) après la BNS (- 0,75%) et la BCE en 2014 (premier QE en mars 2015 pour 2 ans) et la question se pose à la FED (fin des QE en octobre 2014) en cas de croissance faible ou nulle – malgré les nouvelles bulles spéculatives qui pourraient alors se développer.

(58) Selon Martin Wolf, la création monétaire que représentent les QE ne finance pas l'activité, pour sa plus grande part : "only about 10 per cent of UK bank lending has financed business investment in sectors other than commercial property". <https://postjorion.wordpress.com/2014/05/09/289-wolf-soutient-le-smart/> Voir également Les Echos du 13 octobre 2015 : les QE et les taux d'intérêt bas aboutissent à « gonfler d'énormes bulles spéculatives un peu partout dans la finance » (p. 12).

(59) Banque de France, *Évaluation des risques du système financier français*, décembre 2015.

(60) Voir la proposition de monnaie internationale Trade Reference Currency, gagée sur des marchandises, LIETAER (B.) & al., *Money and Sustainability*, 2011.

Le marché pétrolier à la croisée de la géologie, de l'économie et de la géopolitique

Par Olivier APPERT

Conseiller du centre Énergie de l'IFRI, membre de l'Académie des technologies

Le marché pétrolier dépend de considérations géologiques, économiques et géopolitiques. Dès l'origine, le pétrole a soulevé des polémiques impliquant ces trois dimensions qui sont étroitement interconnectées. Aujourd'hui, c'est toujours le cas : seule la prise en compte de toutes ces dimensions permet de comprendre l'évolution du marché.

La géologie

Bien entendu, l'offre de pétrole dépend d'abord des ressources géologiques. La quantité de pétrole contenue dans l'écorce terrestre est, à l'évidence, finie. Mais l'ampleur des réserves pétrolières a fait l'objet de débats dès l'origine de leur exploitation. Ainsi, en 1919, alors que les États-Unis représentaient les deux tiers de la production mondiale, la revue *La Technique Moderne* affirmait que « 4,2 Gb ont été produites aux États-Unis depuis 1859, et pas plus de 7 Gb supplémentaires pourront être produits ».

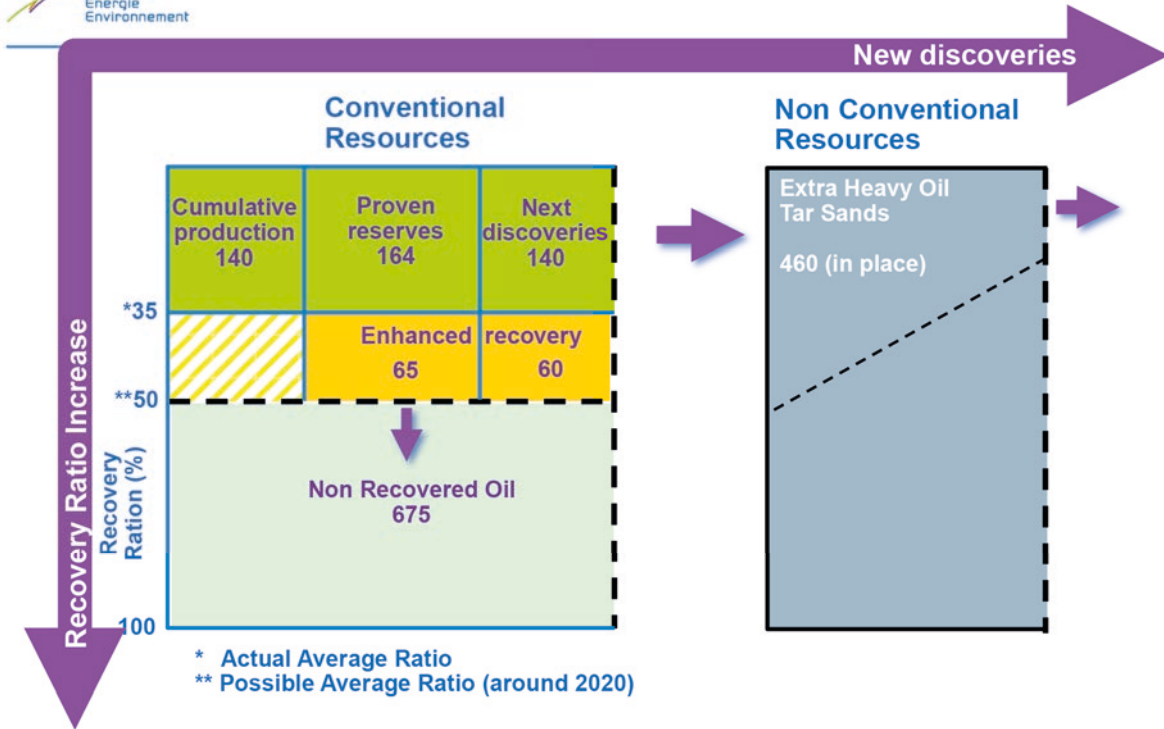
Depuis lors, de nombreuses provinces pétrolières ont été découvertes. Aujourd'hui, les réserves pétrolières des États-Unis s'élèvent à 48 Gb, ce qui ne représente que 2,9 % des réserves mondiales. En 1973, après le premier choc pétrolier, on estimait que les réserves mondiales ne couvriraient que trente ans de consommation. Trente ans après, en 2003, le monde avait consommé 150 % des réserves estimées en 1973, mais malgré cela les réserves mondiales étaient de nouveau estimées à plus de trente ans. Aujourd'hui, elles représentent plus de cinquante ans de la consommation mondiale, malgré une consommation qui n'a cessé de progresser. La notion de réserves est en effet une notion à la fois géologique, technique et économique. Un gisement de pétrole n'est pas une baignoire qui se viderait, mais une éponge que l'on presse : la pression sur l'éponge, c'est la technologie et le prix. Ainsi, le progrès technique et l'augmentation des prix ont permis d'exploiter des gisements inaccessibles auparavant, comme les ressources de la Mer du Nord, dont l'exploitation commença après le premier choc pétrolier.

Les autorités boursières américaines (de la SEC – *Securities and Exchange Commission*) ont donné une définition précise de la notion de réserves pétrolières : il s'agit de la quantité de pétrole qui pourra être produite à partir

des gisements qui ont fait l'objet d'une décision de mise en exploitation. Lorsqu'un gisement est mis en production, les opérateurs n'ont qu'une idée approximative de la quantité de pétrole qu'ils pourront extraire du gisement. Ainsi l'évaluation des réserves d'un gisement donné évolue-t-elle dans le temps grâce à une meilleure connaissance de celles-ci permise par l'exploitation. En général, les réserves produites sont supérieures aux estimations initiales. Ces règles sont appliquées strictement par les opérateurs cotés en Bourse. Il est clair que les estimations de réserves des compagnies nationales sont plus sujettes à caution. On peut schématiser les ressources pétrolières globales en distinguant la production cumulée depuis l'origine, d'une part, et les réserves prouvées, d'autre part. À ce jour, seulement un tiers du pétrole en place peut être récupéré. Il est possible, grâce au progrès technique, d'augmenter le taux de récupération. De même, l'exploration permettra de faire de nouvelles découvertes. Enfin, on peut mobiliser des ressources non conventionnelles, telles que les pétroles extralourds et, aujourd'hui, les pétroles de schiste.

Au début de ce siècle, a réémergé le débat sur le *peak oil*. Cette théorie est basée sur les travaux d'un géologue américain, King Hubbert, qui, dans les années 1950, avait pronostiqué avec succès que le plafonnement de la production pétrolière américaine interviendrait au début des années 1970. Son approche était uniquement géologique, elle ne prenait pas en compte les aspects techniques et économiques. Or, l'essor des technologies pétrolières a été impressionnant, permettant d'exploiter des ressources inaccessibles : sismique 3D, forage horizontal, procédés d'amélioration du taux de récupération... Et l'augmentation des prix, en 1973, après une stabilité pendant des décennies, a permis à de nouvelles ressources de devenir rentables.

Oil resources (Gtoe)



© IFP Source : IFP

Figure 1 : Ressources pétrolières conventionnelles et non-conventionnelles – Découvertes de nouveaux gisements et augmentation des taux de récupération.

L'émergence récente des hydrocarbures non conventionnels, en particulier aux États-Unis, est un *game changer* qui repousse les limites des réserves pétrolières et gazières. Ainsi, les États-Unis sont devenus le premier pays producteur de pétrole du monde.

L'économie

La consommation de pétrole est étroitement corrélée à la croissance économique. La croissance de la population et l'augmentation du niveau de vie impliquent une demande croissante de mobilité tant des personnes que des marchandises. Aujourd'hui, la demande de pétrole se concentre sur le secteur des transports. On peut considérer que « pétrole = transport ». Si la demande énergétique du transport ne représente que 28 % de la consommation énergétique mondiale, elle est assurée à 92 % par les produits pétroliers. Les substituts au pétrole sont en effet marginaux : 4 % pour le gaz, 3 % pour les bio-fuels et seulement 1 % pour l'électricité. Ainsi les produits pétroliers représentent-ils la moitié de la consommation d'énergie de la SNCF. Le secteur des transports représente 60 % de la consommation de produits pétroliers et la quasi-totalité de l'augmentation de la demande de pétrole, l'industrie pétrochimique maintenant, quant à elle, sa part de marché.

La demande de mobilité va croître dans les décennies à venir pour accompagner la croissance de la population et celle du niveau de vie. Si la flotte totale de véhicules (voitures individuelles et véhicules commerciaux) stagne

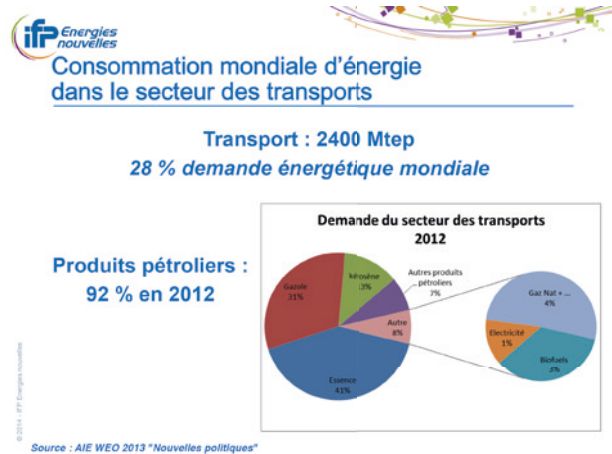


Figure 2

dans les pays industrialisés, celle-ci va exploser dans les pays émergents : la flotte de véhicules totale devrait tripler dans les pays non-OCDE passant de 0,5 à 1,5 milliard (BP Energy Outlook, 2016).

