Atelier de Réflexion Prospective

Changements Environnementaux Planétaires

Rapport de restitution finale des travaux de l'ARP CEP

Projet conduit sous la direction de Hervé Le Treut

Sous la responsabilité éditoriale de Estelle Fournel

Comité National Français du Changement Global (CNFCG) de l'Académie des Sciences

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR

cnrs INSU Institut national des sciences de l'Univers

Remerciements

Ce document est le fruit d'un travail collectif et de rencontres qui ont rassemblé des chercheurs de nombreuses disciplines différentes. Nous souhaitons remercier l'ensemble de ces personnes pour leur intérêt, leur participation et leur implication. En particulier, nous exprimons notre gratitude aux animateurs des thèmes, qui se sont fortement investis dans l'Atelier de Réflexion Prospective, souvent avec des contraintes de temps difficilement compatibles avec leurs charges de travail et leurs responsabilités.

Nous sommes particulièrement reconnaissants à l'Académie des Sciences d'avoir accordé un espace de travail collaboratif sur son site extranet pour y échanger les réflexions issues de l'ARP CEP et d'en permettre la diffusion en hébergeant son site internet.

Nous remercions très chaleureusement Monsieur Jean Dercourt, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, pour le soutien que l'Académie a ainsi apporté à des recherches qui s'inscrivent dans le cadre « Sciences et Société ». Nous avons été très touchés qu'il nous fasse l'honneur de sa présence lors du Colloque de restitution finale.

Nous adressons nos sincères remerciements à l'Agence Nationale de la Recherche, qui a financé cet Atelier et a ainsi permis, nous l'espérons, de proposer des éléments de programmation scientifique susceptibles d'amener à une vision plus systémique et intégrée sur les Changements Environnementaux Planétaires et de contribuer à l'émergence d'un réseau de chercheurs sur ces thèmes. Nous remercions particulièrement Monsieur Philippe Freyssinet, Responsable du Département Energie Durable et Environnement à l'ANR, et Madame Catherine Courtet, Coordinatrice Scientifique pour le Département Sciences Humaines et Sociales de l'ANR, pour leur soutien et leur implication tout au long du processus de réflexion mené par les participants. Nous avons vivement apprécié la confiance et la grande liberté intellectuelle d'action qu'ils nous ont accordées pour réaliser ce travail.

Notre gratitude va également à Monsieur Robert Delmas, Président du Comité National Français sur le Changement Global, pour son soutien indéfectible à l'ARP CEP et ce, dès l'origine.

L'Institut National des Science de l'Univers (INSU) du CNRS a été chargé par l'ANR de la coordination cet Atelier et ses personnels administratifs ont assuré la bonne gestion financière et logistique de l'ARP. Qu'ils en soient vivement remerciés.

Hervé Le Treut
Estelle Fournel
Pierre Friedlingstein
Patrick Monfray
Michel Vauclin

Présentation générale

Atelier de Réflexion Prospective
Changements Environnementaux Planétaires

L'Atelier de Réflexion Prospective s'intéresse aux problématiques liées aux Changements Environnementaux Planétaires à travers quatre thèmes: (1) Aménagement du territoire et utilisation des sols, (2) Ecosystèmes, biodiversité et vulnérabilité du vivant (continental et marin), (3) Ressources en eau, sol et alimentation globale et (4) Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales. Son objectif est de contribuer à l'élaboration et à la réalisation d'un programme de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et d'en définir les principales composantes en se fondant sur une synthèse de l'état de l'art sur ces thématiques à l'international, en Europe et en France et sur l'identification des besoins majeurs de recherches fondamentales dans ces domaines.

Organisation de l'ARP

Le projet est mené par un consortium qui réunit des experts issus de différents organismes publics et privés menant des actions de recherche sur les thématiques du changement environnemental global. Ce consortium est piloté par une équipe de coordination.

Coordination :

Responsable de l'ARP :
Hervé LE TREUT (Membre de l'Académie des Sciences et du CNFCG, Directeur de recherche au CNRS, Professeur à l'École Polytechnique, Directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace)

Estelle FOURNEL (Chargée d'animation scientifique ARP/CEP, CNRS/INSU)
Pierre FRIEDLINGSTEIN (Chargé de Mission CNRS/INSU, LSCE/IPSL)
Patrick MONFRAY (Directeur Adjoint Scientifique Océan-Atmosphère, CNRS/INSU)
Michel VAUCLIN (CNRS-LTHE/INSU)
Avec l'appui de : **Robert DELMAS** (CNFCG, MESR), **Pascale EBNER** (CNRS/INSU)

Responsables des 4 thèmes :

(1) Aménagement du territoire et utilisation des sols – **Stéphane Hallegatte** (Météo France, CIRED) et **Claude Millier** (AgroParisTech)
(2) Ecosystèmes, biodiversité et vulnérabilité du vivant (continental et marin) – **Wolfgang Cramer** (PIK, EDD)**, Anne Larigauderie** (DIVERSITAS) et **Olivier Maury** (IRD)
(3) Ressources en eau, sol et alimentation globale – **Pierre Chevallier** (IRD, ILEE) et **Christine King** (BRGM)
(4) Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales – **Amy Dahan** (CNRS, Centre Alexandre Koyré) et **Pierre Matarasso** (CNRS, INEE)

Membres du consortium:

Le consortium était constitué initialement de 32 membres :

Pierre Baillet
Gilles Bergametti
Nadine Brisson
Pierre Chevallier
Wolfgang Cramer
Patrick Criqui
Diane D'Arras
Robert Delmas
Hervé Domenach
Pierre Friedlingstein
Christian France-Lanord
Marc Gillet
Philippe Gros
Stéphane Hallegatte
Jean-Charles Hourcade
Bernard Itier
Jean-Marc Jancovici
Pierre-Alain Jayet
Christine King
Anne Larigauderie
Hervé LeTreut
Daniel Martin
Pierre Matarasso
Olivier Maury
Pierre Mazzega
Claude Millier
Patrick Monfray
Jean-Marie Mouchel
Thierry Phulpin
Denis Salles
Pierre Soler
Michel Vauclin

Participants à l'ARP CEP:

L'Atelier, ouvert à l'ensemble des experts désireux de participer à la réflexion, s'est élargi au cours du temps. 96 participants ont rejoint les 32 membres du consortium de départ :

Luc Abbadie
Johann Audrain
Olivier Aumont
René Bally
Magalie Baudrimont
Gérard Blanc
Nathalie Blanc
Anne Blanchard
Philippe Boët
Alberte Bondeau
Laurent Bopp
Philippe Bosse
Eric Brun
Hélène Budzinski
Jérôme Cachot
Nicolas Capelli
Marie-Louise Cariou
François Carlotti
Laurent Carozza
Florence Carré
Robert Chenorkian
Michel Colombier
Denis Couvet
Renaud Crassous
Amy Dahan
François-Joseph Daniel
Didier Dargone
Jean-Jacques Delannoy
Pascale Delecluse
Yves Dessaux
Michelle Dobré
Hervé Domenach
Nathalie Dorfliger
Bruno Dorin
Christophe Emblanch
Jean-Pierre Féral
Emmanuel Garnier
Anne Gassiat
Franck Gilbert
Sylvie Gourlet-Fleury
Françoise Gourmelon
Jean-Marc Guarini
Hélène Guillemot
Marie-Françoise Guyonnaud
Denis Hilton
Thomas Houet
Sylvie Joussaume
Yvan Lagadeuc
Fatima Laggoun-Defarge
Jean Laterrasse
Xavier Lazzaro
Gonéri Le Cozannet
Louis Legendre
Sovan Lek
Xavier Leroux
Xavier Litrico
Pierre-Yves Longaretti
Thuriane Mahé
Jean Margat
Marc-Antoine Martin
Doyle McKey
Frédéric Médail
Marie-Antoinette Mélières
Catherine Ottle
Dominique Parent-Massin
Edith Parlanti
Frédéric Patras
Serge Planton
Patrick Point
Roland Poss
Bernard Pouyaud
Charles Raux
Vanessa Richard
Isabelle Rico-Lattes
Marc Robin
Philippe Rogel
Dominique Rollin
Jean-Luc Salagnac
Michel Salzet
Benoît Sautour
Jean-François Silvain
Benjamin Sultan
Laurent Terray
Sébastien Treyer
Marc Troussellier
Moïse Tsayem
Ronan Uhel
Jean-Paul Vanderlinden
Kees Van't Klooster
Sébastien Velut
Julien Vert
Philippe Vervier
Daniel Vidal-Madjar
Jérôme Viers
Nicolas Viovy
Christiane Weber
Yves-Charles Zarka

Résumé du projet ARP soumis à l'ANR (Juillet 2008):

L'Atelier « Changements environnementaux planétaires » (CEP) est un consortium d'experts issus de différents organismes publics ou privés menant des actions de recherche sur le changement global. Il est piloté par Hervé Le Treut, de l'Académie des Sciences et du Comité National Français sur le Changement Global (CNFCG), représentant français du programme international Earth System Science Partnership (ESSP). Ses membres forment un groupe éminemment pluridisciplinaire, recouvrant les sciences du climat, de la physico-chimie, de l'écologie, de l'agronomie, de la biogéochimie, de l'économie, des sciences sociales, humaines et politiques. Afin de fournir à l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) les éléments lui permettant de proposer un programme de recherche sur cette thématique, le consortium a identifié 4 thèmes :

1- Aménagement du territoire et utilisation des sols,
2- Ecosystèmes, biodiversité et vulnérabilité du vivant (continental et marin),
3- Ressources en eau, en sol et alimentation globale,
4- Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales

Pour chacun de ces thèmes, l'objectif est d'avoir une vision à la fois multidisciplinaire, globalisante et systémique. L'accent est également mis sur l'agrégation des politiques jusqu'à l'échelle globale, mais aussi sur l'agrégation des politiques interdisciplinaires, parfois antagonistes. Les approches traditionnelles se focalisant sur une discipline, ou ne voyant le changement global que comme une « condition limite » du problème, traitées dans des appels à projets antérieurs (e.g. ANR-VMCS, GICC) ne sont pas reprises ici.

La finalité de l'Atelier de Réflexion Prospective CEP est de contribuer à la préparation d'un futur programme de l'Agence Nationale de la Recherche et d'en définir les principales composantes en se fondant d'une part sur une synthèse de l'état de l'art de la recherche dans ces thématiques à l'international, en Europe et en France, et d'autre part, sur l'identification des besoins majeurs en recherche fondamentale et appliquée dans ces domaines.

Summary of the ARP proposal submitted to ANR (July 2008):

« Global Environmental Changes » (GEC) is a group of scientists, with a very broad range of expertise, from public and private organizations, leading global change research activities. It is managed by Hervé Le Treut, from the French Academy of Sciences and CNFCG (French National Committee on Global Change) which is the French body representative of the Earth System Science Partnership (ESSP) international program. The members of the consortium are highly multidisciplinary, with expertise in physics and chemistry, ecology, agronomy, biogeochemistry, economy, human and social sciences. In order to provide the French National Agency of Research (ANR) with the capability to launch a research program on GEC, the consortium identified four main themes that will be investigated within this ARP:

1- Land management
2- Biodiversity and marine and land ecosystem vulnerability
3- Water and soil resources and global food security
4- Global development alternatives under environmental constraints

For each of these themes, the group will adopt a multidisciplinary, global and systemic approach. The focus is put on the policy aggregation up to the global scale, but also on aggregation of policies from different and potentially conflicting angles. Traditional

approaches have been tackled in previous ANR or GICC calls, and hence, will not be investigated here.

The aim of the ARP is to contribute to the elaboration of a future ANR program, to define the key components based on both a survey on the state of the art of the French, European and international research in the field of GEC, and on the identification of the major areas of fundamental and applied research which are needed to be developed.

Fonctionnement de l'ARP

De nombreux travaux permettant d'améliorer les connaissances sur le changement global ont été réalisés par différentes communautés scientifiques, mais souvent de façon indépendante. La finalité de l'ARP est de proposer des éléments de programmation scientifique susceptibles d'accéder à une vision plus systémique et intégrée. Les différentes communautés scientifiques représentées au sein des différents groupes de travail leur permettent d'aborder les thématiques sous des angles variés et d'en établir ainsi une vision globale des sujets à mettre en exergue dans la programmation de l'ANR.

L'ARP se devait également d'identifier, de proposer et de construire des objets sur lesquels une approche intégrée du Système Terre considéré pouvait se mettre en place.

Bien que l'Atelier soit divisé en quatre thèmes, il a été prévu, dès le départ, que ceux-ci évoluent en parallèle de manière à permettre au consortium de s'impliquer dans l'ensemble de l'Atelier. Au niveau de la rédaction de la partie bilan, les quatre thèmes ont mené leurs activités de manière indépendante, pour des raisons évidentes de disponibilité et de charge de travail. Néanmoins, l'Atelier a organisé trois réunions regroupant l'ensemble des membres du consortium où les travaux des quatre thèmes ont été présentés et débattus. De plus, la partie prospective a redistribué les différents membres du consortium.