En parallèle, la demande de pétrole dans le secteur des transports sera impactée par les progrès technologiques et par le développement d'énergies de substitution. Ainsi, les technologies d'hybridation des motorisations permettent de réduire de 20 à 40 % la consommation unitaire des véhicules. De la même manière, la valorisation des

Géopolitique du pétrole

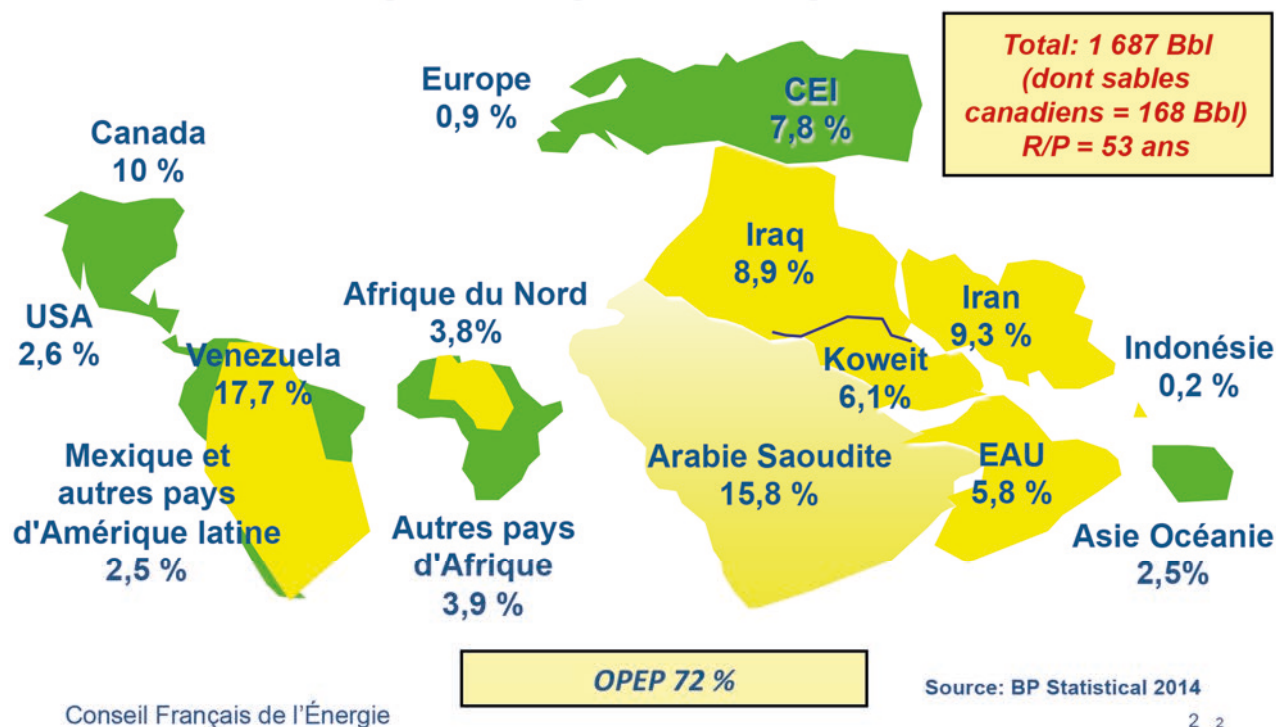


Figure 3

NB : La superficie des pays et des continents est ici proportionnelle à leurs réserves pétrolières.

potentiels du *Big data* permettra d'optimiser la consommation des véhicules. BP estime ainsi que l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur des transports devrait atteindre de 2 à 3 % par an, à comparer à une évolution annuelle de 1,5 % au cours de la précédente décennie. On assiste donc à une course poursuite entre la demande de mobilité et le progrès technologique.

En parallèle, les énergies alternatives vont se développer. C'est en particulier le cas du gaz naturel, dont la production devrait croître de 6,3 %/an. Ainsi, les énergies alternatives hors pétrole devraient représenter 12 % de la consommation d'énergie du secteur des transports en 2035.

Ces perspectives amènent à considérer l'éventualité d'un pic de la demande pétrolière. Il est trop tôt pour avancer une date pour le retournement de la consommation de pétrole. D'ores et déjà, la demande pétrolière des pays de l'OCDE stagne, voire elle baisse. Il est vraisemblable que le pic de la demande sera atteint, au niveau mondial, avant 2050.

La géopolitique

La géopolitique joue un rôle déterminant sur le marché pétrolier. André Giraud, ministre de l'Industrie lors du second choc pétrolier, avait coutume de dire que « le pétrole est une matière première à fort contenu diplomatique et militaire, avec une valeur fiscale indéniable – et, acces-

soirement, un pouvoir calorifique... ». Cette dimension résulte de l'inégale répartition des réserves pétrolières dans le monde.

Dans la carte ci-dessus, la superficie de chaque pays (ou continent) est proportionnelle au montant de ses réserves pétrolières. Cela illustre l'« anomalie géologique du Moyen-Orient », qui recèle près de la moitié des réserves pétrolières mondiales (hors hydrocarbures non conventionnels).

Cette dépendance de l'approvisionnement mondial vis-à-vis du Moyen-Orient impacte donc directement le marché pétrolier.

L'évolution des prix pétroliers depuis les années 1970 a été marquée par les événements géopolitiques dans cette région : la guerre du Kippour (en octobre 1973), la Révolution iranienne (en 1979), la guerre du Golfe (en 1990-1991), l'invasion de l'Irak (en 2003)... Plus récemment, les révolutions arabes ont, elles aussi, fortement impacté le marché.

Le contexte géopolitique actuel de la région crée bien entendu une incertitude importante sur le marché pétrolier.

Quelles sont les perspectives du marché pétrolier ?

L'évolution du marché pétrolier dans les années à venir résultera de la conjonction de phénomènes touchant à la fois à la géologie, à l'économie et à la géopolitique.

L'histoire du marché pétrolier depuis les quinze dernières années illustre parfaitement l'influence de chacune de ces dimensions. La croissance économique des pays émergents (en particulier celle de la Chine) s'est traduite par une flambée de la demande, que l'offre a eu du mal à suivre. D'où une hausse des coûts de production et des prix du pétrole. La crise des *subprimes* a conduit à un effondrement des prix. L'OPEP a réagi rapidement en réduisant sa production et le marché s'est rétabli progressivement. Apparaissent alors deux *game changers* qui vont bouleverser à nouveau la donne : la révolution de nature géologique (et technologique) des hydrocarbures non conventionnels et la révolution géopolitique du Printemps arabe.

Ainsi, tous les deux ans, les États-Unis ont mis en production l'équivalent de la production pétrolière de la Norvège. Par ailleurs, les révolutions arabes ont déstabilisé plusieurs pays : ainsi, la production pétrolière libyenne a fluctué au rythme de l'anarchie régnant dans ce pays. En outre, l'embargo imposé à l'Iran a réduit significativement les capacités d'exportation de ce pays. Ces aléas de nature géopolitique ont masqué la croissance considérable de la production d'hydrocarbures liquides aux États-Unis, qui sont devenus le premier producteur mondial, devant l'Arabie Saoudite et la Russie. Ce n'est qu'à la mi-2014 que le marché a pris conscience de l'excès important de l'offre par rapport à la demande. La décision politique prise par l'Arabie Saoudite (lors de la réunion de l'OPEP de novembre 2014) de maintenir sa production a précipité un effondrement des prix, ceux-ci passant de 115 dollars le baril (\$/b) à la mi-2014 à 30\$/b début 2016.

Le paradigme du marché pétrolier dépend de facteurs économiques, géologiques et géopolitiques. La baisse du prix du pétrole favorise l'accroissement de la demande, mais son impact est resté à ce jour limité en raison notamment du ralentissement de la croissance économique mondiale. Les compagnies pétrolières ont réagi à cette baisse du prix en réduisant fortement leurs investissements. Cependant, l'impact sur l'offre de pétrole conventionnel est limité à court terme. L'exploration a été certes immédiatement affectée, et les nouveaux projets annulés ou reportés, mais la production sur les gisements existants se maintient, dès lors que les coûts d'exploitation sont inférieurs au niveau des prix, ce qui est le cas pour la quasi-totalité des gisements. Cependant, la baisse des investissements se traduira prochainement par une baisse de la production qui sera sensible d'ici à la fin de cette décennie.

On s'attendait à un déclin rapide de la production de pétrole de schiste, notamment aux États-Unis. Cependant, celle-ci s'est révélée très résiliente. Grâce au progrès technique et à l'industrialisation des processus de production, les coûts ont baissé de façon importante : sur certains gisements, la production de nouveaux puits a été multipliée par près de six en cinq ans. Les coûts de production ont donc baissé de façon importante, assurant ainsi la compétitivité de l'exploitation, et ce, malgré l'effondrement des prix. Cependant, plusieurs opérateurs se trouvant dans une situation financière critique se sont placés sous la protection du régime du « *Chapter Eleven* ». Certaines banques américaines qui avaient financé massivement les producteurs de pétrole de schiste ont été amenées à constituer des provisions importantes : c'est un sujet de préoccupation pour le système financier, qui craint un phénomène de bulle financière. La production commence à décroître, et cette baisse devrait se poursuivre dans les mois à venir.

Augmentation de la demande et réduction de l'offre conduisent à un rétablissement progressif de l'équilibre du marché. Lors des précédents épisodes de baisse des prix, le marché s'était rétabli en environ quatre ans, les prix retrouvant à cette échéance leurs niveaux initiaux. On peut donc anticiper un retour du marché à l'équilibre d'ici un à deux ans.

L'OPEP a décidé de laisser jouer les forces du marché et a abandonné sa volonté de réguler les prix. En quelque sorte, ce sont les producteurs de pétrole de schiste américains qui jouent le rôle de producteur d'appoint. En théorie, le prix s'établit au niveau du coût du producteur marginal qui assure l'équilibre entre l'offre et la demande. Le coût de production du pétrole de schiste représente donc maintenant un plafond qui restera durablement indépassable. Après le paradigme des « Sept Sœurs » qui a prévalu entre 1928 et 1973, suivi par celui de l'OPEP, le marché pétrolier entre aujourd'hui dans un nouveau paradigme. D'ici à la fin de la décennie, l'Arabie Saoudite sera probablement en mesure de retrouver un certain contrôle du marché. Mais il ne faut pas en oublier la dimension géopolitique, qui risque de bouleverser l'évolution du marché pétrolier dans un contexte de déstabilisation majeure du Moyen-Orient.

Where is environmental science headed?

Foreword

Thierry Mandon, state secretary assigned to Research

Introduction

Claire Tutenuit, general representative of the association
Enterprises pour l'Environnement

1 - Evolving knowledge

After the Paris Conference, which science for the climate?

Hervé Le Treut, LMD-IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Paris

The agreement reached at the Paris Climate Conference (COP 21) has, rightly and unanimously, been hailed as a major success for French negotiators. However a restriction has been formulated, also unanimously: the conference has established a permanent framework that signals not the end but the beginning of a feat yet to be accomplished. The Paris Agreement marks the passage from a period of warnings about climate-related risks (now recognized by all countries) to the quest for solutions.

Thoughts about converging issues related to agriculture, the food supply, environment and climate

Jean-François Soussana, National Institute of Agronomic Research (INRA), Paris

Over the past fifty years, the rate of increase in food production has tripled, thus outpacing the strong growth of the world's population (multiplied by 2,3). This quantitative success has, paradoxically, not secured the supply of food and nutrition since nearly 820 million people are still undernourished, two billion suffer from micronutrient deficiencies, and another billion stand a high risk of chronic metabolic pathologies related to obesity. During this period, the world's rising food supply has come from intensified farming practices for approximately 90% and, for the remaining 10%, from using 15% more land for fields and pastures. The growth in agricultural output has had several negative externalities: deforestation, loss of biodiversity, the impoverished soil, polluted water and air, rising greenhouse gas emissions. After several decades, these effects have augmented to the point of reducing the potential of agricultural output.