La première réunion s'est tenue à Paris le 12 janvier 2009. Elle avait pour but de mieux définir le contenu des thèmes identifiés au moment de la rédaction du projet et de fournir la méthode de travail pour la partie bilan. Les animateurs de chacun des thèmes avaient comme mandat de mobiliser l'ensemble du consortium (et au-delà) pour établir un état des lieux en se focalisant sur une vision intégrative des recherches et travaux réalisés au sein des différents programmes nationaux et internationaux. Ces travaux, devaient également contribuer à l'analyse des principales forces et faiblesses de la communauté française sur la thématique.

Le séminaire à mi-parcours, tenu à Paris le 6 juillet 2009 avait pour objectif de présenter les premiers éléments de la partie bilan et de réaliser une première exploration (sous la forme d'un brainstorming) des questions de recherche à approfondir lors de la partie prospective de l'ARP.

Le consortium s'est ensuite réuni à Lyon les 26 et 27 octobre 2009 dans le cadre de la prospective afin de définir et d'affiner les questions à explorer. Il s'agissait de proposer des pistes d'actions permettant une réelle interdisciplinarité en intégrant notamment les sciences humaines et sociales, en relation avec d'autres ARP en cours comme ceux sur « Sciences et Sociétés » ou « Adaptation de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés au changement climatique ». Cette réflexion prospective se devait de s'appuyer également sur les retours d'expériences, en France et à l'étranger.

Enfin, le colloque de restitution finale des travaux l'ARP s'est tenu à Paris les 2 et 3 février 2010. Il a fait l'objet d'exposés sur les quatre thèmes, sur les parties de bilan et de prospective, ainsi que d'une présentation des éléments de l'Appel à Projet CEP 2010 de

l'ANR. De plus, le consortium a bénéficié de la présence de personnalités extérieures à l'ARP (Rik Leemans, ESSP, Leah Goldfarb, ICSU et John Ingram, GECAFS) et dont les présentations ont permis de situer la problématique des CEP dans le contexte international.

Le présent document de rendu de l'ARP est constitué de deux parties.

La première partie, dédiée au bilan, présente une synthèse des travaux existants pour chacun des thèmes, les situe dans le contexte européen et international et fournit des pistes de recherche nécessaires afin de lever les verrous existants. Les quatre thèmes de la partie bilan sont eux-mêmes divisés en sous-thèmes (appelés axes), à savoir :

Thème 1 : Aménagement du territoire et utilisation des sols

- Agriculture, forêt et alimentation
- Villes, urbanisation, bâtiments
- Zones côtières, aménagement
- Le suivi et la modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols

Thème 2 : Ecosystèmes, biodiversité et vulnérabilité du vivant

Partie Terrestre :

- Modélisation de l'impact des CEP sur la biodiversité et la vulnérabilité des écosystèmes terrestres
- Impact des changements globaux sur les services liés à la diversité des écosystèmes terrestres
- Rétroactions des modifications écologiques sur le Système Terre (cycle de l'eau, du carbone, de l'azote, etc.)
- Amélioration de la représentation de la biodiversité dans les modèles «Système Terre» utilisés pour comprendre et prédire les changements globaux

Partie Marine :

- Intégration des effets de la biodiversité dans les modèles d'écosystème
- Rôle des écosystèmes marins dans la dynamique du Système Terre
- Articulation des approches globales, régionales et locales
- Vers des approches mécanistes conciliantes

Thème 3 : Ressources en eau, sol et alimentation globale

- Ressources en sol et en eau
- Sécurité alimentaire / infrastructures / échanges / alternatives
- Rétroactions et atténuations concernant l'utilisation croissante de l'eau et des sols

Thème 4 : Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales

- Styles de vie, modes de vie durables
- Environnement mondial et territorial : problèmes énergétiques, sociaux et politiques
- La gouvernance du Système Terre
- Modélisation, scénarii et prospective

La seconde partie concerne la prospective. Elle identifie des questions centrales et fédératrices dans la problématique des CEP. Elle propose des thématiques de recherche prioritaires pour chacune de ces questions, et émet des propositions en termes d'implémentation. Les questions identifiées par le consortium sont les suivantes :

1- Quelles sont les trajectoires démographiques, économiques, techniques et sociales, à faible impact environnemental, qui permettent d'assurer les besoins fondamentaux des sociétés ?

2- Quels sont les impacts globaux des différentes options régionales d'occupation du territoire (urbain, rural, naturel et marin) ?

3- Comment mieux connaître, comprendre et prévoir les interactions entre écosystèmes (continentaux, marins et côtiers) et les CEP ?

4- Comment évaluer les interactions alimentation de la population mondiale, ressources naturelles (eau, sol, vivant) et les CEP ?

5- Quelles relations entre expertise, gouvernance et société face aux CEP ?

Pour chacune de ces questions, le consortium a identifié les enjeux, les axes de recherche prioritaires, les approches de travail à développer. Il a également proposé, à titre d'exemples, une liste de questions de recherche et les a replacées dans le cadre des grands programmes internationaux d'ESSP. Enfin, le consortium a identifié à titre indicatif certains des champs disciplinaires à mobiliser autour de cette question pluridisciplinaire.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 1

PRESENTATION GENERALE 2

SOMMAIRE 8

PREMIERE PARTIE : LE BILAN 12

THEME 1 : AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET UTILISATION DES SOLS 13

INTRODUCTION : PRESENTATION DU THEME 13
AXE 1 : AGRICULTURE, FORET ET ALIMENTATION 14
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 14
1- Domaine exploré 14
2- Des contextes différents qui obligent à maintenir un équilibre local-planétaire 14
3- Des occupations du sol traditionnelles en compétition avec de nouvelles spéculations 15
4- L'accompagnement des services écosystémiques et de la biodiversité 16
5- Inégalités et délocalisations 16
6- La polarisation urbaine 16
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 17
AXE 2 : VILLES, URBANISATION, BATIMENTS 17
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 17
1- Les enjeux urbains:où en est la recherche sur les espaces urbains et la métropolisation? 17
2- La ville, comme « maximisation de l'interaction sociale » 18
3- Bâtiment 19
4- Marché foncier et morphologie urbaine 20
5- La durabilité du développement urbain, face au défi de la métropolisation 21
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 21
AXE 3 : ZONES COTIERES, AMENAGEMENT 23
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 23
1- Services rendus par les écosociosystèmes côtiers : bref développement 23
2- Evolution des services écosystémiques / changements environnementaux planétaires : enjeux scientifiques 24
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 24
1- Impacts directs 24
2- Impacts indirects 25
AXE 4 : LE SUIVI ET LA MODELISATION DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DES SOLS : APPROFONDIR LES APPROCHES MULTI-SCALAIRES 26
ETAT DES LIEUX (RECHERCHES PASSEES ET EN COURS) ET PERSPECTIVES (QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES) 26

THEME 2 : ECOSYSTEMES, BIODIVERSITE ET VULNERABILITE DU VIVANT (CONTINENTAL ET MARIN) 28

INTRODUCTION : PRESENTATION DU THEME 28
A. PARTIE TERRESTRE 29
AXE 1 : MODELISATION DE L'IMPACT DES CEP SUR LA BIODIVERSITE ET LA VULNERABILITE DES ECOSYSTEMES TERRESTRES 29
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 29
1- Etat de l'art 29

2- Interactions entre les groupes disciplinaires 30
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 30
AXE 2 : IMPACT DES CHANGEMENTS GLOBAUX SUR LES SERVICES LIES A LA DIVERSITE DES ECOSYSTEMES TERRESTRES 33
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 33
1- Etat de l'art 33
2- Interactions entre les groupes disciplinaires 34
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 34
AXE 3 : RETROACTIONS DES MODIFICATIONS ECOLOGIQUES SUR LE SYSTEME TERRE (CYCLE DE L'EAU, DU CARBONE, DE L'AZOTE, ETC.) 34
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 34
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 35
AXE 4 : AMELIORATION DE LA REPRESENTATION DE LA BIODIVERSITE DANS LES MODELES «SYSTEME TERRE» UTILISES POUR COMPRENDRE ET PREDIRE LES CHANGEMENTS GLOBAUX 36
B. PARTIE MARINE 36
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 36
1- Introduction : CEP et écosystèmes marins 36
2- Etat de l'art 38
3- Interactions entre les groupes disciplinaires impliqués (analyse des succès, des échecs) 39
4- Méthodologies scientifiques et programmatiques adoptées 40
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 41
1- Intégration des effets de la biodiversité dans les modèles d'écosystème 41
2- Rôle des écosystèmes marins dans la dynamique du Système Terre 41
3- Articulation des approches globales, régionales et locales 42
4- Vers des approches mécanistes conciliantes 42

THEME 3 : RESSOURCES EN EAU, SOL ET ALIMENTATION GLOBALE 43

INTRODUCTION : PRESENTATION DU THEME 43
AXE 1 : RESSOURCES EN SOL ET EN EAU 44
ETAT DES LIEUX (RECHERCHES PASSEES ET EN COURS) ET PERSPECTIVES (QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES) 44
1- Etat de l'art 44
2- Interactions entre les groupes disciplinaires 46
3- Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées 47
AXE 2 : SECURITE ALIMENTAIRE / INFRASTRUCTURES / ECHANGES / ALTERNATIVES 49
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 49
1- Etat de l'art 49
2- Interactions entre les groupes disciplinaires 50
3- Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées 50
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 51
AXE 3: RETROACTIONS ET ATTENUATIONS CONCERNANT L'UTILISATION CROISSANTE DE L'EAU ET DES SOLS 51
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 51
1- Problématique 51
2- Etat de l'art 53
3- Interactions entre les groupes disciplinaires 54
4- Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées 54
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 55

THEME 4 : ALTERNATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE ET ENERGETIQUE PLANETAIRE SOUS CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES 57

INTRODUCTION : PRESENTATION DU THEME 57
AXE 1 : STYLES DE VIE, MODES DE VIE DURABLES 58

I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 58
1- Introduction 58
2- Etat de l'art 58
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 59
1- Les bases techniques, technologies, énergies, organisations associées aux styles de vies 59
2- Les bâtiments et villes 60
3- Les mobilités 60
4- Les régimes alimentaires et les modes de productions agricoles 61
5- Les autres modes de consommations matérielles (vêtements, informatique, mobiliers) 61
6- Les filières industrielles et énergétiques 61
7- La citoyenneté, démocratie, collectivités territoriales 61
8- Les politiques et mesures 62
9- Évaluation, monitoring 62
AXE 2 : ENVIRONNEMENT MONDIAL ET TERRITORIAL : PROBLEMES ENERGETIQUES, SOCIAUX ET POLITIQUES 62
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 62
1- Développement durable et questions environnementales à l'échelle mondiale (Politique publique, philosophie politique, science politique) 62
2- Éléments sur la situation de la recherche et de l'enseignement relatifs aux « Biens Publics Mondiaux » en France 64
3- Problématique environnementale et développement durable à l'échelle des territoires 65
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 68
AXE 3 : LA GOUVERNANCE DU SYSTEME TERRE 69
ETAT DES LIEUX (RECHERCHES PASSEES ET EN COURS) ET PERSPECTIVES (QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES) 69
1- L'expertise entre science et politique : définir ce qui compte 70
2- Architecture de la gouvernance du Système Terre ; relations entre savoirs et décisions à différentes échelles 71
3- Les "agents" qui tirent la gouvernance internationale du Système Terre, au-delà des Etats - nations 71
4- La qualité démocratique de la gouvernance : accountability, diversité des points de vue, controverses 72
5- Généalogie du Système Terre et de sa gouvernance 72
AXE 4 : MODELISATION, SCENARII ET PROSPECTIVE 73
I. ETAT DES LIEUX : RECHERCHES PASSEES ET EN COURS 73
1- La situation de la modélisation sur les changements environnementaux planétaires au niveau international 73
2- Modèles climatiques et économiques : articulations, forces et faiblesses 78
II. PERSPECTIVES : QUELQUES PISTES POUR DES RECHERCHES FUTURES 82
1- Points forts et limites des différents modèles économiques 82
2- Autres directions possibles de développements futurs 84

DEUXIEME PARTIE : LA PROSPECTIVE 86

QUELLES PRIORITES DE RECHERCHES SUR LES CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX PLANETAIRES ? 86

QUESTION 1 : QUELLES SONT LES TRAJECTOIRES DEMOGRAPHIQUES, ECONOMIQUES, TECHNIQUES, ET SOCIALES, A FAIBLE IMPACT ENVIRONNEMENTAL, QUI PERMETTENT D'ASSURER LES BESOINS FONDAMENTAUX DES SOCIETES ? 86
I. ENJEUX 86
II. AXES PRIORITAIRES 86
III. APPROCHES A DEVELOPPER 87
1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples 87

2- Actions ESSP et IHDP concernées 88
3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés 88
4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif) 88
QUESTION 2 : QUELS SONT LES IMPACTS GLOBAUX DES DIFFERENTES OPTIONS REGIONALES D'OCCUPATION DU TERRITOIRE (URBAIN, RURAL, NATUREL ET MARIN) ? 88
I. ENJEUX 88
II. AXES PRIORITAIRES 89
III. APPROCHES A DEVELOPPER 89
1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples 90
2- Actions ESSP et IHDP concernées 90
3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés 90
4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif) 90
QUESTION 3 : COMMENT MIEUX CONNAITRE, COMPRENDRE ET PREVOIR LES INTERACTIONS ENTRE ECOSYSTEMES (CONTINENTAUX, MARINS ET COTIERS) ET CEP ? 91
I. ENJEUX 91
II. AXES PRIORITAIRES 91
III. APPROCHES A DEVELOPPER 92
1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples 92
2- Actions ESSP et IHDP concernées 93
3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés 93
4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif) 94
QUESTION 4 : COMMENT EVALUER LES INTERACTIONS ALIMENTATION DE LA POPULATION MONDIALE, RESSOURCES NATURELLES (EAU, SOL, VIVANT) ET LES CEP ? 94
I. ENJEUX 94
II. AXES PRIORITAIRES 94
III. APPROCHES A DEVELOPPER 95
1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples 96
2- Actions ESSP et IHDP concernées 96
3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés 96
4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif) 97
QUESTION 5 : QUELLES RELATIONS ENTRE EXPERTISE, GOUVERNANCE ET SOCIETE FACE AUX CEP ? 97
I. ENJEUX 97
II. AXES PRIORITAIRES 97
III. APPROCHES A DEVELOPPER 99
1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples 99
2- Actions ESSP et IHDP concernées 100
3- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif) 100

GLOSSAIRE ET PRINCIPAUX ACRONYMES 101

ANNEXES 105

ANNEXE 1 : BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE DU THEME « ALTERNATIVES POUR LE DEVELOPPEMENT ECONOMIQUE ET ENERGETIQUE PLANETAIRE SOUS CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES » 105
ANNEXE 2 : LISTE DES PARTICIPANTS AU COLLOQUE DE RESTITUTION FINALE DE L'ARP CEP DES 2 ET 3 FEVRIER 2010 110

PREMIERE PARTIE : LE BILAN

Thème 1 : Aménagement du territoire et utilisation des sols

Animateurs du thème : Stéphane Hallegatte et Claude Millier
Rédacteurs : Jean-Pierre Féral, Françoise Gourmelon, Thomas Houet, Jean Laterrasse, Claude Millier, Marc Robin, Jean-Luc Salagnac

INTRODUCTION : Présentation du thème

Les changements globaux (changement climatique, composition atmosphérique, épuisement des sols et des matières premières, pertes de biodiversité, etc.) interfèrent étroitement avec les changements d'utilisation des sols, que l'on peut percevoir dès l'échelle locale. En retour, l'usage local des sols représente un des déterminants essentiels des changements globaux via des impacts biophysiques et biogéochimiques, notamment sur le climat et la composition atmosphérique et marine. En particulier, alors que la population urbaine explose pour atteindre probablement 75% de la population mondiale en 2050, la question des modes de développement est cruciale. La structure des sociétés est fondamentalement modifiée non seulement par le phénomène d'agrégation des populations en milieu urbain, mais aussi par les contraintes drastiques que la sphère urbaine impose à son hinterland. Les limites biophysiques et biogéochimiques de ce modèle de développement doivent être explorées, de même que les capacités ou vitesses d'adaptation des sociétés à ces changements fondamentaux, et des recirculations que ces dernières imposent à différentes échelles.

Ce thème aborde la façon dont l'aménagement du territoire et l'utilisation des sols s'articulent avec:

- La circulation générale et régionale des marchandises et en particulier des ressources alimentaires ou hydriques, et des déchets afférents,
- Les infrastructures de transport local (trajets domicile/travail et de loisir, transports de marchandises),
- Les usages alternatifs des sols (agri/sylviculture, agriculture vivrière vs exportatrice, zones naturelles, loisirs),
- La problématique de la gestion des risques naturels (inondations, sécheresses, canicules, etc.),
- Et les nouvelles contraintes de la Directive Cadre pour la protection des sols.

La concentration des populations aura un impact sur l'ensemble des sols, et leur utilisation fait donc émerger des questions, au premier rang desquelles, figurent les questions de gouvernance et de compétition pour l'usage des sols, mais également les éventuelles rétroactions sur l'ensemble du Système Terre.

Axe 1 : Agriculture, forêt et alimentation

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Domaine exploré

Depuis la révolution industrielle et l'explosion démographique, l'espace rural, défini comme l'espace complémentaire aux métropoles urbaines, recouvre des espaces dévolus à la production primaire destinée à l'alimentation, à l'énergie et aux matériaux, ainsi que des zones très peu anthropisées, soit préservées, soit traditionnellement exploitées (e.g. cueillette, etc.). La distribution de ces modes d'occupation des sols est très variable suivant les grands biomes et les grandes civilisations.

La croissance démographique, la mondialisation de l'économie, le changement climatique, les impacts environnementaux des sur-exploitations des milieux ont déjà conduit à des modifications notables de cette occupation des sols et de leur utilisation mais qui seront vraisemblablement amplifiées dans l'avenir. Les ajustements à la marge des activités de production actuelles ne suffiront vraisemblablement pas à une adaptation durable et de nouveaux systèmes de production devront certainement être mis en place.

2- Des contextes différents qui obligent à maintenir un équilibre local-planétaire

Aux contextes pédo-climatiques différents suivant les biomes, se superposent d'autres variations de contexte qui rendent les situations et les pronostics d'évolution très différents :

- Le contexte démographique : ici l'exode massif de populations agricoles vers les villes; dans de rares zones, des colonisations pionnières; ailleurs des décroissances démographiques,
- Le contexte politique : de nombreux pays donnent encore un poids électoral très important aux minorités paysannes alors que d'autres privilégient d'autres secteurs; d'où des solutions nationales de gouvernance des changements très différents,
- Le contexte culturel : s'agissant d'activités concernant le milieu naturel, les interactions nature-société s'expriment dans des cadres culturels consolidés par l'histoire, aussi bien dans les cultures primitives que dans les sociétés modernes,
- Le contexte santé-alimentation et l'évolution possible des modèles alimentaires (sous-alimentation chronique ici, diversification de l'alimentation là, ou bien guidages nutritionnels ailleurs, etc.),
- Et bien sûr le contexte de développement économique.

Les situations de départ sont donc très variées (leur aboutissement peut mériter des recherches historiques intéressantes pour concevoir leur évolution); conjointement aux incertitudes sur les scénarios démographiques, économiques et climatiques, les évolutions et les trajectoires d'adaptation sont encore plus diverses.

Ainsi, dans le cadre de dynamiques planétaires, le passage par le local et la gestion de la tension local-planétaire font apparaître des contraintes obligatoires dans la définition d'opérations de recherche.

3- *Des occupations du sol traditionnelles en compétition avec de nouvelles spéculations*

Dans beaucoup de régions, l'extension possible des terres cultivables ou des forêts est relativement faible et pour certaines, ces terres sont déjà menacées par les changements environnementaux planétaires ou risquent de l'être dans le futur (submersions du littoral, salinisation ou sodisation des sols, érosion éolienne ou hydrique des sols).
Ces terres sont sollicitées pour soutenir une demande alimentaire accrue, pour résoudre les problèmes de sous-alimentation et parfois de diversification alimentaire (consommation de protéines animales corrélées avec le niveau de développement des populations).

La solution la plus pratiquée est l'intensification des systèmes de production, fréquemment corrélée avec des consommations plus importantes d'eau, avec l'accroissement d'intrants chimiques, parfois avec une artificialisation totale (serres, aquacultures, ateliers d'élevage hors sol, etc.), de façon controversée avec la manipulation génétique (OGM, transgénèse). Cette intensification s'est accompagnée de modifications réelles et/ou perçues de l'environnement.

L'ajustement des systèmes de production actuels, la conception de nouveaux systèmes, la remédiation des sols et des systèmes hydrologiques concernés (malgré l'irréversibilité très marquée de certains processus) méritent des recherches ambitieuses[1].

Toutefois, des options assez différentes, encore mal conçues et évaluées, prennent en compte dès le départ les contraintes expérimentales et alimentaires : agriculture biologique, extensification de certaines fonctions, etc. Elles peuvent par ailleurs mieux exprimer les services écosystémiques. Poussées dans les pays développés, elles sont de second ordre dans les pays sous tension alimentaire mais justifient également des recherches intégrées.

Pour les forêts, la situation est analogue, mais les durées très longues des cycles forestiers obligent à des anticipations plus importantes tant en ce qui concerne les modifications environnementales (changement climatique, eutrophisation) qu'anthropiques (déforestation, plantations, etc.).

A cette situation traditionnelle, déjà modifiée par le développement de cultures industrielles (qui peuvent anéantir des agricultures de subsistance et diminuer la sécurité alimentaire de pays entiers), vient s'ajouter le développement de compétitions entre usages alimentaires (ou de matériaux) et énergétiques de l'espace : les politiques de mitigation de secteurs éloignés (transports, habitat, etc.) ont donc des effets notables qui impliquent des approfondissements au niveau études et recherches d'autant que cette intensification a des effets sur les qualités environnementales.

Dans tous les cas, les stratégies « individualistes » des producteurs doivent se combiner au niveau territorial dans des conditions complexes, qui pèsent sur l'identité et la viabilité de ces territoires. Le laisser-faire n'est probablement pas la stratégie idéale, et l'aménagement du territoire combiné à une décentralisation suffisante doit tracer des itinéraires d'évolution viables et efficaces.

[1] Voir également les conclusions de l'ARP ADAGE sur ces thèmes

4- L'accompagnement des services écosystémiques et de la biodiversité

Sols, eaux, espaces, supports des activités de production primaire (agriculture et forêts) ont d'autres fonctions qui procurent des services tangibles aux sociétés : eau potable, stockage de carbone (séquestration végétale et/ou géologique), mais aussi biodiversité ordinaire qui intervient dans la viabilité et la durabilité des espaces et écosystèmes. La prise en compte systémique et simultanée des différentes fonctions devrait permettre de dégager des scénarii d'évolution gagnant–gagnant.

5- Inégalités et délocalisations

Les CEP portent en germes l'augmentation des inégalités entre zones géographiques, entre pays, entre territoires et entre classes sociales. Certes, ce domaine ressort clairement des sciences du développement mais l'interaction avec les CEP est tellement intense et problématique qu'elle doit être approfondie au sein de cette réflexion prospective.

Un aspect nouveau des CEP concerne les phénomènes de délocalisation qui se développent rapidement. Alors que la délocalisation industrielle s'exprime en premier par la recherche d'un capital humain moins cher, les délocalisations de productions agricoles s'appuient aussi sur la mobilisation de capital foncier. Certes l'affaire remonte au cœur de la colonisation avec le développement des cultures de rente et industrielles mais la raréfaction de l'eau dans certains pays (« l'eau virtuelle »), le développement des biocarburants, les opportunités ouvertes par les cultures OGM ont donné un nouveau tour plus intense et plus inquiétant à ce phénomène.

Les délocalisations humaines constituent un phénomène annexe mais important en termes de déstabilisation des échanges et au-delà de l'attention humanitaire. Il y a matière à observer de près scientifiquement ces questions.

6- La polarisation urbaine

La croissance des villes, les besoins de Nature des populations urbaines polarisent l'espace rural et ses activités agricoles, forestières et naturelles. Les villes organisent et structurent les espaces aussi bien pour le drainage de produits agricoles que pour satisfaire les besoins de bien-être (e.g. loisirs divers).

Les planifications urbaines, les croissances des villes consomment bien sûr de l'espace mais surtout mettent en relief les interfaces ville-campagne, questionnent la localisation des espaces préservés et structurent les fonctions en raison de l'éloignement de la ville.

Conjointement à la création de grands investissements linéaires, le « remplissage » du futur espace rural est un problème majeur d'un nouvel aménagement du territoire.

7- Le rôle de l'Etat et des collectivités

Pour guider ces évolutions souvent en rupture avec des dynamiques incrémentales, la coordination entre acteurs, souvent insuffisante actuellement, doit être améliorée. Dans le contexte européen (mais des problématiques de même type dans d'autres régions du monde doivent être lancées), le rôle de l'Etat (et celui des collectivités) mérite d'être revisité à partir des initiatives qui sont prises sur le terrain. La coexistence d'acteurs variés souvent portés par des fonctions d'utilité différentes suggère une montée en complexité des problèmes de gouvernance et de planification.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

- Comment représenter et placer les systèmes socio-écologiques, au centre des recherches dans ce domaine, et en particulier les interactions société-écologie ? Comment pratiquer l'interdisciplinarité nécessaire ? Comment qualifier leurs comportements (résilience, viabilité, robustesse, etc.) ? C'est un point de blocage décisif pour que les enjeux des CEP puissent être mieux abordés.

- Les interactions entre les secteurs primaires supportés par l'espace et les secteurs industriels, énergétiques ou de services doivent être développées dans une perspective systémique (identification de solutions gagnant–gagnant ou au contraire de « conflits d'intérêts » antagonistes).

- L'anticipation : concevoir de nouveaux systèmes de production, de gouvernance; à moyen terme, on peut supposer qu'une partie importante de l'espace sera consommé par des systèmes de production qui n'existent pas encore. Ces stratégies d'innovation concernent non seulement des innovations technologiques, mais aussi des changements de comportements et la mise en place de nouvelles institutions.

- La mise en place de réseaux d'observation sur les innovations déjà existantes peut-être complétée par un dispositif de concertation stratégique avec des chercheurs et des représentants des différentes parties prenantes.