From ecology to ecological engineering

Luc Abbadie and Yann Dusza, Institut d'Écologie et des Sciences de l'Environnement de Paris, Université Pierre et Marie Curie

Restoring natural environments, adapting them to climate change, controlling the ecosystemic services derived

from biodiversity, creating from scratch environments as alternatives or complements to technical solutions... environmental engineering must address these scientific and operational issues. Relying on concepts and theories from the science of ecology, it tries to cope with environmental complexity by producing environments that, evolving and resilient, can deliver sustainable ecosystemic services.

Where are the sciences related to biodiversity headed?

Pierre-Edouard Guillain, director of the Foundation for Research on Biodiversity, and Jean-François Silvain, research director at Institut de Recherche pour le Développement (IRD) and president of the Foundation for Research on Biodiversity

The loss of biodiversity has been confirmed, even though the consequences for human activities are still being debated. The sciences related to biodiversity are now focusing on the mechanisms for adapting to global changes and the simulation of plausible scenarios for the future, with a redefinition of the relations between societies and ecosystems.

The third National Health Environment Plan's chapter on research

Philippe Hubert, director of chronic risks at the Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)

The third National Health Environment Plan (PNSE 3) calls for approximately a hundred concrete actions so that everyone can live in a health-friendly environment. Its implementation entails improving knowledge about health and the environment. This plan's diverse proposals are presented, ranging from the quality of air to the effects of endocrine disruptors, nanomaterials and electromagnetic fields. For taking into account individual exposures to environmental risks, the plan proposes an approach using "exposome", a concept raising stimulating questions for research.

The place of the oceans in environmental science

Françoise Gaill, senior researcher emeritus at the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)

Environmental science still underestimates a key environment: oceans. The emergence of an "ocean community" through actions in France ranging from the Grenelle of the Sea, which assembled officials and organizations for discussing issues related to the oceans, to the institution of the National Council on the Sea and Coastal Areas (CNML). How has the use of the word "ocean" (singular/plural) evolved? How are the oceans perceived as a physical object, an environment, an ecosystem and a biosphere? After presenting the analysis of interactions

between oceans and the climate as a major challenge, attention is turned to the validity of the marine environment and its scientific implications. Specific infrastructures are needed to study this natural environment. Maritime explorations have evolved thanks to light expeditions, such as Tara Oceans. Questions also arise about this environment's nature and its rich potential in terms of energy, mineral resources and biotechnology. The ocean is a common good at the center of law: national (Leroy Act), EU (clean seas and the "blue economy") and international (governance on the high sea, now under debate at the UN).

Economists and environmental issues

Christian de Perthuis, professor at the University of Paris-Dauphine, chair of Climate Economics

From David Ricardo (1772-1823) to Robert Solow (1924-), "natural capital" has been regarded as a scarce stock of exhaustible resources, this scarcity limiting growth. This conception does not help us understand the issues resulting from degraded natural systems of regulation, such as the attrition of biodiversity, air and water pollution or global warming. We must move beyond this standard conception and take into account the economic value produced by protecting these systems. This entails expanding environment-related pricing mechanisms through taxation, market quotas or compensation. When economics tackles the issue of "environmental value", problems of redistribution arise for politics to address through fair, efficient rules. In this respect, the climate question provides a practical field for work in vivo.

How is the environment changing economics?

Antonin Pottier, CERNA (Centre d'Économie Industrielle), Mines ParisTech

Three ways that the discipline of economics is – or should be – changed as its focus shifts to environmental problems are examined in relation to climate change and the loss of biodiversity. With regard to public policy objectives, the critique of cost/benefit analyses leaves room for an approach based on multiple criteria, thus reflecting the irreducible diversity of viewpoints. As for the means, the focus on economic instruments has led us to overlook how they are actually used in the field. This gap between theory and practice must be bridged in order to develop effective policies. Regarding the organization of economics as a discipline, individual research is no longer adapted, but a collective dimension is emerging thanks, in particular, to the simulation of complex systems, a task necessitating big research teams.

2 - The science-society dialog

Global warming: The prospects of relations between science, politics and society

Jean Jouzel and **Valérie Masson-Delmotte**, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, University of Paris Saclay

On 22 April 2016 at UN headquarters in New York, 175 countries and the European Union signed the Paris Agreement on the Climate. The approximately twenty countries that did not attend have till 21 April 2017 to sign this first universal climate agreement. Despite the gap between the announcements made by signatories and the stated objective of limiting the increase in the planet's average temperature to less than 2°C (or even less than 1,5°C in comparison with the preindustrial era), this agreement's universality is convincing evidence that the COP 21 should be seen as a success. This success can be set down to the commitment and efforts of the scientific community, which was nearly unanimous about the diagnosis, of political decision-makers, who grasped the issue's importance, and of what are now called stakeholders, represented by NGOs. An analysis of how this synergy gradually arose...

The environment's place in national research strategies

François Houllier, director-general of the National Institute of Agronomic Research (INRA) and president of AIIEnvi

The linkage between environment and development now figures on the international agenda, evidence of this being: the adoption of the objective of sustainable development at the UN summit in New York in September 2015; the world exhibition in Milan "Feeding the planet, energy for life"; and the 21st Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change in Paris in December 2015. Given their scope, the changes under way – whether in demography, the climate, environment, food supply or energy – raise questions for the vast spectrum of disciplines making up environmental science. With regard to programming research projects, questions arise about coordination and alignment at all levels, from the national to the global. To provide input to public policy-making, these projects draw on reviews of past research (state-of-the-art, metastudies) to shed light on future scenarios. They should also stimulate innovations.

Scientific controversies about health and the environment

Marc Mortureux, department on risk-prevention, Ministry of the Ecology, Energy and the Sea

Pesticides, nanoparticles, bisphenol A (BPA), endocrine disruptors, genetically modified organisms and electromagnetic waves are a few topics that have fueled scientific controversies about the impact on human health and the environment. What underlies these controversies? What consequences to draw for risk-management? Concrete examples serve to shed light on these questions, in particular the author's experience at the head of the National Agency on the Sanitary Security of Food, the Environment and Work (ANSES) in France.

The expectations of a firm, such as Veolia, with regard to environmental science

Dr. Philip Abraham, director of Research & Innovation at Veolia

Veolia accompanies its customers for optimizing the use of resources so as to increase economic, environmental and social effectiveness. To undertake the assignment it has set: “Resourcing the world”, its two levers of action are innovation and “co-construction”. With this leverage, environmental science takes part in working out solutions for broadening the access to basic natural resources while preserving them and seeing to it that they are replenished. To benefit from advances in environmental science, firms must integrate the latter in their organization, set objectives and help diffuse scientific findings. As a counterpart, firms have three expectations: be able to measure the environmental impact of their activities; find new approaches for reducing this impact; and obtain concrete solutions. A few examples illustrate these various points, which determine the practices and expectations of a firm such as Veolia with regard to environmental science.

At Michelin: Research oriented by sustainable mobility

Terry Gettys, director of R&D and member of Michelin’s executive committee

For more than a century now, Michelin has been convinced that the mobility of persons and goods is indispensable for human and economic development. This idea, at the very origin of the firm, is still the company’s reason for being: to offer everyone improved means of mobility. Since this mobility is at the service of people, its negative effects on society and the environment must be curbed. This is the challenge that Michelin wants, now more than ever, to address.

Where next for global environmental research? The answer is Future Earth

Corinne Le Quéré, professor and director of the Tyndall Centre for Climate Research, and **Asher Minns**, head of communication for Future Earth Europe at the University of East Anglia, United Kingdom

It is likely that you live in a crowded European city. You want fresh air when you cross the road, you want to see that everyone everywhere has quality of life, you want to know that plants and animals are safe from extinction through local habitat destruction and globally from climate change. This world that we want needs a different type of scientific research to what has gone before. It needs research that can help solve environmental problems as well as better analyse and understand them. Future Earth has been created for scientists across all disciplines to work together with societies’ experts to find solutions to the most pressing challenges facing people and the planet. Here we describe this new global organisation called Future Earth and what it wants to achieve in Europe and how.

A dramatic art for science?

David Wahl, author of *La Visite curieuse et secrète*

Why did people for a long time hate penguins? Are we aware that penguins nearly became extinct in horrible

circumstances? What does this history teach us about humanity’s relation with the environment? How to tackle science so as to tell stories, present environmental issues in the theater and share with the public one’s sense of astonishment and questioning? Following up on collaboration with biologists from Océanopolis in Brest, France, the author writes about his quest for an emotional construction of knowledge and its transmission.

Environmental science and theology: The exemplary Laudato Si’ encyclical

Father Frédéric Louzeau, director of the pole of research at the Collège des Bernardins, Paris

Never since their separation in the modern era has there so clearly been an urgent need for a new meeting between science and religion. Environmental issues and solutions should not stem from a single, totalizing view of reality. A closer look at the exemplary way that Pope Francis’ encyclical, *Laudato Si’* (issued on 18 June 2015), adopts an ethical, spiritual approach to the results of environmental science and ideas related to environmentalism...

Miscellany

Low oil prices and the international financial crisis: A risky pair

Dominique Dron, engineer from École des Mines, and **Didier Pillet**, chief engineer from École des Mines. Both hold positions at the Conseil Général de l’Économie.

The world economy in 2016, in particular energy and finance, has often been described as exceptional given: very low (even negative) interest rates; the overabundance of money put into circulation since 2008 (through quantitative easing) by the American, European and Japanese central banks; public debts swollen by efforts to keep the banking system from upending; deflationary tendencies; the drop in the price of oil (to a third of the price a year and a half ago); the sluggish economy worldwide (sometimes called “historical stagnation”); and the Paris agreement on climate change (adopted in 2015 at the COP 21), which calls for a drastic reduction in greenhouse gas emissions. Although the effects are not new in the concerned sectors of the economy, their conjunction for the first time in history calls for an exercise in foresight.

The oil market at the crossroads of geology, economics and geopolitics

Olivier Appert, advisor at the Energy Center, Institut Français des Relations Internationales (IFRI) and member of the Academy of Technologies

The oil market relies on information from geology, economics and geopolitics. Controversies about oil have always involved these three, tightly connected dimensions. This is still so: only by taking into account all these dimensions can we understand market trends.

Issue editor: Claire Tutenuit

Wohin entwickeln sich die Umweltwissenschaften ?

Vorwort

Thierry Mandon, französischer Staatssekretär für Forschung

Einführung

Claire Tutenuit, Generaldelegierte von Entreprises pour l'Environnement

1 – Die Entwicklung der Wissensbereiche

Nach der Pariser Konferenz, welche Klimawissenschaft ?

Hervé Le Treut, LMD – IPSL, Université Pierre et Marie Curie, Paris

Das Abkommen der Pariser Klimakonferenz, COP 21, wurde zutreffend und einhellig als bedeutender Erfolg für die französischen Verhandler begrüßt, der jedoch von einem Vorbehalt begleitet wurde, der ebenfalls einhellig zum Ausdruck gebracht wurde : diese Konferenz legt eine nachhaltige Arbeitsgrundlage fest, aber sie markiert vor allem eher einen Anfang als ein Ende – und die Aufgabe, die zu bewältigen ist, bleibt beträchtlich. Das Abkommen von Paris ist ein historischer Moment : es ist der Abschluss einer Periode des Warnens vor den Risiken des Klimawandels, die nunmehr von allen Staaten als solche anerkannt werden, und der Übergang zu einer Phase, in der nach Lösungen gesucht werden muss.