- Le lancement expérimental de recherches associant dans leur conception et leur réalisation chercheurs et acteurs.

Axe 2 : Villes, urbanisation, bâtiments

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Les enjeux urbains : où en est la recherche sur les espaces urbains et la métropolisation ?

En 2007, la population urbaine a franchi le cap des 50% de la population de la planète. Si les villes existent depuis des millénaires, la croissance urbaine n'en est pas moins un phénomène historique récent, qui constitue aujourd'hui un défi majeur pour l'humanité. Or ce phénomène, et le processus de métropolisation qui l'accompagne, sont encore largement en devenir: d'ici 2030, la population urbaine devrait en effet encore croître de 2 à 2,5 milliards d'êtres humains, soit l'équivalent de la création de deux villes d'un million d'habitants chaque semaine…

La croissance urbaine a été ces dernières décennies synonyme de développement économique et de progrès humain. Mais, faute d'être maîtrisée, elle a été aussi à l'origine de dysfonctionnements et de crises majeures tant au plan social qu'au plan environnemental. Si par exemple la métropolisation a pu s'assimiler au recul des inégalités, ce constat se trouve aujourd'hui relativisé, pour ne pas dire infirmé, par tout un ensemble d'études, qui mettent notamment en relief le fait que les désordres sociaux et environnementaux sont fortement corrélés entre eux. La « ville durable » reste donc encore un concept largement à inventer.

Or, comme l'a noté dans son récent rapport le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), cette question de la maîtrise du processus d'urbanisation est un enjeu planétaire crucial pour promouvoir un nouveau type de développement, respectueux des intérêts des générations futures. En quoi les recherches sur la ville nous permettent-

elles d'affronter ces défis de civilisation et quelles sont les questions auxquelles ces recherches doivent prioritairement s'attacher à répondre ?

2- *La ville, comme « maximisation de l'interaction sociale »*

On ne soulignera jamais assez que la ville est un objet complexe, - l'un des plus complexes qui soit parmi les systèmes « artificiels » produits par l'homme - articulant à la fois l'économique, le technique, l'institutionnel, le social et le culturel, le local et le global, le court terme de l'annualité budgétaire ou d'un mandat électif et le temps long qui façonne les territoires.

L'histoire des villes est d'abord celle des avantages que procure la concentration en un même lieu d'un ensemble d'éléments qui, regroupés, vont progressivement engendrer des fonctions d'abord vitales, puis liées à la socialisation : protection et défense, culte, échanges, etc. Les bâtiments sont conçus, réalisés et maintenus afin d'assurer les fonctions techniques et symboliques associées à ces usages multiples. L'ordre géométrique de la ville reflète très tôt l'ordre économique du marché. La ville elle-même devient alors marché et compétition entre acteurs économiques pour l'occupation du sol, mais la ville est simultanément un lieu de « maximalisation de l'interaction sociale » (Claval,1982), et singulièrement un lieu de pouvoir dont l'enjeu ne se réduit jamais au seul enjeu économique. Ce faisant, la ville est aussi « système dans le système », elle prend place dans une hiérarchie d'éléments en interactions (réseaux de villes) et assume la double fonction de contrôle et de desserte d'un territoire. Bien loin d'être un marché parfait, les médiations y sont nombreuses, et les raisons d'échapper aux lois du marché aussi fortes et aussi légitimes que celles de les intégrer.

La ville a d'abord été perçue comme lieu particulier dans un espace régional ou national. La réflexion sur la ville comme marché desservant un hinterland rural qui en retour l'approvisionne et soutient sa croissance est ancienne. A la source des formalisations dont elle a fait l'objet, la théorie de l'« Etat isolé » de Von Thünen (1826) constitue le paradigme de la polarité urbaine. Elle situe le rôle organisateur de la ville en montrant la dépendance du territoire agricole par rapport à l'accessibilité du marché-centre, responsable de la structure auréolaire de l'espace, mais elle tend à ignorer les effets internes à la ville tout comme les interactions avec d'autres sous-systèmes urbains voisins.

En continuité avec cette approche, bien des travaux d'économie régionale ou de géographie qui sont développés au 19ième puis au 20ième siècle, privilégient l'analyse des relations ville-campagne[2]. La forme la plus aboutie en sera la « théorie des lieux centraux » de Christaller (1933) qui, par extension, repose sur la notion de desserte d'un territoire par les services qu'offre un centre urbain. La centralité est alors définie par l'exercice, dans une ville, d'une activité destinée à une clientèle extérieure, située dans la ville et dans la région qui lui est contigüe.

La géographie humaine a mis rapidement en évidence les limites de la théorie des « lieux centraux » et de la vision statique dont elle est porteuse, d'autant que la logique de proximité spatiale entre producteurs et consommateurs a été bouleversée par la révolution industrielle. Celle-ci a engendré l'augmentation des capacités et des vitesses de transport terrestre, et l'élargissement des marchés et des zones d'influence. Dans ce contexte, la loi rang-taille a été formulée de manière empirique pour rendre compte de la répartition des tailles des villes en fonction de leur rang (on pourrait aussi parler de compétition). Enoncée notamment par G.K. Zipf, elle stipule que la taille d'une ville est inversement proportionnelle à son rang dans le système de villes considéré (typiquement un pays ou un continent). Cette loi a été validée par Batty (2001) sur les villes du Royaume-Uni, à différentes dates au cours

[2] on pourra ici se reporter à la synthèse de Pumain et Robic, 1996

du 20ième siècle, mettant en évidence la remarquable persistance des structures urbaines. Cependant, elle n'est pas fondée sur une théorie, et ne permet pas de prédiction, même si elle présente l'intérêt de mettre en évidence la nature systémique des interactions entre cités et d'en permettre une formalisation.

3- Bâtiment

Le bâtiment est une unité élémentaire du tissu urbain. Il est par lui-même un système complexe qui s'insère dans la complexité déjà soulignée de la ville. Le bâtiment doit en effet assurer de manière pérenne de nombreuses fonctions techniques (protection des personnes et des biens contre les effets des aléas naturels ou d'origine anthropique, performances thermiques et/ou acoustiques, garantie d'une ambiance saine, etc.) ainsi que des fonctions symboliques attachées à sa destination (bâtiment public, siège de société, logements, etc.).

Ces fonctions ne sont par ailleurs pas figées mais, au contraire, changeantes au fil du temps suivant les évolutions des exigences des occupants, elles-mêmes directement en prise avec les évolutions sociétales. Suivant les lieux et les époques, les constructeurs ont su développer des moyens de satisfaire de manière économique ces fonctions et leur adaptation durant la vie des bâtiments.

Un bâtiment inscrit dans un tissu urbain est bien évidemment en relation avec les réseaux de la ville (eaux pluviales, eaux usées, énergie, transport, information, etc.).

Le renforcement de préoccupations liées au développement durable questionne la manière établie de concevoir, réaliser et maintenir les bâtiments neufs ainsi que la manière de concevoir la transformation, l'adaptation des bâtiments existants qui constituent l'essentiel du parc immobilier.

La médiatisation de quelques sujets comme ceux relatifs à l'énergie ou à la récupération des eaux pluviales ne doit pas faire oublier que d'autres thèmes sont au moins aussi essentiels comme la qualité des ambiances (thermique, acoustique, visuelle, olfactive, etc.) intérieures et extérieures, la maintenabilité des bâtiments et des équipements (garante d'une performance pérenne).

La réflexion de nature systémique relative à l'évolution de la ville ne peut faire l'impasse sur l'examen du rôle que le bâtiment peut jouer par exemple en tant que :

- Terminal logistique (projet UE « HOMEDOOR – E-Commerce Logistics for Homes » de KONE),
- Fournisseur d'énergie : suivant la forme urbaine, des relations d'intimité entre bâtiments et véhicules peuvent être explorées (projet « AUTON'HOME »),
- Dépollueur (projet UE VINCI-GTM « PICADA »).

Bien que l'essentiel ait sans doute été déjà développé, notamment pour le tertiaire où le besoin est crucial du point de vue de la variabilité commerciale de l'activité de location/vente de bureaux, des techniques constructives facilitant la reconversion, apportant de la flexibilité vis-à-vis des changements d'usage peuvent être imaginées et évaluées dans le sillage des travaux de J. Habraken au sein du SAR (Stichting Architecten Research) dans les années 1960.

Une autre dimension de la ville durable concerne l'adaptation à une nouvelle donne climatique et notamment aux impacts des périodes de canicule. La vulnérabilité de la ville à des épisodes qui se prolongent a été confirmée en 2003 en Europe et en particulier en France. Des travaux en cours (e.g. projets EPICEA - Région Midi-Pyrénées, VURCA -ANR)

tendent à évaluer le potentiel et la faisabilité d'interventions sur le tissu urbain destinées à réduire l'ampleur de l'îlot de chaleur à l'origine des conséquences sanitaires constatées.

4- Marché foncier et morphologie urbaine.

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire des villes, l'agencement interne de l'espace intègre des préoccupations économiques sans que celles-ci soient jamais exclusives.

Des modèles morphologiques de la ville ont notamment été développés par l'Ecole de Chicago, nourris par l'observation des villes nord-américaines et, comme il était de mode dans les années 1920, par l'emprunt de concepts à la biologie. Les régularités dans l'organisation de l'espace urbain sont alors confrontées à la rugosité des processus de désorganisation sociale (Park *et al.*1925).

Deux principes constitutifs des modèles urbains sont ici à retenir : le premier est fondé sur l'existence d'une compétition entre groupes d'individus pour l'occupation des sols; le second introduit comme facteur discriminant pour un quartier donné non plus seulement sa distance à un lieu central, mais aussi son statut social. Trois types de représentations de l'espace urbain peuvent alors être distingués (selon Beaumont et Huriot, 1996) :

- La ville concentrique de Burgess (1925), qui reste marquée par le modèle classique. Dans ce modèle, le centre d'affaires est entouré par une zone à forte densité, ceinturée par des zones résidentielles dont le niveau social tend à s'élever avec l'éloignement. L'organisation urbaine y est exprimée par un processus fondé sur l'ascension sociale et la migration des groupes aisés du centre vers la périphérie, modifiant progressivement le statut des zones concentriques.

- La « ville sectorielle » de Hoyt (1939), à l'origine de la « théorie de la base», complète ce modèle par la prise en compte des effets « structurants» des réseaux de transport sur les zones avoisinantes dont elles valorisent l'emplacement et contribuent à spécialiser les fonctions : les quartiers situés le long des voies radiales vont bénéficier d'une bonne accessibilité, et à distance donnée du centre, vont mieux retenir la population aisée que des quartiers qui ne bénéficient pas d'une telle desserte, d'où une différentiation spatiale des secteurs et une anisotropie de l'organisation urbaine résultante. Ces travaux seront notamment prolongés par ceux de Alonso dans les années soixante.

- La « ville à noyaux multiples » de Harris and Ulman (1945) substitue à l'hypothèse d'une centralité unique un modèle multipolaire, le développement de centres supposés indépendants résultant de la concurrence pour l'occupation du sol d'une part, des différences d'accessibilité et d'attractivité, et plus généralement de l'existence d'économies et de déséconomies d'agglomération d'autre part.

Les analyses relevant du courant marxiste, en mettant l'accent sur l'importance des rapports sociaux et le rôle des espaces urbains dans leur reproduction, posent l'opposition ville *vs* campagne comme une illustration particulière de la division du travail, contribuant à ce que la sphère politique s'imbrique à la sphère économique. Dans cette acception, la ville constitue le creuset dans lequel se forment la concentration des moyens de production et l'antagonisme entre les deux principales classes sociales, là où Marshall (1890) verra plutôt une organisation permettant de capter les effets externes positifs de la proximité pour créer un espace favorable à la coopération et à la production industrielle. Plus tard, Max Weber (1921), en illustrant la place de l'économie dans la sociologie urbaine, mettra en évidence que l'opposition entre ville et campagne tient pour partie à la nature de la propriété du sol, et soulignera à son tour l'importance de l'économie foncière.

Les représentations systémiques, en s'inscrivant dans une démarche résolument interdisciplinaire, permettront quant à elles, de constituer un cadre méthodologique adapté à la modélisation globale à la fois de la dynamique interne de la ville et de ses relations avec son environnement. Nous citerons ici les modèles de Forrester sur Chicago (1969), de l'Ecole de Bruxelles (Allen, 1978), ou encore de celle de Leeds (Wilson, 1981). Mais la pertinence du cadre conceptuel de ces modèles doit être tempérée par la difficulté d'identifier les « bonnes » variables d'action parmi une quasi-infinité de variables possibles, et leur apport restera plus théorique que réellement opérationnel.

5- La durabilité du développement urbain, face au défi de la métropolisation

Dans des contextes de développement, d'environnement géographique et culturel différents, les trajectoires des grandes agglomérations mondiales face au processus de métropolisation ont pris des formes variées. Les travaux de Newman et Kenworthy à la fin des années quatre-vingt et dans les années quatre-vingt-dix[3], si controversés qu'ils soient, restent ici fondateurs : les trois modèles contrastés de développement urbain – asiatique, européen et nord américain - symbolisent bien différents scénarii de développement possibles. Ajoutées à différentes autres études portant notamment sur l'évolution des pratiques de mobilité, ces travaux mettent en outre en évidence le rôle de plus en plus crucial des modes de transport dans les dynamiques spatiales à l'échelle métropolitaine et singulièrement la place de l'automobile. Ils donnent un relief nouveau aux travaux sur les morphologies urbaines aux différentes échelles.