Nachdenken über die Konvergenz von landwirtschaftlichen, ernährungswissenschaftlichen , ökologischen und klimatischen Zielsetzungen

Jean-François Soussana, INRA, Paris

Im Laufe der letzten fünfzig Jahre wurde das starke Wachstum der Weltbevölkerung (die sich mehr als verdoppelt hat) von demjenigen der Nahrungsmittelproduktion (die sich verdreifacht hat) übertroffen. Paradoxerweise konnte durch diesen quantitativen Fortschritt keine Ernährungssicherheit erreicht werden, denn die chronische Unterernährung betrifft noch fast 820 Millionen Menschen, während 2 Milliarden unter einem Mangel an Mikronährstoffen leiden und eine weitere Milliarde mit einem gesteigerten Risiko chronischer Stoffwechselerkrankungen lebt, die auf Fettleibigkeit zurückzuführen sind. Während dieser Periode resultierte das Wachstum der weltweiten Nahrungsmittelproduktion um fast 90 % aus der Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion und um mehr als 10 % aus der Zunahme der bestellten und beweideten Nutzflächen, die sich um 15 % ausgedehnt haben. Das Wachstum der landwirtschaftlichen Produktion hatte eine Vielzahl negativer Begleiterscheinungen zur Folge

(Abholzung, Verlust der Artenvielfalt, Bodendegradation, Verschmutzung des Wassers und der Luft, zunehmender Ausstoß von Treibhausgasen). Nach mehreren Jahrzehnten haben diese Auswirkungen ein Ausmaß erreicht, das das Potenzial der landwirtschaftlichen Produktion beeinträchtigen kann.

Von der Ökologie zum ökologischen Engineering

Luc Abbadie und Yann Dusza, Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris, Université Pierre et Marie Curie

Die Wiederherstellung von Ökosystemen, ihre Anpassung an klimatische Veränderungen, die Sicherung ökosystemarer mit der Artenvielfalt zusammenhängender Dienstleistungen, die Schaffung ex nihilo von Ökosystemen als Alternativen oder Ergänzungen zu Lösungen des technischen Engineerings : dies sind die wissenschaftlichen und operationellen Herausforderungen des ökologischen Engineerings. Auf der Grundlage von Konzepten und Theorien der Umweltwissenschaften versucht man durch ökologisches Engineering einige der Herausforderungen der ökologischen Komplexität anzunehmen, indem man resiliente und entwicklungsfähige Milieus erschafft, die nachhaltige ökosystemare Dienstleistungen zu erzeugen vermögen.

Wohin entwickeln sich die Wissenschaften der Biodiversität ?

Pierre-Edouard Guillain, Direktor der Fondation pour la recherche sur la biodiversité, und Jean-François Silvain, Direktor des Forschungsprogramms am Institut de la recherche pour le développement (IRD), Präsident der Fondation pour la recherche sur la biodiversité

Der Verlust der Artenvielfalt wird heute als Tatsache angesehen, selbst wenn einige Debatten die Schwierigkeit aufzeigen, aus dieser Feststellung die geeigneten Schlussfolgerungen für das menschliche Handeln zu ziehen. Die Wissenschaften der Biodiversität konzentrieren sich heute auf die Mechanismen, durch die sich die Anpassung an die globalen Veränderungen manifestiert, sowie auf die Konstruktion der plausiblen Entwicklungsszenarios, und sie erarbeiten neue Definitionen der Beziehungen zwischen den Gesellschaften und den Ökosystemen.

Die Forschungspolitik des 3. Französischen Gesamtplans zur Gesundheit und Umwelt (PNSE 3)

Philippe Hubert, Direktor der chronischen Risiken, Ineris

Der dritte französische Gesundheits- und Umweltplan (PNSE 3) ist ein politisches Programm, das etwa hundert konkrete Ziele beinhaltet, deren Umsetzung es jedem erlauben soll, in einer der Gesundheit förderlichen Umwelt zu leben. Seine Durchführung impliziert den Fortschritt der

Kenntnisse in den Bereichen Gesundheit und Umwelt. Wir befassen uns hier mit den Vorschlägen des Plans in diesen Bereichen. Diese sind sehr vielfältig und reichen von der Qualität der Luft bis zu den schädlichen endokrinen Auswirkungen im Zusammenhang mit Nanopartikeln oder mit elektromagnetischen Feldern. Zudem schlägt der Plan für die Erfassung der verschiedenen Umwelteinflüsse, denen die Bevölkerung ausgesetzt ist, das Konzept des Exposoms vor, das die Forschung mit anregenden Fragen konfrontiert.

Die Bedeutung der Ozeane in den Umweltwissenschaften

Françoise Gaill, emeritierte Forschungsdirektorin des CNRS

Der Artikel befasst sich mit dem Ozean als einem bedeutenden Umweltsystem, das auf dem Feld der Umweltwissenschaften noch unzureichend beachtet wird. Wir verfolgen die Entstehung einer communauté océan seit der Meereskonferenz (Grenelle de la Mer) bis zur Einrichtung des französischen Rats für die Meere und Küsten (Conseil national de la mer et des littoraux). Wir interessieren uns für die Entwicklung des Begriffs Ozean, seine Benutzung im Plural und im Singular, und für seine Wahrnehmung als physisches Objekt, als Umwelt oder Ökosystem und Biosphäre. Die Analyse der Interaktionen zwischen Ozean und Klima wird in diesem Artikel als äußerst wichtiges aktuelles Thema hervorgehoben, ebenso wie die Gültigkeit der spezifischen Bedeutung des marinen Ökosystems und seiner wissenschaftlichen Implikationen bekräftigt wird. Zur Erforschung dieses natürlichen Systems bedarf es der Entwicklung von spezifischen Infrastrukturen : das neue Konzept leichter Expeditionen (wie das des Schoners Tara Océans) ist ein Fortschritt für die Meeresforschung. Außerdem stellt sich die Frage, was spezifisch für das marine Ökosystem ist. Eine andere Perspektive, die die Ozeane eröffnet, bietet das riesige energetische Potenzial, das die mineralischen Ressourcen und die Biotechnologien darstellen. Zum Schluss betrachten wir den Ozean unter dem Blickwinkel eines bedeutenden Gemeingutes, dem sowohl das französische (loi Leroy) als auch das europäische (Ökologie und blaue Wirtschaft) und internationale Interesse (Debatten in der UNO über meerespolitische governance) gilt.

Der Nationalökonom und der Wert der Umwelt

Christian De Perthuis, Professor für Klimawirtschaft an der Universität Paris-Dauphine

Von David Ricardo (1772 – 1823) bis zu Robert Solow (geboren am 23. August 1924) wird das natürliche Kapital als ein Vorrat an verbrauchbaren Ressourcen angesehen, deren Seltenheit einen Zwang für das Wachstum darstellt. In dieser Darstellung können die aus der Degradation der natürlichen Regulationssysteme resultierenden Folgeerscheinungen wie die Erosion der Artenvielfalt, die Wasser- und Luftverschmutzung sowie die Klimaerwärmung nicht erfasst werden. Die Standarddarstellung muss also überholt werden, um ihr den wirtschaftlichen Wert hinzuzufügen, der durch den Schutz dieser Regulationssysteme gewährleistet wird. Dies erfordert eine Erweiter-

ung der Umweltgebühren durch Besteuerung, durch Quotenmärkte oder durch ökologische Kompensation. Die Integration des Umweltwertes in die Wirtschaft hat Umverteilungsprobleme zur Folge, die der Politiker auf der Grundlage von Regeln behandeln muss, die Effizienz und Angemessenheit vereinbaren. Die Klimaproblematik bietet diesbezüglich ein Terrain für praktische Anwendungen in Lebensgröße.

Wie verändert die Umwelt die Wirtschaftswissenschaft ?

Antonin Pottier, CERNA (Centre d'Économie industrielle), Mines ParisTech

Wir prüfen hier drei Thesen, nach denen die Betrachtung der Umweltprobleme die Wirtschaftswissenschaft verändert (oder verändern sollte), und wählen als Beispiele den Klimawandel und den Verlust der Artenvielfalt. Die Infragestellung der Kosten-Nutzenanalyse hinsichtlich der politischen Zielsetzungen löst die Hinwendung zu Analysen mit einer Vielzahl von Kriterien aus, die eine irreduzible Vielfalt von Standpunkten berücksichtigen. Hinsichtlich der Mittel vollzog sich die Fokussierung auf die wirtschaftlichen Instrumente aus Unwissenheit über ihre praktische Anwendung. Wirkungsvolle Politiken durchzuführen setzt voraus, dass der Abstand zwischen Theorie und Praxis aufgeholt wird. Diesbezüglich ist die Organisation der Wirtschaftswissenschaften, die heute weitgehend auf individueller Forschung beruht, unangepasst. Doch eine Dimension, die kollektiver ausgerichtet ist, ist möglich, insbesondere dank der Modellierung komplexer Systeme, die große Forscherteams mobilisieren.

2 – Der Dialog Wissenschaft-Gesellschaft

Klimaerwärmung : die Perspektiven der Beziehungen zwischen Wissenschaft, Politik und Gesellschaft

Jean Jouzel und Valérie Masson-Delmotte, Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Institut Pierre-Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, Université Paris Saclay

Am 22. April 2016 haben 175 Länder und die EU im Sitz der Vereinten Nationen in New-York das Klimaabkommen von Paris unterzeichnet. Die etwa zwanzig bei diesem Termin abwesenden Länder können bis zum 21. April 2017 ihre Unterschrift leisten. Es handelt sich um die erste universelle Vereinbarung über das Klima. Aber trotz des Grabens zwischen den angekündigten Beiträgen dieser Länder und dem erklärten Ziel einer Begrenzung der durchschnittlichen Temperaturerhöhung der Erde unterhalb von 2°C, oder sogar unterhalb von 1,5°C im Vergleich zur vorindustriellen Epoche, rechtfertigt es dieser universelle Charakter voll und ganz, die COP 21 als Erfolg zu bezeichnen. Ermöglicht wurde dieser Erfolg durch den Einsatz und die vereinten Bemühungen einer Gemeinschaft von Wissenschaftlern, die in ihrer Diagnose gänzlich übereinstimmten, von politischen Entscheidungsträgern, die verstanden haben, wie wichtig es ist, zu handeln, und von zahlreichen Akteuren, die gemeinhin die Zivilgesellschaft bilden. Wir analysieren in diesem Artikel, wie diese Synergie progressiv zustande kam.

Der Stellenwert der Umwelt in der französischen Forschungsstrategie

François Houllier, bevollmächtigter geschäftsführender Direktor des INRA und Präsident der Alliance AllEnvi

Im September 2015 wurde auf dem UN-Weltgipfel in New York der Beschluss über die Ziele der nachhaltigen Entwicklung verabschiedet, die Weltausstellung in Mailand widmete sich dem Thema „Den Planeten ernähren – Energie für das Leben“, im Dezember 2015 fand in Paris die 21. Konferenz der Vertragspartner der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen über die Klimaveränderungen statt : die Zusammenhänge zwischen Umwelt und Entwicklung stehen im Zentrum der internationalen Agenda. Das Ausmaß der gegenwärtigen Veränderungen, ob sie die Demographie, die Ernährung, das Klima, die Umwelt oder die Energie... betreffen, konfrontiert die Umweltwissenschaften mit ernststen Fragen, die ein weites Spektrum von Disziplinen abdecken. Die Programmierung der Forschung und die Bereitstellung von entsprechenden Infrastrukturen verlangen Koordination und Anpassung, und dies auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Zur Unterstützung der öffentlichen Politiken ist eine Gesamtschau über die Forschungsprojekte beabsichtigt, um den neuesten Stand der Wissenschaften zu klären und um mögliche zukünftige Entwicklungen aufzuzeigen. Aber diese Politiken werden auch erwartet, um Innovationen anzuregen.