Si dans les pays en développement la croissance urbaine reste principalement liée au dépeuplement des zones rurales, les dynamiques urbaines que nous constatons depuis trente ans se traduisent dans la plupart des pays développés dans le sens d'un étalement urbain et d'une spécialisation sociale et économique plus forte des territoires qui les constituent. De nombreux travaux, pour l'essentiel nord américains et néerlandais, ont établi que ce modèle de la « ville diffuse » entraîne de lourdes conséquences en termes de croissance des distances de déplacement, de dépendance à l'automobile, d'usage accru de celle-ci et par voie de conséquence, de consommation d'énergie d'origine fossile et d'émissions de gaz à effet de serre. Une revue de la littérature témoigne cependant d'une rareté de travaux empiriques sur cette problématique de la forme urbaine et de ses effets externes négatifs en termes de mobilité. Par exemple, l'analyse de l'influence sur les mobilités de l'évolution de la forme métropolitaine mono-concentrique vers un système polycentrique, se trouve peu développée. De même, les hypothèses sur les causes de la croissance des distances restent largement ouvertes: opportunité saisie par les ménages pour se « mettre au vert » et à l'écart des flux dominants, ou résultat des tensions sur les marchés immobiliers plus centraux ?

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

Au regard des enjeux de la recherche sur les dynamiques urbaines, il convient de mettre en exergue que seules les démarches systémiques, par essence pluridisciplinaires, peuvent permettre de progresser dans la compréhension des processus en œuvre et dans la maîtrise de leurs effets. A partir de là, plusieurs orientations de travail parallèles nous paraissent devoir être encouragées :

- Le développement d'études empiriques, privilégiant des analyses dynamiques (e.g. monographies pluridisciplinaires, études comparatives des trajectoires urbaines, etc.), portant à la fois sur les métropoles des pays développés et sur celles des pays en développement. Les expérimentations et/ou le développement de pratiques nouvelles,

[3] dont l'étude « Sustainability and Cities » sur 46 villes dans le monde publiée en 1999

dans le cadre d'Agendas 21 ou sous l'égide de programmes internationaux, doivent autant que possible faire l'objet d'évaluations indépendantes.

- La seconde orientation est de caractère méthodologique : le concept de ville durable reste flou. Or, autant il est vain et contradictoire avec la complexité de l'«objet » polymorphe que constituent les systèmes urbains de vouloir édicter des normes, autant il serait dommageable d'en déduire l'absence de référentiels. Les recherches visant, notamment dans un cadre de coopération internationale entre différentes équipes spécialisées, à élaborer de tels référentiels sur des bases scientifiques aussi solides que possible et des méthodes d'évaluation appropriées devraient être encouragées. Dans ce cadre, des indicateurs mis en avant par certaines ONG – telle que la notion d' « empreinte écologique » – devraient être expertisés.

- La troisième orientation concerne la constitution de bases de données, en privilégiant là aussi l'échelle internationale. La situation actuelle, caractérisée à la fois par la disparité et l'hétérogénéité des données (mobilité, occupation des sols, valeurs foncières, consommations d'énergie, etc.) selon les régions géographiques n'est absolument pas satisfaisante. Des financements pourraient être affectés en soutien à des équipes s'engageant dans des programmes internationaux.

- Enfin, des efforts significatifs devraient être consacrés au développement d'outils de simulation, permettant de projeter les effets des dynamiques (en cours ou relevant de scénarii prospectifs) à différentes échelles de temps et d'espace. Face aux défis de la durabilité, les modèles conceptuels, comme les outils mathématiques ou numériques, qui permettent de simuler l'éventail des choix ou les comportements des agents économiques, tendent à se sophistiquer. L'économie s'ouvre largement à la sociologie dans l'analyse des pratiques de déplacement et de leurs évolutions. En matière d'aide à la décision, les méthodes multicritères sont venues compléter le calcul économique, peu adapté à la prise en compte des effets systémiques. Des efforts sont en outre conduits pour « interfacer » des modèles de consommation d'énergie et des modèles de comportement (notamment de mobilité). L'économie géographique (couronnée par le récent Nobel 2008 de Krugman) commence à proposer des démarches de modélisation globale intégrant lois d'équilibre et dynamiques spatiales. Différentes approches visent plus généralement à s'affranchir du modèle de localisation dans un centre unique postulé par l'économie urbaine classique et s'attachent à une description plus réaliste des interactions des différents agents économiques, etc. Elles permettent de manière prometteuse de mieux relier les dynamiques d'agglomération à différentes variables d'action et s'annoncent riches de potentialités de développements futurs.

La prise en compte des bâtiments dans une approche systémique de la ville durable passe notamment par des réflexions sur :

- Le procès de conception/construction afin de limiter les impacts environnementaux de l'activité de construction/rénovation en ville (flux de véhicules, consommations de ressources, etc.).
- L'évolution de l'outil de production permettant de satisfaire économiquement et avec des impacts environnementaux limités aux demandes de flexibilité et de multifonctionnalité des bâtiments en ville.
- Les matériaux, en particulier d'enveloppe, qui jouent un rôle essentiel dans le bilan radiatif de la ville ainsi que dans les performances (thermo -acoustiques notamment) des bâtiments sans oublier une fonction de dépollution et de production d'énergie.

Axe 3 : Zones côtières, aménagement

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

La zone côtière est un espace exigu, caractérisé par un linéaire considérable et par une pression humaine importante. Partout dans le monde, elle apparaît comme un espace vulnérable où les événements météo -marins se combinent à des pressions exercées par des activités humaines parfois conflictuelles, favorisant des risques d'origine naturelle et/ou anthropique (Robin, 2002).

L'évaluation des changements environnementaux en zone côtière s'envisage actuellement à travers la notion de service rendu par l'éco-socio-système côtier dans un cadre prospectif intégrant des changements de forçage de nature (sur le socio-système) ou de société (sur l'écosystème et sur le socio-système), ce qui semble être le cas dans le contexte actuel de changement climatique planétaire. L'approche par les services écosystémiques, institutionnalisée par le Millennium Ecosystem Assessment (MA), aborde les enjeux relatifs à la conservation de l'environnement d'une manière nouvelle[4,5,6]. A l'interface entre écologie, économie et géographie, elle propose un outil pédagogique qui souligne les interdépendances qui existent entre les enjeux écologiques et économiques. D'une conception utilisatrice des écosystèmes, l'approche par les services rendus s'inscrit dans une vision plus intégrée et plus globale. Elle repose sur une prise de conscience de l'ensemble des services que ces écosystèmes rendent, directement et indirectement, à l'ensemble de la planète, qualifié d'anthroposystème global par Boyd (2004)[7].

Cette approche définit quatre grandes catégories de services : les services de support, les services de production, les services de régulation et les services culturels[8]. Ils correspondent à des fonctions écosystémiques ou des fonctions socio-systémiques et peuvent être évaluées selon le nombre de bénéficiaires directs ou indirects et selon leur valeur économique.

1- Services rendus par les écosociosystèmes côtiers : bref développement

Les zones intertidales et subtidales sont caractérisées par des habitats dont la valeur écologique et économique a été longtemps sous-estimée ou partiellement estimée[9]. L'article de Costanza *et al.* (1997)[5] a permis de jeter les bases d'une évaluation de la valeur des écosystèmes liée aux services rendus, qui ont été précisées dans le cadre du MA (2005)[6,10]. Depuis, les programmes de surveillance environnementale et d'évaluation (PNUE, DCE pilotée par la Commission Européenne --The Economics of Ecosystems and Biodiversity- etc.) peuvent utiliser ces estimations pour quantifier le coût des impacts anthropiques ou

---

[4] Daily G.C., 1997. Nature's Services. Societal Dependence on Natural Ecosystems, Washington D.C., Island Press, 392 p

[5] Costanza R., d'Arge R., de Goot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van der Belt M., 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387, 253-260

[6] Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystem and Human Well-Being: synthesis*, Island Press, 137 p.

[7] Boyd J., 2004. What's nature worth? Using indicators to open the black box of ecological valuation. *Resources* 154, 18 -22.

[8] Les services de supports font référence aux cycles biochimiques et géochimiques inhérents à tout écosystème. Ces services ne bénéficient donc que de manière indirecte aux populations humaines. Les services de production sont les plus communs. Il peut s'agir de production alimentaire, d'agrégats marins,… Les services de régulation correspondent au rôle de tampon que joue l'espace côtier entre la terre et l'océan, en diminuant l'intensité ou la fréquence des flux se déplaçant de l'un vers l'autre (e.g. la protection du littoral contre l'érosion marine). Les services culturels bénéficient directement aux populations riveraines, notamment sous la forme d'usages récréatifs

[9] Green E.P., Short T.F., 2003. *World Atlas of Seagrasses*. University of California Press.

[10] Barbier E., 2007. Valuing ecosystem services. *Economic Journal*, 178-229

pour justifier tel ou tel acte de gestion. La valeur des herbiers d'angiospermes a par exemple été estimée à 190004 $ par hectare et par an. Les services écologiques justifiant ce montant sont : i) la réduction du risque d'eutrophisation des zones côtières par l'absorption des nutriments (azote, phosphore) d'origine terrigène, ii) la limitation de l'érosion côtière grâce à leurs réseaux de rhizomes souterrains qui stabilisent les sédiments, iii) leur rôle de nourricerie et d'habitat pour des poissons d'intérêt commercial, iv) leur fonction de réservoir de biodiversité. Ce qui est vrai pour cet habitat l'est au même titre ou à d'autres titres pour d'autres habitats côtiers.

L'attendu en matière d'évaluation des services rendus par les écosystèmes est donc important[11] et représente une tâche considérable à la croisée de différentes disciplines environnementales[12, 13].

2- *Evolution des services écosystémiques / changements environnementaux planétaires : enjeux scientifiques*

Dans le contexte actuel des CEP, les habitats côtiers sont soumis à diverses menaces potentielles. Pour reprendre le cas de la zone intertidale/subtidale, elle se trouve être sous des menaces (aléas) d'origine naturelle (e.g. houle cyclonique ou charge terrigène croissante génératrice d'envasement) ou sociétale (e.g. pollutions, surfréquentations, etc.). En retour, au sein de l'écosystème côtier, la disparition de l'habitat peut avoir des répercussions négatives sur les autres compartiments du système. Par exemple, la disparition d'une vasière auto-épuratrice peut avoir des conséquences sur les niveaux sanitaires d'exploitations conchylicoles situées à proximité, sur des gisements coquilliers exploités, ou encore sur la qualité des eaux de baignade. Il en est de même de l'impact « continental » sur la zone côtière des mers non tidales qui abritent des écosystèmes et des habitats particuliers reposant sur une ou un petit nombre d'espèces clés, comme les herbiers de phanérogames marines ou le coralligène. La fragmentation et la disparition de ces milieux s'accompagneront d'une perte énorme et irréversible de biodiversité, celle-ci ayant des conséquences économiques entre autres sur la pêche (perte de ressources) ou le tourisme (perte d'attractivité). Comprendre le fonctionnement de tels systèmes côtiers, particulièrement sous pression, est un gage de prise de mesures de protection adéquates, permettant de limiter l'impact sur l'écosystème, sur la ressource et sur les services ainsi que d'une meilleure adaptation à la suite d'effets négatifs de changements climatiques (e.g. mortalités de masse provoquées par les canicules).

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

L'évaluation des conséquences environnementales et sociétales sur les zones côtières des changements environnementaux planétaires constitue un enjeu de recherche important, qui pourrait se décliner au niveau des impacts directs et indirects.

1- *Impacts directs*

- L'élévation du niveau de la mer : la géométrie du trait de côte s'en trouvera rapidement modifiée (érosion / accumulation, modification des bilans sédimentaires et conséquences

[11] Costanza R., 2008. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed. *Biological Conservation* 141, 350-352
[12] Chapman P. M., 2008. Ecosystem services: assessment endpoint for scientific investigations. *Marine Pollution Bulletin* 56, 1237-1238
[13] Beaumont N.J., Austen M.C, Atkins J., Burdon D., Degraer S., Dentinho T.P., Derous S., Holm P., Horton T., Vanlerland E., Marboe A.H., Starkey D.J., Townsend M., Zarzycki T., 2007. Identification, definition and quantification of goods and services provided by marine biodiversity: Implications for the ecosystem approach. *Marine Pollution Bulletin* 54 (2007), 253 -265

sur la stabilité des côtes). Dans ce contexte, les structures de défenses côtières notamment contre les surcotes (e.g. digues des polders) devront être recalibrées car menacées.

- Le changement du régime des tempêtes et nouveaux forçages sur les plans d'eau côtiers : la provenance et l'intensité des vents généreront des modifications des houles et occasionneront des impacts sur le trait de côte. La nécessité de modélisations fines de l'hydrodynamique côtière avec les nouveaux forçages issus des modèles prédictifs sera donc à prendre en compte pour l'aménagement de la zone côtière. De nouvelles attitudes face à l'érosion côtière doivent aussi être considérées comme le produit du changement environnemental planétaire (revisitation des approches de rechargement, défenses douces, nouvelles réflexions autour de l'évaluation des services rendus par les écosystèmes).

- Fragmentation et perte d'habitats : la connaissance du fonctionnement d'écosystèmes complexes comme le coralligène permet de prendre les mesures adéquates pour sa protection et celle de la biodiversité qu'il abrite. Cela permettrait aussi d'envisager des restaurations utiles (e.g. nurserie d'espèces commerciales) de zones dégradées.

2- *Impacts indirects*

- Les modifications des précipitations et des températures ont déjà commencé à modifier les flux arrivant des bassins versants côtiers vers la zone laguno-côtière. Parmi ces flux, les évolutions des apports sédimentaires des bassins versants amonts sont la conséquence de pratiques d'occupation des sols (e.g. déboisement ou reboisement des pentes, pratiques agricoles, gestion des rivières et fleuves, etc.). Les écosystèmes côtiers sont donc menacés par ces nouveaux intrants (qualité de l'eau – cf. DCE, qualité des productions tirées des ressources halieutiques, etc.) avec des conséquences sur l'activité côtière.

- Les changements hydrodynamiques impactent aussi très fortement l'équilibre des ressources côtières (habitats marins des petits fonds) par la redistribution des stocks sédimentaires avec des effets de feedbacks évidents. Les conséquences écologiques et économiques doivent être plus finement évaluées.

- Les ressources halieutiques s'en trouvent fragilisées (modulation de la chaîne trophique, développement des compétiteurs trophiques, modulations des habitats marins impactant les ressources exploitées etc.).

- Les ressources non halieutiques, les habitats, les espèces clés de voûte risquent de disparaître entraînant des dommages aussi bien d'ordre fonctionnel, qu'économique ou esthétique.

- Des interactions démographiques avec le continent peuvent voir surgir des flux migratoires nouveaux sur l'espace côtier déjà exigu, entraînant une pression foncière accrue, des problèmes d'accès et d'utilisation des ressources (l'eau, les espaces récréatifs etc.) susceptibles d'entraîner des conflits d'usages.

Axe 4 : Le suivi et la modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols : approfondir les approches multi-scalaires

ETAT DES LIEUX (Recherches passées et en cours) ET PERSPECTIVES (Quelques pistes pour des recherches futures)

La télédétection constitue l'un des moyens les plus adaptés pour suivre et caractériser les changements d'occupation et d'utilisation des sols aussi bien en milieux urbains, agricoles ou mixtes. L'acquisition d'images satellitaires ou de photographies aériennes contribue à la constitution de bases de données qui sont indispensables : i) à l'identification des processus à l'origine de ces changements de façon participative, à dire d'experts ou autre, ii) à l'identification des facteurs expliquant leur localisation et iii) à la caractérisation des structures spatiales (« landscape pattern », morphologie urbaine, etc. selon le type de problématique et de territoires étudiés) et de leurs dynamiques (étalement, polycentrisme, etc.)[14].

La télédétection (données satellitaires, méthodes de traitements) est largement reconnue et utilisée pour caractériser avec précision les types d'occupation et d'utilisation des sols à des échelles spatiale et temporelle variées, mais également des « objets spatiaux » ayant une fonctionnalité (e.g. bandes enherbées, parcelles agricoles, bâtis, etc.). Pour pouvoir être détectés, les changements requièrent l'utilisation de données multi-temporelles à des résolutions spatiales semblables. Les limites relatives aux résolutions spatio-temporelles (répétitivité d'acquisition, disponibilité des données au regard des conditions climatiques, etc.) et spectrales des capteurs satellitaires (les fenêtres spectrales d'acquisition ne sont pas toujours identiques d'un capteur à l'autre soulevant ainsi des problèmes pour caractériser les mêmes éléments) sont extrêmement contraignantes pour le suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols. Ceci a pour effet que les études actuelles se focalisent principalement, voire quasi-exclusivement, sur le suivi des types d'occupation et d'utilisation des sols à une échelle spatiale donnée. Peu de recherches portent sur le suivi d'un terrain d'étude à plusieurs échelles spatiales différentes (type de bâtis, morphologie de quartiers, diffusion d'une zone urbaine) afin de mieux caractériser l'ensemble des processus et dynamiques de l'évolution des milieux urbains ou agricoles. Ce type d'approches à différentes échelles spatiales et temporelles est essentiel pour appréhender les phénomènes globaux et locaux présentant des dynamiques temporelles différenciées[14], c'est-à-dire à toute démarche intégrée.

Par ailleurs, les cartographies qui en résultent constituent une des sources de données d'entrée des modèles de simulation des changements d'occupation et d'usages des sols, quelle que soit leur échelle spatiale de restitution. D'une façon générale, là encore (et peut-être y a-t-il une relation causale ?) la grande majorité des recherches portant sur la modélisation des changements d'occupation et d'utilisation des sols se limite à une résolution spatiale, soit grossière (pixels variant de 0.25 à 1 km²), soit fine (celle de l'objet géographique élémentaire constitutif du territoire étudié tel qu'un arbre, une parcelle, etc.). Leurs utilisations respectives se limitent donc à des problématiques et des processus soit globaux (changement climatique[15], séquestration du carbone[16], bioénergies[17]), soit locaux

[14] Lambin E.F. and Geist H.J. (eds), 2006. Land use and land cover: Local processes and global impacts. *The IGBP series*, Springer, Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-540-32201-6, p. 222

[15] Alcamo J, Leemans R., Kreileman E. (eds), 1999. Global Change Scenarios of the 21st Century: Results from the IMAGE 2.1 Model, Elsevier Science, The Netherlands

[16] Schulp C.J.E., Nabuurs G.J., Verburg P., 2008. Future carbon sequestration in Europe—effects of land use change. *Agriculture Ecosystem Environment*, 127:251–264. http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2008.04.010

[17] Eggers, J., Tröltzsch, K., Falcucci, A., Verburg, P.H., Ozinga, W.A., 2009. Is biofuel policy harming biodiversity in Europe? *GCB Bioenergy* 1(1):18-34. http://dx.doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01002.x

(qualité des eaux, érosion des sols[18]). Si les enjeux relevant d'un couplage intégré de ce type de modèles pour prendre en compte l'ensemble des processus globaux-locaux sont forts, les contraintes techniques sont très complexes alors même que les modélisations « mono-scalaires » simulant les interactions Nature-Société doivent encore être améliorées. Des premières tentatives existent, mais résultent plus d'une utilisation combinée de modèles que de véritable couplage de modèles[19, 20].

[18] Houet T., Loveland T.R., Hubert-Moy L., Gaucherel G., Napton D., Barnes C.A. and Sayler K., 2009. Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies, *Landscape Ecology*, http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9362-8

[19] Castella J.C., Kam S.P., Quang D.D., Verburg P., Hoanh C.T. 2007. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land use policy* 24:531–545. http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2005.09.009

[20] Verburg P. and Overmars K., 2009. Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model, *Landscape Ecology,* http://dx.doi.org/10.1007/s10980-009-9355-7

Thème 2 : Ecosystèmes, biodiversité et vulnérabilité du vivant (continental et marin)

Animateurs du thème : Wolfgang Cramer, Anne Larigauderie, Olivier Maury, avec l'appui de Olivier Aumont, Denis Couvet, Jean-François Silvain
Rédacteurs : Laurent Bopp, Denis Couvet, Wolfgang Cramer, Pierre Friedlingstein, Olivier Maury, Jean-François Silvain, Nicolas Viovy

INTRODUCTION : Présentation du thème

L'apport de services essentiels de la biosphère globale pour l'humanité (alimentation, fibres, molécules d'intérêt, loisirs, mais aussi stockage et export de carbone, etc.) est vulnérable en raison des changements climatiques, du changement d'occupation des sols et de l'exploitation croissante des ressources naturelles. Le fonctionnement des écosystèmes (naturels/anthropisés, continentaux/marins) et les services rendus par ces différents écosystèmes dépendent de la biodiversité (génétique, diversité d'espèces et d'écosystèmes) à de multiples niveaux. Pour une meilleure estimation de la vulnérabilité du vivant aux changements globaux, et pour une meilleure prédiction des changements futurs et des risques associés, la biodiversité se doit d'être mieux comprise et prise en compte.

Il s'agira de faire porter les efforts sur:

- L'impact des CEP sur la biodiversité marine et continentale et sur le fonctionnement des écosystèmes à l'échelle planétaire (disparition ou modifications d'écosystèmes, de communautés ou d'espèces),
- L'impact des changements globaux sur les services rendus à l'homme liés à la diversité des écosystèmes (e.g. dommages sur la stabilité et la disponibilité des ressources agricoles et marines, perte de la faune sauvage, etc.),
- Et les rétroactions entre les modifications de la biodiversité ou de la structure des écosystèmes avec le système climatique (e.g. changements du stockage de carbone dans les écosystèmes, modifications biologiques de la pompe à carbone des océans, etc.).

Un aspect important devra concerner l'amélioration de la représentation de la biodiversité dans les modèles du Système Terre utilisés pour comprendre et prédire les changements globaux futurs. Afin de réaliser ces objectifs, il sera nécessaire de regrouper des scientifiques de disciplines différentes telles que climatologie, écologie (fonctionnelle, microbienne), biogéochimie, économie, agronomie, génétique, etc..

Notons qu'au niveau continental, les recherches passées ou futures explorées dans le cadre de l'ARP CEP sont principalement tournées vers le végétal. Il est bien entendu que les CEP ont et auront certainement un impact sur la biodiversité animale, mais l'expertise nécessaire à cette analyse, et au retour potentiel de ces impacts sur le global, n'a pas pu être réunie au sein du groupe. L'approche de la biodiversité est donc ici partielle.

A. Partie terrestre

Axe 1 : Modélisation de l'impact des CEP sur la biodiversité et la vulnérabilité des écosystèmes terrestres

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Etat de l'art

Historiquement, la modélisation de l'impact des CEP sur les écosystèmes terrestres a conduit à la constitution de plusieurs types de modèles distincts. Une première catégorie de modèles vise à définir les aires de répartition d'espèces végétales ou de types fonctionnels de plantes. A l'échelle de l'espèce, pour pouvoir décrire des aires de répartition pour des conditions climatiques données, il est nécessaire de prendre en compte un ensemble important de critères et de considérer des méthodes de résolution numérique relativement complexes.

A l'échelle globale, l'objectif des biogéographes était de pouvoir définir les grands biomes terrestres en équilibre avec les conditions climatiques. A l'échelle du biome, les critères de définition de la présence/absence sont nettement moins complexes qu'à l'échelle de l'espèce, ce qui a permis des approches beaucoup plus simples que les modèles de niche. Les premières approches basiques (Holdridge) visaient à découper le domaine climatique (température/précipitation) en zones définissant les conditions de présence de chaque type de biomes. Progressivement, l'approche s'est affinée en prenant en compte des critères plus détaillés comme les biotempératures et des indices de l'humidité du sol (e.g. ERA-NET BIOME).

Ces approches présentaient néanmoins l'inconvénient de n'avoir de sens qu'en équilibre avec le climat et d'être donc mal adaptées à simuler la réponse au changement environnemental futur (climat, composition de l'atmosphère changement d'usage des sols). Ceci a conduit au développement des Dynamic Global Vegetation Model (DGVM). Ce type d'approches couple la dynamique de la végétation avec son fonctionnement fondé sur un ensemble de mécanismes visant, en particulier, à simuler la productivité. L'hypothèse de base de ce type de modèles est que la compétition entre types de végétation se fait en faveur du type le plus productif. Cependant, ces modèles ne représentent pas (ou mal) certains critères tels que le succès reproducteur ou l'adaptation des types de végétation. Le simple critère de productivité n'est donc pas suffisant pour décrire les aires de répartition et un ensemble de critères bioclimatiques sont conservés pour contraindre la présence on non d'un type de végétation. De même, la notion de dispersion et donc de propagation n'est pas décrite. En effet, sur ces grandes échelles d'espace, on ne sait pas décrire de tels processus qui ne peuvent être représentés par les fonctions classiques de dispersion de graines. Aussi, l'hypothèse est que toute zone peut potentiellement faire apparaître un type de végétation à un instant donné.

Dans le même temps, est apparue la notion de types fonctionnels de plantes (PFT) qui a remplacé celle de biomes. Il s'agissait de sortir des critères taxonomiques classiques pour regrouper la végétation par un ensemble de caractéristiques fonctionnelles. En réalité, un type fonctionnel pour un modèle représente une entité qui peut être représentée par un même jeu d'équations et de paramètres, sachant que le modèle, qu'il s'agisse d'un modèle stationnel ou global, représente le fonctionnement d'une plante moyenne.