Die wissenschaftlichen Kontroversen im Bereich Gesundheit und Umwelt

Marc Mortureux, Generaldirektion der Risikoprävention (ministère de l'Écologie, de l'Énergie et de la Mer)

Pestizide, Nanoteilchen, Bisphenol A, endokrine Disruptoren, gentechnisch modifizierte Organismen oder elektromagnetische Wellen : dies sind einige Beispiele von Themen, über die erbitterte wissenschaftliche Kontroversen ausgetragen werden, um die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt zu bestimmen. Worauf stützen sich diese Kontroversen ? Welche Folgerungen müssen aus ihnen für das Risikomanagement gezogen werden ? Dieser Artikel möchte einige Elemente zum Verständnis dieser Problematik beitragen und erläutert konkrete Beispiele, die insbesondere auf meiner Erfahrung in der Leitung der französischen Behörde für Lebensmittelsicherheit, Umweltschutz und Arbeitsschutz (Anses) beruhen.

Die Erwartungen eines Unternehmens wie Veolia an die Umweltwissenschaften

Dr. Philip Abraham, Direktor des Bereichs Forschung & Innovation von Veolia

Veolia begleitet seine Kunden bei der optimierten Nutzung der Ressourcen, um deren wirtschaftlichen, umweltbezogenen und gesellschaftlichen Nutzeffekt zu steigern. Veolia stützt sich auf Innovation und Co-Konstruktion, um die Aufgabe, der es sich verschrieben hat, zu erfüllen und um der Welt neue Ressourcen zu erschließen. Im Rahmen dieser Zielsetzungen partizipieren die Umweltwissenschaften an der Entwicklung von Lösungen, die

den Zugang zu wichtigen natürlichen Ressourcen erweitern, indem sie gleichzeitig das Prinzip des nachhaltigen Umgangs und der Erneuerbarkeit verfolgen. Um aus den Umweltwissenschaften Nutzen ziehen zu können, müssen die Unternehmen Ziele verfolgen, die den Geist dieser Wissenschaften in ihrer Organisation integrieren. Außerdem sollten sie zur Verbreitung dieser Einstellung beitragen. Ein Unternehmen hat drei Erwartungen gegenüber den Umweltwissenschaften. Es muss die Möglichkeit haben, die Auswirkungen seiner Tätigkeit auf die Umwelt zu ermesen. Dann muss nach neuen Wegen gesucht werden, um diese Auswirkungen zu reduzieren, und zuletzt geht es darum, sich für konkrete Lösungen zu entscheiden. Anhand einiger Beispiele erläutern wir die verschiedenen Determinanten der Ressourcennutzung und verdeutlichen die Erwartungen, die ein Unternehmen wie Veolia den Umweltwissenschaften entgegenbringt.

Das Forschungsinteresse an nachhaltiger Berufsmobilität bei Michelin

Terry Gettys, Direktor des Bereichs Forschung und Entwicklung, Mitglied des Exekutivausschusses der Michelin-Gruppe

Bei Michelin sind wir seit mehr als einem Jahrhundert davon überzeugt, dass die Mobilität der Personen und Güter für die menschliche und wirtschaftliche Entwicklung unabdingbar ist. Diese Idee war von Anfang an für das Unternehmen von Bedeutung und sie ist heute noch seine Existenzberechtigung : jedem die beste Chance bieten vorwärts zu kommen. Gerade weil Mobilität im Dienst des Menschen steht, ist es notwendig, ihre negativen Auswirkungen, sowohl die gesellschaftlichen als auch die umweltbezogenen, zu begrenzen. Mehr denn je ist dies die Aufgabe, zu deren Bewältigung Michelin beitragen möchte.

Where next for global environmental research? The answer is Future Earth

Corinne Le Quéré, professor and director of the Tyndall Centre for Climate Research, and **Asher Minns**, head of communication for Future Earth Europe at the University of East Anglia, United Kingdom

It is likely that you live in a crowded European city. You want fresh air when you cross the road, you want to see that everyone everywhere has quality of life, you want to know that plants and animals are safe from extinction through local habitat destruction and globally from climate change. This world that we want needs a different type of scientific research to what has gone before. It needs research that can help solve environmental problems as well as better analyse and understand them. Future Earth has been created for scientists across all disciplines to work together with societies' experts to find solutions to the most pressing challenges facing people and the planet. Here we describe this new global organisation called Future Earth and what it wants to achieve in Europe and how.

Eine Dramaturgie der Wissenschaften ?

David Wahl, Schriftsteller, Autor von *La visite curieuse et secrète*

Woher kommt der Hass, den die Menschen lange Zeit gegen die Pinguine empfanden ? Weiß man, dass die Letzteren unter furchtbaren Umständen fast ausgerottet worden wären ? Inwieweit lehrt uns diese Geschichte vieles über die Beziehung des Menschen zu seiner Umwelt ? Wie können aus der Beschäftigung mit wissenschaftlichen Themen Geschichten entstehen, wie können Umweltthemen auf die Bühne gebracht werden, wie bringt man das Publikum zum Staunen und zum Lernen, und teilt mit ihm diese Erfahrung ? Im Anschluss an die Zusammenarbeit mit den Biologen von Océanopolis de Brest, dem Zentrum für die wissenschaftliche und technische Kultur der Ozeane, erzählt ein Autor von seiner Suche nach einer emotionalen Konstruktion des Wissens - und ihrer Vermittlung.

Umweltwissenschaften und Theologie : die exemplarische Bedeutung der Enzyklika *Laudato Si'*

Pater Frédéric Louzeau, Direktor des Forschungszentrums des Collège des Bernardins, Paris

Noch nie, seit ihrer Trennung im Zeitalter der Moderne, ist die Dringlichkeit einer neuen Begegnung zwischen Wissenschaften und Religionen deutlicher geworden als heute. Die Lösungen der Umweltprobleme können aus einer alleinigen und totalisierenden Betrachtung der Realität nicht hervorgehen. Wir prüfen hier die exemplarische Weise, mit der Papst Franziskus in seiner Enzyklika *Laudato Si'* die Ergebnisse der verschiedenen Umweltwissenschaften und den Beitrag des ökologischen Denkens in einen ethischen und spirituellen Diskurs integriert.

Sonderthema

Niedriger Ölpreis und internationale Finanzkrise, ein hochriskantes Verhältnis

Dominique Dron, ingénieure générale des Mines, und **Didier Pillet**, ingénieur en chef des Mines, beide im Conseil général de l'économie tätig

Der Kontext der Weltwirtschaft im Jahre 2016 wird hinsichtlich seiner energetischen und finanziellen Komponenten

oft als außergewöhnlich bezeichnet, denn die Zinssätze sind sehr niedrig oder sogar negativ, die Geldschöpfung wird seit 2008 überreichlich (genannt „quantitative easing“ oder QE) von mehreren Zentralbanken (USA, Europa, Japan) praktiziert, die Ölpreise sind in anderthalb Jahren auf ein Drittel ihres Wertes gestürzt, die öffentlichen Schulden sind durch die Rettung des Bankensystems und ihre deflationistischen Folgen aufgebläht worden, die weltweite Flaute, manchmal „säkulare Stagnation“ genannt, dauert an, und das Abkommen von Paris erkennt die Notwendigkeit an, die Treibhausgasemissionen drastisch zu reduzieren, wie es 2015 von der COP 21 beschlossen wurde. Die Folgen dieser verschiedenen Tatbestände sind zwar in jedem dieser Wirtschaftssektoren oft wohlbekannt, aber ihr ungewöhnliches Zusammentreffen eröffnet neue Perspektiven.

Der Erdölmarkt im Spannungsfeld zwischen Geologie, Wirtschaft und Geopolitik

Olivier Appert, Berater des centre Énergie de l'IFRI, Mitglied der Académie des Technologies

Der Erdölmarkt hängt von geologischen, wirtschaftlichen und geopolitischen Erwägungen ab. Von Anfang an war das Erdöl Gegenstand von erbitterten Auseinandersetzungen, in denen diese drei Dimensionen eng miteinander verflochten waren. Heute ist dies immer noch so : nur die Berücksichtigung dieser drei Faktoren ermöglicht das Verstehen der Marktentwicklung.

Koordinierung der Beiträge von Claire Tutenuit

¿Cuál es el futuro de las ciencias del medioambiente?

Prólogo

Thierry Mandon, Secretario de Estado de Investigación

Introducción

Claire Tutenuit, Delegada General de Empresas para el Medioambiente

1 - La evolución de los conocimientos

Tras la Conferencia de París, ¿cuál es el futuro de las ciencias del clima?

Hervé Le Treut, LMD-IPSL, Universidad Pierre et Marie Curie, París

El acuerdo de la Conferencia sobre el Clima de París, COP 21, ha sido aclamado, a justo título y de forma unánime, como un gran éxito para los negociadores franceses. No obstante, se ha emitido una reserva, también de forma unánime: esta conferencia establece un marco sostenible, pero sobre todo marca el principio más que el fin, y la tarea por cumplir sigue siendo considerable.

El Acuerdo de París representa un momento importante, el que nos hace ir de un periodo de advertencia sobre los riesgos climáticos, en adelante aceptado por todos los Estados, a una fase de búsqueda de soluciones.

Problemas agrícolas, alimentarios, ecológicos y climáticos

Jean-François Soussana, INRA (Instituto Francés de Investigación Agrícola), París

Durante los últimos 50 años, el fuerte crecimiento de la población mundial (que ha aumentado en un 230%) ha sido superado por la producción de alimentos (que ha aumentado en un 300%). Paradójicamente, este aumento cuantitativo no ha permitido alcanzar la seguridad alimentaria y nutricional, ya que la desnutrición crónica afecta a casi 820 millones de personas, al mismo tiempo que 2000 millones sufren de una deficiencia de micronutrientes y 1000 millones corren un mayor riesgo de contraer enfermedades metabólicas crónicas relacionadas con la obesidad. Durante este periodo, el desarrollo de la producción alimentaria mundial es el resultado, en casi un 90%, de la intensificación de la producción agrícola y, en un poco más del 10%, del aumento de las superficies de cultivo y herbazales que han crecido en un 15%. El crecimiento de la producción agrícola ha tenido muchos efectos negativos (deforestación, pérdida de biodiversidad, degradación de suelos, contaminación del agua y del aire, aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero). Tras varias décadas, sus consecuencias son cada vez más importantes hasta el pun-

to de reducir incluso el mismo potencial de producción agrícola.

De la ecología a la ingeniería ecológica

Luc Abbadie y Yann Dusza, Instituto de Ecología y Ciencias del Medioambiente de París, Universidad Pierre et Marie Curie

Restaurar los medios naturales, adaptarlos al cambio climático, controlar los servicios ecosistémicos ofrecidos por la biodiversidad, crear a partir de cero medios como alternativas o complementos a las soluciones de ingeniería técnica, tales son los retos científicos y operativos de la ingeniería ambiental. Apoyándose en los conceptos y teorías de la ecología científica, la ingeniería ecológica intenta destacar algunos de los desafíos de la complejidad ecológica produciendo medios resilientes y evolutivos, capaces de ofrecer servicios ecosistémicos sostenibles.

¿Cuál es el futuro de las ciencias de la biodiversidad?

Pierre-Edouard Guillain, Director de la Fundación para la investigación sobre la biodiversidad, y Jean-François Silvain, Director de investigación en el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Presidente de la Fundación para la Investigación sobre la Biodiversidad (FRB)

Actualmente la pérdida de biodiversidad ya es un hecho, aunque algunos debates demuestren la dificultad de extrapolar de esta observación las consecuencias para la humanidad. En adelante, las ciencias de la biodiversidad se centran principalmente en los mecanismos mediante los cuales se opera la adaptación al cambio global y la definición de escenarios de evolución posibles, que redefinan las relaciones entre las sociedades y los ecosistemas.

El componente de investigación del 3º Plan Nacional de Salud Medioambiental (PNSE 3)

Philippe Hubert, Director de Riesgos crónicos del Ineris (Instituto Francés del Medioambiente Industrial y de Riesgos)

El PNSE 3 es un plan de acción que consta de un centenar de acciones concretas que buscan que cada quien viva en un entorno favorable para la sanidad. Su aplicación implica el mejoramiento de los conocimientos en salud y medioambiente. En el artículo se presentan las propuestas del plan en estos ámbitos. Éstas son muy variadas, desde la calidad del aire hasta los efectos alteradores endocrinos, pasando por los nanomateriales o los campos electromagnéticos. Además, el plan propone un enfoque que integra las diferentes exposiciones ambientales de las personas, con el concepto de exposoma que plantea cuestiones desafiantes en el campo de la investigación.

El lugar de los océanos en las ciencias ambientales

Françoise Gaill, Directora de investigación emérita del CNRS (Centro Francés de la Investigación Científica)

El artículo identifica el océano como un medio importante, aún subvalorado en el ámbito de las ciencias del medioambiente. El texto presenta la aparición de una 'Comunidad del Océano' desde el *Grenelle de la Mer* (Negociación multi-actores en torno al mar) hasta la puesta en marcha del Consejo Nacional de Mar y de Costas (CNML por sus siglas en francés). Se analiza también la evolución del término «océano», su uso, en plural o en singular y su percepción como objeto físico, como medioambiente o como ecosistema y biosfera. El análisis de las interacciones océano-clima se presenta en este artículo como uno de los principales desafíos actuales antes de considerar la validez de la especificidad del medio marino y sus implicaciones científicas. Para estudiar este medio natural, es necesario desarrollar infraestructuras dedicadas: el nuevo concepto de expediciones ligeras (como la de la goleta Tara Océans) están cambiando el paisaje de la exploración marítima. Se plantea también la cuestión de lo que es específico al medio marino. Otro problema del océano es el enorme potencial que representa desde el punto de vista energético, de los recursos minerales y la biotecnología. Por último, se estudia el océano como un bien común, objeto de atención tanto a nivel nacional (Ley Leroy) y europeo (buen estado ecológico y economía azul) como internacional (con el tema de la gobernanza de la alta mar, actualmente en debate en las Naciones Unidas).

El economista frente a los desafíos ambientales

Christian De Perthuis, Profesor de la Universidad Paris-Dauphine, Cátedra Economía del clima

De David Ricardo (1772-1823) a Robert Solow (nacido el 23 de agosto de 1924), el capital natural se representa como un stock de recursos agotables, cuya escasez constituye un obstáculo para el crecimiento. Esta representación no permite comprender los retos derivados de la degradación de los sistemas de regulación naturales, como la erosión de la biodiversidad, la contaminación del aire y del agua, y el calentamiento global. Es necesario superar esta representación estándar para integrar el valor económico aportado por la protección de estos sistemas de regulación. Esto requiere una ampliación de la tarificación ambiental mediante impuestos, mercados de cuotas o una compensación ecológica. La integración del valor ambiental en la economía plantea problemas de redistribución que la política debe abordar a partir de reglas que combinan eficacia y equidad. En este sentido, la cuestión climática proporciona un campo de trabajos prácticos de tamaño real.

¿Cómo transforma el medioambiente la disciplina económica?

Antonin Pottier, CERNA (Centro de Economía Industrial), Mines ParisTech

El texto analiza tres maneras mediante las cuales la consideración de los problemas ambientales transforma (o debería transformar) la disciplina económica, a través

de ejemplos del cambio climático y la pérdida de biodiversidad. En lo referente a los objetivos de las políticas públicas, el cuestionamiento del análisis coste/beneficio permite efectuar análisis con criterios múltiples, que tengan en cuenta una irreductible diversidad de puntos de vista. En cuanto a los medios, la focalización en los instrumentos económicos se ha realizado ignorando su aplicación sobre el terreno. Alcanzar políticas efectivas requiere cerrar la brecha entre la teoría y la práctica. En materia de organización de la disciplina económica, la investigación actual, ampliamente individual, es inadecuada. Afortunadamente, una dimensión más colectiva está surgiendo, en particular gracias a la modelización de sistemas complejos que movilizan grandes equipos de investigadores.

2 - El diálogo entre la ciencia y la sociedad

Calentamiento global, las perspectivas de las relaciones entre ciencia, política y sociedad

Jean Jouzel y Valérie Masson-Delmotte, Laboratorio de Ciencias del Clima y del Medioambiente, Instituto Pierre-Simon Laplace, CEA-CNRS-UVSQ, Universidad París Saclay

El 22 de abril de 2016, 175 países y la Unión Europea firmaban en la Sede de las Naciones Unidas en Nueva York, el Acuerdo de París sobre el clima. Los veinte países ausentes tendrán hasta el 21 de abril de 2017 para estampar su firma. Se trata del primer acuerdo universal sobre el clima. A pesar de la brecha entre las promesas de esos países y el objetivo de una reducción del aumento de la temperatura media del planeta muy por debajo de 2°C, e incluso por debajo de 1,5°C con relación al nivel preindustrial, este carácter universal justifica plenamente el hecho de que la COP 21 sea considerada como todo un éxito. Este logro ha sido posible gracias al compromiso y a los esfuerzos combinados de una comunidad científica casi unánime en su diagnóstico, responsables políticos que han comprendido la importancia de los problemas y muchos actores que forman parte de la sociedad civil. Se analiza en este artículo la manera en que esta sinergia se ha puesto en marcha progresivamente.

El lugar del medioambiente en la estrategia francesa de investigación

François Houllier, Presidente y Director General del INRA y Presidente de la Alianza AllEnvi

Los vínculos entre el medioambiente y el desarrollo han estado en el centro de la agenda internacional últimamente: aprobación de los objetivos del desarrollo sostenible en la cumbre de las Naciones Unidas en Nueva York en septiembre de 2015, Exposición Universal de Milán «Alimentar al mundo - Energía para la vida», 21ª Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en París en diciembre de 2015. La magnitud de las transiciones en curso, ya sean demográficas, alimentarias, climáticas, ambientales o energéticas cuestionan ampliamente las ciencias del medioambiente, las cuales abarcan un vasto espectro

disciplinario. La programación de las investigaciones y el apoyo a sus infraestructuras plantean cuestiones de coordinación y armonización, y ello a todos los niveles, del nacional hasta el global. Con el fin de aclarar las políticas públicas, estas investigaciones se benefician de trabajos de síntesis cuyo objetivo es producir «estados del arte» o predecir los futuros posibles. Pero también están previstos para estimular las innovaciones.

Las controversias científicas en materia de salud y medioambiente

Marc Mortureux, Dirección General de la Prevención de Riesgos (Ministerio de Ecología, Energía y del Mar).

Plaguicidas, nanopartículas, bisfenol A, alteradores endocrinos, OGM u ondas electromagnéticas, estos son algunos ejemplos de temas sobre los cuales existen controversias científicas en lo relacionado con su impacto sobre la salud humana y el medioambiente. ¿En qué se basan dichas controversias? ¿Qué consecuencias tienen en materia de gestión de riesgos? El artículo pretende aportar elementos de respuesta sobre esta problemática, a partir de ejemplos prácticos, basados en la experiencia del autor como director de la Agencia francesa de seguridad sanitaria de la alimentación, el medioambiente y el trabajo (ANSES).

Las expectativas de una empresa como Veolia frente a las ciencias ambientales

Dr Philip Abraham, Director de Investigación e Innovación de Veolia

Veolia apoya a sus clientes en el uso optimizado de los recursos con el fin de aumentar la eficiencia económica, ambiental y social.

Veolia se basa en la innovación y la co-construcción para cumplir con la misión que se ha propuesto, la de «Dar una nueva energía al mundo.»

Gracias a estos dos elementos de acción, las ciencias ambientales contribuyen al desarrollo de soluciones para aumentar el acceso a los recursos naturales esenciales, al mismo tiempo que se preservan y se asegura su renovación.

Para que las empresas puedan beneficiarse de la contribución de estas ciencias, es necesario que estas empresas establezcan objetivos e integren dichas ciencias a su organización. También deben contribuir a la difusión de estas ciencias.

A su vez, una empresa tiene tres expectativas. La primera es poder medir el impacto ambiental de sus actividades. Las otras dos son encontrar nuevas soluciones para reducir estos impactos, y por último, aportar soluciones concretas. A través de algunos ejemplos se ilustrarán estos diferentes elementos que determinan los hábitos y expectativas de una empresa como Veolia en materia de ciencias ambientales.

Una investigación orientada por la movilidad sostenible. El caso de Michelin

Terry Gettys, Director de Investigación y Desarrollo, miembro del Comité Ejecutivo del Grupo Michelin

Hace más de un siglo que Michelin cree que la movilidad de personas y bienes es indispensable para el desarrollo

humano y económico. Esta idea ya estaba presente durante los orígenes de la empresa y, aún hoy, forma parte de su razón de ser: ofrecer a cada quien una mejor manera de avanzar. Precisamente porque la movilidad está al servicio del hombre es necesario limitar los impactos negativos tanto en el plano social como medioambiental. Más que nunca, éste es el desafío que Michelin quiere enfrentar.

Where next for global environmental research? The answer is Future Earth

Corinne Le Quééré, professor and director of the Tyndall Centre for Climate Research, and **Asher Minns**, head of communication for Future Earth Europe at the University of East Anglia, United Kingdom

It is likely that you live in a crowded European city. You want fresh air when you cross the road, you want to see that everyone everywhere has quality of life, you want to know that plants and animals are safe from extinction through local habitat destruction and globally from climate change. This world that we want needs a different type of scientific research to what has gone before. It needs research that can help solve environmental problems as well as better analyse and understand them. Future Earth has been created for scientists across all disciplines to work together with societies' experts to find solutions to the most pressing challenges facing people and the planet. Here we describe this new global organisation called Future Earth and what it wants to achieve in Europe and how.

¿Una escenificación de las ciencias?

David Wahl, escritor, autor de *La Visite curieuse et secrète*

¿De dónde proviene el odio que los hombres han sentido durante mucho tiempo hacia los pingüinos? ¿Se sabe que estos casi desaparecen en circunstancias horribles? ¿En qué medida esta historia nos enseña una lección sobre la relación del hombre con su entorno?

¿Cómo apropiarse de las ciencias para obtener historias, transportar un cuestionamiento ambiental al teatro, compartir con el público su sorpresa y sus investigaciones?