Certains modèles globaux n'intègrent pas la partie DGVM et représentent uniquement le fonctionnement des écosystèmes, ceux-ci étant prescrits. C'est en particulier

le cas de modèles spécialisés pour représenter un type spécifique de végétation (ou un groupe) mais suffisamment générique pour s'appliquer à large échelle. Ce type de modèles, bien que ne permettant pas de décrire les aires de répartition, peuvent néanmoins s'avérer un bon indicateur de présence ou d'absence en fonction de la productivité qu'ils simulent. Il faut noter cependant que la plupart de ces modélisations (à l'exception de modèles spécifiques à l'échelle locale) représentent mal la biodiversité et ne représentent pas l'impact de la biodiversité intra-PFT sur le fonctionnement de cette dernière et donc sur le reste du Système Terre. Ainsi, la capacité de réponse des écosystèmes dépend très fortement de la diversité fonctionnelle présente. Un écosystème divers a de meilleures performances qu'un écosystème qui ne serait composé que du PFT optimal (Norberg, 2001, PNAS).

Au niveau de l'espèce, entre les modèles de fonctionnement qui ne décrivent pas explicitement les aires de répartition et les modèles de niches qui ne décrivent pas explicitement le fonctionnement, on trouve des modèles hybrides (comme PHENOFIT) dont l'objectif, comme les modèles de niche, est de prédire les aires de répartition mais qui modélisent les processus comme la phénologie ou la fitness et, de façon simplifiée, la productivité potentielle de la végétation.

2- Interactions entre les groupes disciplinaires

Une des difficultés majeure rencontrée dans l'étude de l'impact des CEP sur les écosystèmes terrestres vient de la grande différence d'échelle spatiale abordée par la communauté des écologues et écophysiologistes d'une part et celle des climatologues d'autre part. Les climatologues abordent l'échelle globale avec une taille de maille typique de 50 à 100 km alors que les écologues fonctionnent à l'échelle au plus de quelques hectares dans le domaine de l'expérimentation, mais à une échelle comparable à celle des climatologues, en ce qui concerne les suivis, fournissant de très nombreux résultats quant à la réponse de la biodiversité aux changements globaux, notamment climatiques. Ce grand écart est encore plus important avec la communauté des Sciences du sol qui travaille sur les communautés microbiennes à l'échelle de quelques centimètres/mètres carrés. Il existe donc une ligne de rupture assez nette entre les études de processus qui décrivent le fonctionnement des écosystèmes et leurs réponses aux conditions environnementales et les études liées à l'étude du changement climatique.

Pour les climatologues, il est apparu rapidement nécessaire d'améliorer la représentation des surfaces continentales, et, en particulier, le rôle des écosystèmes, leur rétroaction sur le climat étant fondamentale. C'est pourquoi, ils ont initié le développement de modèles globaux de végétation et de sol. Mais cette communauté scientifique ne possède pas une connaissance très détaillée en écologie, ce qui a pu amener à des choix de modélisation non pertinents. En revanche, ils ont pu aborder la nécessaire simplification de la représentation des écosystèmes à l'échelle globale, verrou conceptuel plus difficile à lever pour les écologues plus proches de la réalité du terrain. Si de nombreux progrès ont été accomplis dans les dernières années pour tenter de relier les études de processus et les études à grande échelle, c'est un point fondamental qui reste à améliorer.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

La représentation actuelle des PFT est limitée par le fait que l'on considère, à l'intérieur d'un PFT, une représentation homogène. Concrètement, la variabilité spatiale simulée dépend uniquement des conditions climatiques et pédologiques, mais pas de la variation des paramètres physiologiques à l'intérieur d'un PFT. Une première approche pourrait consister à prendre en compte une variation spatiale d'un ensemble de paramètres du modèle. Un effort international coordonné par DIVERSITAS vise à développer des bases de données de ce type qui pourraient ainsi être utilisées. Cependant, à plus long terme une

réflexion est menée pour passer de la notion de PFT à celle de traits fonctionnels. Nous n'aurions ainsi plus des types de végétation mais un assemblage de traits fonctionnels. Ces derniers permettraient une évolution continue de la représentation dans l'espace et dans le temps avec une meilleure prise en compte de l'adaptation des écosystèmes aux changements climatiques.

En parallèle, il est nécessaire d'améliorer notre représentation des processus. Il est donc essentiel de formaliser le devenir de la diversité, des facteurs naturels ou humains qui la modifie (dispersion, facteurs de sélection locale et régionale, effets stochastiques liés aux effectifs, modification des interactions biotiques au sein des communautés, processus adaptatifs, etc.).

Au niveau biogéochimique, beaucoup de modèles ne représentent encore que le cycle du carbone et éventuellement le cycle de l'azote de façon très simplifiée. L'interaction entre les différents cycles est pourtant indispensable pour décrire correctement la réponse aux CEP. Par exemple, on a pu montrer que la limitation en azote pourrait fortement limiter l'effet de fertilisation du CO_2 pour le futur. Par ailleurs, l'azote intervient dans la composition des GES comme le protoxyde d'azote (N_2O), dont les émissions restent encore très mal connues, et également sur différents composés réactifs qui vont interagir avec la chimie atmosphérique. D'autres cycles, comme celui du phosphore qui est le principal nutriment limitant de la productivité tropicale, ne sont pas intégrés dans les DGVMs actuels mais ils sont vraisemblablement importants à prendre en compte.

Si la représentation des processus instantanés comme les bilans de surface, le flux net de carbone est relativement bonne, celle des processus de plus long terme l'est beaucoup moins. Des améliorations à ce niveau passent par une meilleure représentation des processus de croissance/mortalité et par une meilleure prise en compte des effets à long terme des événements extrêmes (e.g. l'évolution du niveau de réserves des plantes et leur possible dégradation suite à des conditions défavorables).

De manière similaire, les modèles ne prennent pas en compte par exemple la surmortalité liée à des phénomènes d'embolie ou autres, ni les interactions entre plantes et pathogènes et insectes phytophages[21]. De façon plus générale, les processus de régénération/survie, de « fitness » et de l'impact des perturbations (incendies, tempêtes, etc.) ne sont pas non plus représentés.

Dans les DGVM, la notion de biodiversité est très réductrice puisqu'elle se limite à la coexistence de quelques PFT au sein d'une grille du modèle. Le passage à un assemblage de traits fonctionnels pourra améliorer cette représentation. Il reste cependant que la notion de biodiversité intra-PFT n'existe pas. Or on sait qu'elle est un facteur d'adaptation et de limitation de la vulnérabilité. La prise en compte de cette notion de biodiversité au sein d'un PFT, de sa réponse aux CEP et de son influence sur le fonctionnement serait une autre piste de recherche importante à explorer.

Autant la représentation du cycle du carbone aérien a connu des développements importants et est de plus en plus fondée sur des principes physiologiques connus, autant celle de la partie souterraine, c'est à dire la décomposition des matières organiques des sols (MOS) est à un stade nettement plus primitif. On sait pourtant que la réponse de la respiration des sols aux CEP est un facteur clé du cycle du carbone futur. Des études ont montré des résultats contradictoires sur la réponse des sols à l'augmentation de la

[21] Voir notamment l'article de Kurz *et al.* (*Nature* 452, 987, 2008) qui ont calculé que l'impact cumulé des pullulations du coléoptère *Dendroctonus ponderosae* dans les 374 000 ha de forêts de conifères du centre-sud de la Colombie britannique entre 2000 et 2030 pourrait correspondre à 270 millions de tonnes de carbone du fait de la mortalité des arbres attaqués.

température. Pourtant il s'agit d'un parent pauvre de la modélisation, la représentation de la décomposition des MOS dans la plupart des modèles étant pour l'essentiel issue de l'approche développée dans le modèle CENTURY il y a plus de 20 ans. Cette approche a recours à des paramétrisations simples reliant la décomposition à des facteurs environnementaux tels que la température et l'humidité du sol. Elle ne représente pas la dynamique et la biodiversité des populations microbiennes de décomposeurs ou les mécanismes de protection des sols. Pourtant différents effets comme la stimulation de la minéralisation par l'apport de matière organique fraîche (priming effect) sont connus. Si de nouvelles études commencent à voir le jour, un effort important doit être poursuivi qui bute sur les différences d'échelles considérables mises en jeu.

L'ensemble de cet effort de modélisation doit bien entendu s'accompagner d'un effort accru d'évaluation des modèles et d'estimation des incertitudes liées aux simulations. Pour l'évaluation des modèles, on peut s'appuyer sur différentes sources de données. Il existe d'une part, les données d'observatoires sur le long terme. En particulier, on dispose de sites instrumentés des flux d'énergie, d'eau et de CO_2 sur près de 300 stations à travers le monde qui permettent de disposer de mesures à haute répétitivité temporelle (1/2 heure) sur plusieurs années (une dizaine d'années pour les plus anciens sites). De même, on dispose d'un réseau dense de mesures de suivi de la composition atmosphérique. Les communautés concernées sont bien organisées et des projets d'infrastructure à long terme se mettent en place (comme ICOS) qui permettront d'avoir des observations pérennes et donc de pouvoir s'appuyer sur des mesures de qualité sur de longues périodes. Il existe également des réseaux de suivi sur la biodiversité (e.g. GEO-BON) ou sur la phénologie sur de longues périodes qui permettent d'évaluer la capacité des modèles à reproduire la réponse au changement climatique. Souvent moins bien organisées en réseau, leur pérennité n'est pas toujours assurée, il est donc important d'insister sur la nécessité de maintenir et développer ce type de réseaux.

On dispose d'autre part d'un ensemble d'expériences de changement environnemental sur les écosystèmes, que ce soit les expériences de type FACE d'enrichissement en CO_2, ou encore des expériences d'accroissement de température ou de réduction de précipitation qui permettent d'étudier à la fois la réponse fonctionnelle et de diversité des écosystèmes.

Enfin, on notera une multitude de données fonctionnelles très disséminées dans la littérature. Sur cet aspect, un effort important de mise au point de bases de données internationales se met en place qui doit être soutenu et poursuivi. Il ne s'agit pas simplement de collecter les données mais également de mettre en place des outils complexes d'analyse de ces bases qui permettront de faire émerger de nouvelles propriétés fonctionnelles et d'alimenter les modèles (e.g. l'initiative TRY d'IGBP). Enfin, il est important de prendre en compte et renforcer l'acquisition des données paléoclimatiques qui seules permettent d'évaluer les modèles dans des conditions climatiques différentes du présent. Le projet PAGES a en particulier permis récemment la mise en place de bases de données globales.

L'ensemble de ces informations doit permettre de mieux évaluer le réalisme des modèles mais également d'apporter des pistes pour l'amélioration de ces derniers. Deux axes en particulier semblent importants à renforcer :

- Définir des jeux de données et de protocoles standard qui permettraient de comparer de manière récurrente l'ensemble des modèles. De telles activités existent pour les modèles de circulation générale du climat par exemple. Au niveau des modèles continentaux, il existe déjà des travaux d'évaluation, mais ils sont effectués généralement de manière individuelle, et donc fondés chacun sur des données et des protocoles différents : il est donc difficile de comparer les modèles entre eux. Il y a néanmoins quelques rares projets de comparaison qui ont été réalisés, mais à un instant donné et pour un ensemble de modèles restreints.

- Définir de nouvelles méthodes de comparaison modèles/mesures pertinentes sachant qu'une des difficultés de la comparaison vient des différentes échelles de temps mises en œuvre (e.g. comment évaluer la capacité d'un modèle à reproduire les échelles journalières, saisonnières, interannuelles et les tendances à long terme ?).

Il convient d'insister fortement sur le fait qu'au-delà de ces approches fonctionnelles, il est indispensable de multiplier les suivis, afin de disposer des informations nécessaires sur les différents compartiments de biodiversité, leur réponse aux changements globaux à l'échelle continentale.

L'autre axe dual de l'évaluation des modèles est l'estimation des incertitudes. Cette question est toujours complexe à traiter dans la mesure où l'on ne connaît pas nécessairement les incertitudes liées aux paramètres des modèles. On peut distinguer différents types d'incertitudes :

- L'incertitude d'ordre épistémique liée à notre connaissance des processus. Elle peut être abordée en utilisant un ensemble de modèles pilotés par les mêmes jeux de données d'entrée. On privilégiera donc les approches multi-modèles et les méthodes d'analyses associées. A ce titre, les travaux du GIEC offrent une large palette de méthodes pour la comparaison des modèles qu'il reste cependant à adapter aux modèles d'écosystèmes.

- L'incertitude liée aux forçages (climatique, pédologique, anthropique etc…). Il est important d'avoir une meilleure évaluation de ces incertitudes en réalisant pour chaque modèle un ensemble de simulations en faisant varier les forçages. La réalisation d'un ensemble de simulations étant coûteux, il convient de sélectionner intelligemment un nombre restreint de forçages les plus représentatifs possibles. De même, qu'il est important de définir des jeux standard pour le « benchmarking » des modèles, il est nécessaire de définir un ensemble de forçages standard qui permettent de bien isoler les différents types d'incertitudes (épistémique et de forçage).

- L'incertitude liée aux paramètres des modèles. Il apparaît important dans un premier temps de bien estimer la sensibilité du modèle aux différents paramètres. En effet, l'incertitude sur un paramètre peu sensible est moins critique que sur un paramètre très sensible. Il parait ensuite intéressant de développer des méthodes qui permettent d'associer des incertitudes aux paramètres d'entrée des modèles que l'on puisse ensuite propager pour estimer les incertitudes sur les variables de sortie. Différentes méthodes, soit statistiques (e.g Monte Carlo, Metropolis..), soit par linéarisation (e.g. adjoint, tangent linéaire, etc.) existent pour aborder cette problématique.