A raíz de una colaboración con los biólogos de Océanopolis de Brest, centro de cultura científica y técnica de los océanos, el autor narra su búsqueda de una construcción emocional del saber y su transmisión.

Ciencias ambientales y teología, el caso ejemplar de la encíclica *Laudato Si'*

Padre Frédéric Louzeau, Director del Centro de Investigación del Collège des Bernardins, París

Nunca antes, tras su separación moderna, la urgencia de una nueva reunión entre ciencias y religiones había parecido tan evidente como en nuestros días. Las soluciones a problemas ambientales no pueden proceder de una mirada única y totalitaria sobre la realidad.

El texto examina la manera ejemplar en que el Papa Francisco, en su encíclica *Laudato Si'* publicada el 18 de junio de 2015, integra en una trayectoria ética y espiritual los resultados de las diversas ciencias ambientales y el aporte del pensamiento ecológico.

Otros temas

Bajos precios del petróleo y crisis financiera internacional, una pareja de alto riesgo

Dominique Dron, Ingeniera general de minas, y **Didier Pillet**, Ingeniero en jefe de minas, ambos funcionarios del Consejo General de la Economía

El contexto de 2016 de la economía mundial, en sus componentes energéticos y financieros, se ha calificado frecuentemente como excepcional, con tasas de interés muy bajas o incluso negativas, una creación monetaria excesiva desde 2008 (denominada «*quantitative easing*» o QE) por parte de varios bancos centrales (americano, europeo, japonés), el colapso de los precios del petróleo a un tercio de su valor en un año y medio, las deudas públicas aumentadas por el salvamento del sistema bancario y sus consecuencias deflacionarias, una incertidumbre económica mundial considerada como el «estancamiento del siglo» y el Acuerdo de París, que reconoce la necesidad de una reducción drástica de las emisiones de gases

de efecto invernadero aprobada en 2015 por la COP 21. Ahora bien, aunque todos los sectores de la economía conocen bien las consecuencias de estos hechos, su combinación inédita abre nuevas perspectivas.

El mercado petrolero entre geología, economía y geopolítica

Olivier Appert, Asesor del Centro de Energía del IFRI (Instituto Francés de Relaciones Internacionales), miembro de la Academia de Tecnologías

El mercado del petróleo depende de factores geológicos, económicos y geopolíticos. Desde el origen de su explotación, el petróleo ha suscitado polémicas que implican estas tres dimensiones, las cuales están estrechamente interconectadas. Hoy en día sigue siendo el caso. Sólo la toma en cuenta de todas estas dimensiones permite comprender la evolución del mercado.

El dossier ha sido coordinado por Claire Tutenuit

ABBADIE Luc

Luc Abbadie est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, où il enseigne l'écologie générale, l'écologie fonctionnelle et la biogéochimie. Il a été directeur scientifique adjoint à l'Institut écologie-environnement du CNRS et est actuellement directeur de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris (UPMC, UPEC, UPDD CNRS, IRD, INRA). Il a conduit des travaux de recherche sur les cycles du carbone et de l'azote, ainsi que sur le fonctionnement des sols et des écosystèmes, notamment dans la zone tropicale. Il est à l'initiative de nombreux travaux interdisciplinaires en ingénierie écologique ; il pilote actuellement un ensemble de recherches en écologie urbaine. Il a publié plus d'une centaine d'articles dans des revues internationales et des ouvrages, et il est auteur ou co-auteur de quatre ouvrages.

ABRAHAM Philip



D.R

Actuellement directeur de la Recherche & Innovation de Veolia, Philip Abraham est titulaire d'une maîtrise et d'un doctorat en chimie organométallique, ainsi que d'une maîtrise en droit de l'environnement. Avant de rejoindre Veolia il y a de cela 15 ans, Philip Abraham a travaillé durant 12 ans en tant qu'enseignant et chercheur en Inde et en Australie.

Avant d'être nommé en 2007 directeur Qualité, hygiène, sécurité et environnement de Veolia Environnement Services à Paris, Philip Abraham a travaillé, toujours au sein du groupe Veolia, en Australie, dans le secteur du traitement des déchets dangereux et dans les domaines de la sécurité, de la santé, de l'environnement et de la gestion des risques.

Il a également occupé divers postes de direction aussi bien dans le domaine technique que dans ceux de la performance, des relations institutionnelles, du développement durable et de la stratégie.

En 2014, il est nommé directeur de la R&I, une direction à laquelle sont rattachés 6 centres de recherche, 3 plateformes d'essais et plus de 250 centres pilotes répartis dans le monde. La R&I coordonne également les activités d'innovation en interne et celles d'*Open innovation*.

APPERT Olivier



D.R

Olivier Appert préside le Conseil français de l'énergie, le comité français du Conseil mondial de l'énergie. Il est délégué général de l'Académie des technologies et est conseiller du centre Énergie de l'IFRI.

Ancien élève de l'École polytechnique, ingénieur général des Mines, Olivier Appert a commen-

cé sa carrière au sein du service des Mines de Lyon, puis a occupé différents postes au ministère de l'Industrie et au cabinet du Premier ministre. En 1987, il a pris en charge la responsabilité de l'activité radiocommunication mobile au sein de la société Télécommunications Radioélectriques et Téléphoniques (TRT). En 1989, il est nommé directeur des Hydrocarbures au ministère de l'Industrie, puis, en 1994, il rejoint la direction de l'IFP, où il est notamment en charge de la recherche et développement ainsi que de la filiale de cette direction, une holding technologique cotée en Bourse. En octobre 1999, il est nommé directeur de la Coopération long terme et de l'Analyse des politiques énergétiques au sein de l'Agence internationale de l'Énergie (AIE). De 2003 à avril 2015, il a été président-directeur général de l'IFP Énergie nouvelles.

DE PERTHUIS Christian



©Hervé Thouroude

Professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine, Christian de Perthuis a commencé sa carrière en exerçant dans le secteur agricole, puis il a occupé des fonctions de direction dans les instituts Rexecode et Bipe. Il a dirigé la « Mission climat » de la Caisse des Dépôts, puis il a fondé la chaire « Économie du climat » à l'Université Paris-Dauphine. Il a assuré la présidence du comité pour la Fiscalité écologique,

dont les propositions ont abouti à l'instauration d'une taxe carbone dans la fiscalité française. Christian de Perthuis est l'auteur d'une dizaine d'ouvrages, dont un roman : *Le Complot climatique* (aux Éditions L'Harmattan, 2014). Ses deux derniers essais sont : *Le Climat, à quel prix ? La négociation climatique* (Odile Jacob, 2015) qu'il a co-écrit avec Raphaël Trotignon, et *Green Capital a New Perspective on Growth* (Columbia University Press, 2015), œuvre conjointe avec Pierre-André Jouvét.

DRON Dominique

Dominique Dron est ingénieure générale des Mines et est agrégée de Sciences naturelles. Précédemment directrice générale déléguée de l'Ifremer, puis Commissaire générale au Développement durable, elle est aujourd'hui membre du Conseil général de l'économie (CGEJET) du ministère de l'Économie, de l'Industrie et du Numérique.

DUSZA Yann

Doctorant à l'Université Pierre et Marie Curie, Yann Dusza exerce au sein de l'Institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris. Diplômé de l'UPMC et de Sciences-Po (Paris), il travaille sur le fonctionnement des toitures végétalisées et sur la dynamique des services écosystémiques associés. Ses travaux de recherche portent sur la définition de nouvelles méthodes de conception et de gestion de toitures végétalisées multifonctionnelles, à travers l'étude des interactions entre les composantes vi-

vantes et non-vivantes de ces micro-écosystèmes. C'est à l'échelle de la ville et du bâti qu'il met en application son approche de l'ingénierie écologique.

GAILL Françoise



D.R

Docteur es sciences, Françoise Gaill est directrice de recherche émérite au CNRS. Spécialiste des écosystèmes profonds et de l'adaptation aux milieux extrêmes, Françoise Gaill exerce actuellement en qualité de conseiller scientifique auprès de l'Institut Écologie Environnement au CNRS, dont elle a été auparavant la responsable. Françoise

Gaill a également présidé le comité opérationnel Recherche et innovation du Grenelle de la Mer et le conseil scientifique et stratégique de la Flotte océanographique française. Elle coordonne aujourd'hui les travaux du comité scientifique de la Plateforme Océan Climat et préside le Comité pour la recherche marine, maritime et littoral (COMER) du Conseil national de la mer et des littoraux.

GETTYS Terry



D.R

Terry K. Gettys est titulaire d'un diplôme universitaire de premier cycle en génie mécanique (1978) et d'un diplôme universitaire de deuxième cycle (1979) de l'Université de Clemson, en Caroline du Sud (États-Unis).

En décembre 1979, il rejoint le centre nord-américain de Recherche et Développement de Michelin en tant qu'ingénieur méthodes et essais sur le site de tests de Laurens (le complexe ultramoderne de pistes d'essais situé dans le nord de la Caroline du Sud, aux États-Unis), avant d'intégrer l'équipe Développement produits en octobre 1982.

Il a également occupé différents postes au sein des centres de R&D Produits en Amérique du Nord et en France (à Ladoux), il a été notamment le directeur général de Michelin Americas Research Company (nomination intervenue en mai 2002).

Depuis mai 2007, Terry K. Gettys est directeur de la Recherche et du Développement au sein du groupe Michelin et est également membre du comité exécutif de ce même groupe.

GUILLAIN Pierre-Édouard



D.R

Pierre-Édouard Guillain est ingénieur de l'Institut agronomique Paris-Grignon (INA-PG) et est ingénieur en chef des ponts, des eaux et forêts (ENGREF). Il a été chef du département Marketing et commercial à la direction gé-

nérale de l'Office national des forêts, avant d'occuper les fonctions de chef du bureau de la Connaissance et de la Stratégie nationale pour la biodiversité au ministère chargé de l'Écologie (direction de l'Eau et de la Biodiversité).

HOULLIER François

Président d'AllEnvi (Alliance nationale de recherches pour l'environnement), François Houllier est, depuis juillet 2012, président-directeur général de l'INRA. Depuis 1998, il y a occupé les fonctions de : directeur de l'UMR Botanique et bioinformatique de l'architecture des plantes ; chef du département Écologie des forêts, prairies et milieux aquatiques ; directeur scientifique Plantes et produits du végétal ; directeur général délégué en charge de la science. Ancien élève de l'École polytechnique et de l'École nationale du génie rural, des eaux et forêts (ENGREF, aujourd'hui AgroParisTech), François Houllier est titulaire d'un doctorat et d'une habilitation à diriger des recherches de l'Université Claude Bernard (Lyon). Ses recherches ont porté sur la modélisation des forêts et des plantes. Après être resté en poste pendant quelques années à l'Inventaire forestier national (aujourd'hui l'IGN), puis à l'ENGREF, il a été en charge de la direction de l'Institut français de Pondichéry (Inde). De 2004 à 2006, il a présidé l'Institut forestier européen (EFI).

HUBERT Philippe



D.R

Philippe Hubert est directeur des Risques chroniques de l'Institut de l'environnement industriel et des risques (INERIS). Il est responsable des travaux d'étude des impacts sur l'homme et l'environnement des activités polluantes et des substances chimiques, au travers d'études sur le terrain, de la conception de modèles et d'activités expérimentales.

Au titre de ses activités professionnelles antérieures, il a été amené à exercer le même type d'activités dans le domaine des rayonnements ionisants au sein de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, réalisant des études sur les impacts d'expositions à des radiations d'origine anthropique ou naturelle, et des recherches en épidémiologie, notamment dans des territoires pollués suite à des catastrophes nucléaires.

JOUZEL Jean

Jean Jouzel est directeur de recherche émérite au CEA, organisme dans lequel il a réalisé l'essentiel d'une carrière scientifique largement consacrée à la reconstitution des climats du passé à partir de l'étude des glaces de l'Antarctique et du Groenland. Il a participé en tant qu'auteur principal à la rédaction des deuxième et troisième rapports du GIEC (organisme auquel a été remis, conjointement avec Al Gore, le Prix Nobel de la Paix en 2007). De 2002 à 2015, il a été vice-président du groupe de travail scientifique de ce même GIEC. Depuis 2011, il est membre du Conseil économique, social et environnemental (CESE). Il est l'au-

teur de plus de 400 publications, dont près de 300 ont été publiées dans des revues internationales à comité de lecture. En 2002, il a reçu, conjointement avec Claude Lorius, la médaille d'or du CNRS. En 2012, il a été attributaire du Prix de la Fondation Albert II de Monaco et du Prix Vetlesen. Depuis 2016, il est membre étranger de l'Académie des sciences des États-Unis (NAS).

LE QUÉRÉ Corinne



D.R

Professor Corinne Le Quéré is Director of the Tyndall Centre for Climate Change Research and Professor of Climate Policy and at the University of East Anglia. She was elected a Fellow of the Royal Society of Great Britain in 2016 and joined the UK Government's advisory Committee on Climate Change in 2016. Her research is on the interactions between climate change and the carbon cycle, she has been an author of three assessment reports for the Intergovernmental Panel on Climate Change, and is a member of the Scientific Committee of Future Earth. She is a founder and co-Director of the Global Carbon Project whose annual update of the global carbon budget is each year used to support research and policy on climate change. Prof Le Quéré is originally from Canada. She completed a Ph.D. in oceanography in University Paris VI, an M.S. in Atmospheric and Oceanic Sciences from McGill University and a B.Sc. in physics from University of Montréal. She has conducted research at Princeton University in the United States and at the Max-Planck Institute for Biogeochemistry in Germany.

LE TREUT Hervé



D.R

Ancien élève de l'ENS Ulm et titulaire d'un doctorat ès-sciences portant sur la modélisation de l'atmosphère et des océans, Hervé Le Treut est professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, en détachement du CNRS. Il exerce également en qualité de professeur de mécanique à l'École polytechnique. Il dirige l'Institut Pierre Simon Laplace,

une fédération qui regroupe 9 laboratoires se consacrant à l'étude de l'environnement global de la planète ; en région parisienne, ce sont près de 1 400 personnes qui sont mobilisées.

Hervé Le Treut s'est pour sa part intéressé à l'étude des perturbations radiatives du climat et, plus particulièrement, aux conséquences induites par une augmentation anthropique des gaz à effet de serre. Il a progressivement élargi son domaine de recherche aux impacts des changements climatiques sur la biosphère, mais aussi à leurs incidences en matière socio-économique. Il a consacré beaucoup de son temps à la sensibilisation à ces enjeux,

notamment en développant des actions de communication à destination de divers acteurs – en particulier dans le cadre d'un projet collectif en Aquitaine.

Hervé Le Treut a été membre du conseil scientifique joint du Programme mondial de recherches sur le climat, et du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution des climats. Il est membre de l'Académie des sciences.

LOUZEAU Frédéric



D.R

Ingénieur civil des Mines de Paris (promotion 1987), prêtre du diocèse de Paris (1998) et docteur en philosophie politique (EHESS) et théologie, Frédéric Louzeau est professeur titulaire de théologie morale sociale à la Faculté Notre-Dame et est directeur du Pôle de recherche du Collège des Bernardins (Paris). Il est membre ordinaire de l'Académie pontificale de théologie (Rome). Ses champs de recherche portent principalement sur l'anthropologie sociale, la philosophie politique et la théologie chrétienne du politique, la doctrine sociale de l'Église. Il a publié *L'anthropologie sociale du Père Gaston Fessard* (PUF, 2009). Il vient de fournir une édition introduite, révisée et augmentée d'*Autorité et Bien commun* du père Gaston Fessard (Ad Solem, 2015).

MASSON-DELMOTTE Valérie



D.R

Directrice de recherche au CEA, ses recherches portent (ou ont porté) sur la compréhension des changements passés du climat et du cycle de l'eau, au travers d'une approche d'observations actuelles, de reconstitutions issues d'archives naturelles du climat (glaces, cernes d'arbres) et de modélisations. Elle a été l'auteur principal du 4^{ème} rapport du

GIEC, l'auteur coordinateur principal du 5^{ème} rapport du GIEC et est co-présidente du groupe de travail I (« Physique du climat ») instauré dans le cadre de l'élaboration du 6^{ème} rapport du GIEC. Elle est co-auteur de 200 publications parues dans des revues internationales à comité de lecture (<http://www.researcherid.com/rid/G-1995-2011>). Elle a été attributaire de plusieurs prix scientifiques collectifs (Académie des sciences, Commission européenne) ainsi que du Prix Irène Joliot Curie (Femme scientifique, 2013) et du Prix Tinker-Muse pour ses travaux sur l'Antarctique (2015). Elle est membre du Conseil stratégique de la recherche depuis 2014.

MINNS Asher

Asher Minns is Head of Communication for Future Earth Europe at the Tyndall Centre for Climate Change Research at the University of East Anglia. He is a science communicator who specialises in knowledge transfer of climate



D.R

change research to audiences that are outside of academia and capacity builds the communication and engagement knowhow of researchers in many countries. Asher is interdisciplinary with degrees in humanities, in ecology, and is also a qualified Radar Engineer. He has worked for Imperial College, Oxford University, the Tyndall Centre Headquarters

at the University of East Anglia, as well as in the Private Sector.

MORTUREUX Marc



© Bertrand Holsnyder

Ingénieur des mines, Marc Mortureux a été nommé fin 2015 directeur général de la Prévention des risques (DGPR) au ministère de l'Environnement, après avoir dirigé pendant six ans l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses). Il a exercé de nombreuses responsabilités dans le privé et le public,

notamment au sein de la Compagnie générale de géophysique (secteur para-pétrolier), au sein du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) ou bien encore de l'Institut Pasteur. Il a dirigé le cabinet du secrétaire d'État à l'Industrie et à la Consommation entre 2008 et 2009. Il est par ailleurs membre de l'Académie des technologies. À la DGPR, Marc Mortureux a la responsabilité de définir et de mettre en œuvre la politique de prévention des risques naturels (inondations, séismes, avalanches, mouvements de terrain, feux de forêt...) et des risques technologiques (installations classées pour la protection de l'environnement, sites et sols pollués, anciens sites miniers), mais il est également en charge de la sûreté nucléaire, de l'économie circulaire et de la gestion des déchets, ainsi que de la santé environnementale (expositions aux produits chimiques et pollutions environnementales).

PILLET Didier

Après avoir exercé plusieurs fonctions opérationnelles de R&D dans le secteur industriel, Didier Pillet, ingénieur en chef des Mines et diplômé de Télécom Paris Tech, a intégré en 2009 le Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies (CGE). Au sein du CGE, il effectue des missions ministérielles ou interministérielles d'expertise, d'audit et d'inspection, liées notamment à l'industrie, à l'énergie et au développement durable.

POTTIER Antonin

Ancien élève de l'École normale supérieure, ingénieur des Mines, Antonin Pottier se consacre aux questions énergétiques et environnementales. Il a soutenu, en 2014, à



D.R

l'École des hautes études en sciences sociales une thèse en économie de l'environnement. Chercheur au Cerna, le centre d'économie industrielle de l'École de Mines ParisTech, ses recherches portent sur les aspects socio-économiques du changement climatique, l'intégration de l'environnement dans la discipline économique et, plus

généralement, sur les interactions entre l'économie, la société et l'environnement.

SILVAIN Jean-François

Directeur de recherche à l'IRD, Jean-François Silvain a été nommé président de la Fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB) le 24 avril 2014, après avoir été président du conseil scientifique de cette même Fondation de 2008 à 2013. Ses travaux de recherche et ses publications portent sur la diversité, l'écologie et la biogéographie des insectes tropicaux, la faunistique moléculaire, la systématique moléculaire et la phylogénie des insectes phytophages tropicaux. Il s'intéresse aussi à l'étude des interactions évolutives entre ces insectes et leurs plantes-hôtes, à la génétique des populations et à la phylogéographie de différentes espèces, autochtones ou invasives, et, plus généralement, à l'étude des mécanismes de spéciation chez les insectes phytophages.

SOUSSANA Jean-François

Depuis 2010, Jean-François Soussana est directeur scientifique « Environnement » à l'INRA (Paris). Il a obtenu un doctorat en physiologie végétale à l'USTL Montpellier en 1986, après l'obtention d'un diplôme d'ingénieur agronome. Depuis 1998, il est membre du groupe de travail II du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur le climat) sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité. Il a été l'auteur principal des troisième, quatrième et cinquième rapports d'évaluation du GIEC dans le domaine de l'agriculture, des forêts et des écosystèmes. Il a contribué à la réalisation d'expertises scientifiques pour la FAO et a coordonné plusieurs projets européens de recherche sur le changement climatique et l'agriculture. Jean-François Soussana a également présidé le comité scientifique national « Écosystèmes et développement durable » pour l'Agence nationale de la recherche française (ANR), ainsi que le Conseil scientifique de l'initiative de programmation conjointe sur l'agriculture, la sécurité alimentaire et le changement climatique (FACCE JPI, programme auquel participent 21 pays). Il dirige également un des groupes de l'Alliance mondiale de recherche sur les gaz à effet de serre agricoles (alliance qui regroupe 46 pays) et est co-président du programme international AgMIP relatif à la modélisation des impacts du changement climatique sur l'agriculture. En 2015, il a présidé le comité scientifique de la troisième « Conférence mondiale sur l'agriculture intelligente face au climat » et a été l'un des organisateurs de la conférence scientifique « Notre avenir

commun face au changement climatique ». Jean-François Soussana a publié plus de 140 articles de recherche dans des revues internationales à comité de lecture. Il est également l'auteur de deux livres et d'une douzaine de chapitres de livres.

WAHL David



© Giovanni Cittadini Cesi

Après avoir travaillé avec des metteurs en scène, des chorégraphes ou des cinéastes, parmi lesquels Julie Bérès, Lucas Manganelli, Damien Odoul ou bien encore Caterina Gozzi, David Wahl se consacre désormais à l'écriture et à l'interprétation de « Causeries », des récits au travers desquels il cherche à approfondir des liens entre des mondes

trop souvent distants : théâtre et science, recherches savantes et récits populaires, savoirs et curiosités. Soutenu et produit par Le Quartz-scène nationale de Brest, il a écrit avant de les présenter lors de tournées : *Le Traité de la boule de cristal* (2014), *La Visite curieuse et secrète* (en partenariat avec Océanopolis, 2014) et *Histoire spirituelle de la danse* (création pour le Festival DañsFabrik, 2015). Ces textes sont édités aux Éditions Riveneuve/Archimbaud.

Par ailleurs, David Wahl anime de nombreux ateliers d'écriture, de mise en scène et de dramaturgie, aussi bien dans des lycées que dans des établissements d'enseignement supérieur.