Axe 2 : Impact des changements globaux sur les services liés à la diversité des écosystèmes terrestres

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Etat de l'art

Les modèles globaux décrits ci-dessus se sont d'abord focalisés sur la représentation des écosystèmes naturels. Mais le fait qu'une large part des écosystèmes soit plus ou moins fortement anthropisés a conduit depuis quelques années à chercher à introduire dans les modèles globaux une représentation plus réaliste des agrosystèmes qui puisse prendre en compte en particulier l'impact de la gestion sur le fonctionnement des écosystèmes. L'objectif initial était principalement d'améliorer la connaissance des effets de rétroaction de ces agrosystèmes sur le système climatique. Mais ces outils sont également de plus en plus

utilisés pour étudier l'impact des changements globaux sur les services liés à ces écosystèmes car, bien que simplifiés par rapport aux modèles agronomiques classiques, ils permettent une approche intégrée à grande échelle. Le couplage de ces modèles globaux de fonctionnement des agrosystèmes avec les modèles de réallocation des terres commence également à être envisagé. Ce type de couplage existe depuis plusieurs années, en particulier avec le modèle IMAGE, mais dans ce type de modèle, la représentation du fonctionnement des agrosystèmes reste très empirique. L'intérêt des approches plus mécanistes est de pouvoir prendre en compte de façon détaillée la réponse des agrosystèmes aux CEP (principalement climat et CO_2). L'apport du couplage est alors que le modèle d'agrosystème peut fournir au modèle économique des fonctions dynamiques de rendement en fonction des conditions climatiques alors qu'elles sont pour l'instant tabulées. Des approches pionnières de couplage entre le modèle de végétation LPJmL (Bondeau *et al.* 2007)[22] et des modèles de réallocation comme KLUM et MagPIE (Lotze-Campen *et al.* 2008)[23] ont permis de mettre en évidence l'importance du couplage entre les modèles sur les fonctions de réallocation des terres simulés.

2- *Interactions entre les groupes disciplinaires*

Ces études sont fortement interdisciplinaires et ont fait intervenir jusqu'à présent principalement les communautés des climatologues, des écophysiologistes, des agronomes et les économistes.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

Ce type d'approches couplées fonctionnement/agronomie/économie reste pionnier. Il semble important de développer des approches qui intègrent de façon cohérente non seulement l'agriculture mais aussi l'élevage et la sylviculture pour être à même de bien comprendre l'impact du changement d'allocation des terres sur l'ensemble des écosystèmes. Il semble également important de pouvoir intégrer les nouveaux types de cultures qui vont être amenés à se développer fortement dans un avenir proche (e.g. biocarburant, taillis à courte rotation, etc.) et les nouveaux modes de gestion.

Enfin, il est nécessaire de prendre en compte les variations de diversité à cette échelle, qui a un effet majeur sur les réponses des écosystèmes aux perturbations, sur leur résilience, et qui est très sensible aux variations de fragmentation. Cela déterminera par exemple la réponse de la fonction « stockage de carbone » aux différentes perturbations locales.

Axe 3 : Rétroactions des modifications écologiques sur le Système Terre (cycle de l'eau, du carbone, de l'azote, etc.)

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

Beaucoup d'études portent sur l'impact des états de surface sur le climat, en particulier, pour comprendre les interactions végétation - climat sur des périodes clés des climats passés comme le dernier maximum glaciaire ou la période de l'Holocène dite du « Sahara vert » (6000 ans BP). En effet, ces périodes où un changement relativement bien

[22] Bondeau A., Smith P.C., Zaehle S., Schaphoff S., Lucht W., Cramer W., Gerten D., Lotze-Campen H., Müller C., Reichstein M., Smith B. 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13:679-706, doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01305.x

[23] Lotze-Campen H., Müller C., Bondeau A., Rost S., Popp A., Lucht, W. , 2008. Global food demand, productivity growth and the scarcity of land and water resources: a spatially explicit mathematical programming approach. *Agricultural Economics* 39(3): 325-338, doi: 10.1111/j.1574-0862.2008.00336.x

documenté de végétation drastique a eu lieu, sont idéales pour comprendre les interactions végétation-climat et évaluer la capacité des modèles à les simuler. La rétroaction physique de la surface est prise en compte dans les simulations climatiques depuis plus de 20 ans. Il reste néanmoins des progrès à effectuer dans certains domaines tels que la représentation du changement d'utilisation des sols dans les modèles climatiques, la physique des pergélisols, la dynamique de la neige, l'extraction racinaire, etc. Au niveau des cycles biogéochimiques, le couplage avec le système climatique est une science beaucoup plus récente.

Les études pionnières (Sellers *et al*. 1996, Betts *et al.* 1997) abordaient uniquement des aspects partiels du couplage tels que l'impact de l'augmentation du CO_2 sur la photosynthèse et la couverture foliaire et en retour la rétroaction via les échanges d'eau et d'énergie avec l'atmosphère. Elles ont ensuite été suivies par les premières études de couplage complet climat-carbone (Cox *et al.* 2000, Dufresne *et al.* 2002) qui ont conduit au projet C4MIP (Friedlingstein *et al.* 2006) et à la prise en compte de ce couplage climat-carbone dans les projections climatiques du 4ème rapport du GIEC. Quelques études commencent à apparaître pour prendre en compte également le cycle de l'azote. Un effort qui se met en place à l'échelon international avec un programme comme LUCID, vise maintenant à comprendre l'interaction du changement d'utilisation des terres avec le système climatique et également à terme avec le cycle du carbone.

A noter également l'importance de l'émission d'un ensemble de composés biogéniques (e.g. terpènes, isoprènes, etc.) qui vont interagir avec la chimie de l'atmosphère et donc contrôler en partie le devenir du méthane et de l'ozone troposphérique, mais également des aérosols d'origine biogénique.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

La différence de réponses des modèles climatiques couplés avec la surface montre qu'il reste encore un large effort de développement des modèles de surface à effectuer. En complément, il semble important d'améliorer les modélisations des émissions des différents composés biogéniques qui peuvent modifier la réponse climatique via la chimie de l'atmosphère et les aérosols. Les paramétrisations restent pour l'instant très empiriques : une approche plus mécaniste rendue possible par la simulation d'un nombre important de processus biologiques est souhaitable.

Un travail conséquent reste probablement à faire au niveau du couplage entre les modèles de surface et les modèles de climat. En effet, il existe un problème fondamental lié au changement d'échelles entre le modèle de climat qui représente un climat moyen sur la grille alors que le modèle de végétation représente fondamentalement une plante moyenne et est adimensionnel. Par exemple, les précipitations issues des modèles sont en général distribuées de façon très continue (de type crachin). Si l'on utilise les valeurs d'interception d'eau par le feuillage classiques, aucune pluie ne parvient au sol. Il est donc nécessaire de modifier ce paramètre, etc. Il s'agit d'un exemple parmi d'autres qui conduit en général à une réponse trop brutale de la surface au climat par rapport à ce qu'elle devrait être à plus grande échelle. Recalibrer les paramètres du modèle de surface n'est pas une bonne solution car il est fondamental qu'ils correspondent à des valeurs physiques mesurées et que le modèle puisse être évalué par rapport à des mesures locales. Aussi, faudrait-il prévoir une interface d'agrégation/désagrégation entre la surface et l'atmosphère, approche qui est encore rarement prise en compte.

De plus en plus d'études s'intéressent aux climats régionaux parce que la société est d'abord concernée par les impacts des CEP à l'échelle locale, mais aussi parce que l'on perçoit bien que la variabilité rapide du climat et les événements extrêmes font intervenir la

rétroaction régionale de la surface sur le climat. De même, les premières études de rétroaction du changement d'utilisation des terres sur le climat montrent que si l'impact global est faible, il peut, régionalement, être très important. Or, la représentation des surfaces dans les modèles méso échelle est relativement en retard par rapport à celle des modèles globaux. En effet, si plusieurs modèles du Système Terre intègrent des modèles de surface assez sophistiqués, ceux utilisés dans les modèles méso échelle restent assez simples. Une perspective intéressante serait d'améliorer les schémas de surface des modèles méso échelle incluant les cycles biogéochimiques à l'instar des GCM.

Axe 4 : Amélioration de la représentation de la biodiversité dans les modèles «Système Terre» utilisés pour comprendre et prédire les changements globaux

Les modèles globaux de végétation étant intimement liés aux modèles du Système Terre, ils sont de fait reliés à ce qui a déjà été dit précédemment. L'amélioration de la représentation de la biodiversité dans les modèles passe par celle des modèles qui simulent l'impact des CEP sur la surface et la rétroaction sur le climat. Il paraît important, à l'échelle globale, d'utiliser les mêmes modèles, que ce soit pour les études d'impacts (c'est-à-dire en mode off-line) et pour la rétroaction climatique (mode on-line).

B. Partie Marine

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Introduction : CEP et écosystèmes marins

Les océans couvrent les trois quarts de la surface de la planète et les écosystèmes qu'ils abritent jouent un rôle fondamental dans le cycle du carbone à l'échelle globale. Ils constituent notamment un puits de CO_2 majeur puisqu'ils séquestrent et exportent vers l'océan et les sédiments profonds une large part du CO_2 dissous dans l'eau de mer (pompe biologique à carbone). Ils abritent par ailleurs des ressources halieutiques dont l'importance est capitale pour de nombreux pays (notamment pour les pays du sud) pour lesquels elles constituent une source de protéines alimentaires essentielle et un facteur de profit et d'activités économiques important. Les produits de la mer représentent en effet plus de 20% du bol alimentaire protéique moyen de près de 2.6 milliards de personnes sur la planète (FAO, 2006) et de nombreuses communautés littorales sont structurées autour de l'activité de pêche et des filières associées qui assurent leur survie et leur cohésion. Ainsi, plus de 105 millions de tonnes de poissons sont actuellement retirées chaque année des océans (FAO, 2006) par les pêcheries artisanales et industrielles qui exploitent toutes les eaux du monde, jusqu'à plus de 1000 m de profondeur.

Pourtant, il est désormais clair que les sociétés humaines sont devenues les déterminants de changements environnementaux majeurs au sein des océans. En particulier, le changement climatique lié à l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre et la surexploitation généralisée des ressources marines par la pêche ont des impacts environnementaux, économiques et sociaux multiples et croissants, notamment dans les pays du Sud. L'ampleur de ces changements environnementaux planétaires est telle que le fonctionnement des écosystèmes marins est désormais altéré, des échelles locales aux échelles globales, avec en retour des effets potentiellement importants sur le Système Terre et sur les « services » fournis par les écosystèmes marins aux sociétés humaines.

Il a ainsi été montré, à partir d'observations et de résultats de modèles biogéochimiques (Le Quéré *et al.* 2009), que le puits de carbone océanique, responsable d'une séquestration de près du tiers des émissions anthropiques de carbone, semblait saturer au cours des deux dernières décennies. Même si ce phénomène récent semble être directement lié à la physique océanique, une modification significative de l'activité biologique des océans pourrait dans l'avenir contribuer à la saturation de ce puits de carbone. Si le changement climatique favorise la prédominance de types phytoplanctoniques de petites tailles au détriment de ceux de plus grandes tailles, comme cela est envisagé dans certains scénarii climatiques (Bopp *et al.* 2005), l'efficacité de cette pompe biologique de carbone pourrait s'en trouver réduite.

Par ailleurs, l'augmentation de la concentration en CO_2 de l'atmosphère a également entraîné un accroissement de celle en CO_2 dissous dans l'eau de mer, provoquant une augmentation de la teneur en carbonates et une baisse substantielle du pH (acidification) de l'océan dont les conséquences sur la biologie et la biogéochimie marines sont encore mal comprises mais sont et seront vraisemblablement importantes. Les modifications du climat touchent également les espèces marines des échelons trophiques supérieurs, soit directement en raison des changements de température et d'hydrologie liés au changement climatique, soit indirectement via les modifications de la production primaire. Ces effets du climat viennent s'ajouter aux effets directs des pêches qui diminuent l'abondance des ressources et la biodiversité, modifient la structure des écosystèmes et détruisent les habitats benthiques et démersaux. Aujourd'hui, selon la FAO (2006), prés de 85% des ressources marines sont pleinement exploitées, surexploitées ou effondrées et la tendance ne fait que s'accentuer. Cette situation de surexploitation généralisée se traduit par une stagnation des captures mondiales alors que l'effort de pêche déployé ne cesse d'augmenter. En raison de l'importance des ressources marines pour l'alimentation et du rôle des pêcheries dans l'économie et la structuration des communautés humaines côtières, en particulier dans les pays du sud, cette surexploitation des ressources marines, largement due à la surcapacité des pêcheries, est un aspect important de la crise alimentaire et environnementale mondiale.

De plus, la pollution chimique des eaux marines - par des contaminations variées (e.g. perturbateurs endocriniens, métaux lourds, organo-chlorés, xénobiotiques, etc.) - touche tous les organismes marins et se concentre le long des réseaux trophiques, atteignant dans certains cas des niveaux de contamination importants pour les espèces d'intérêt commercial.

Enfin, l'existence de rétroactions entre les différents systèmes (atmosphérique, hydrologique, bio-géochimique, écosystémique, humain) entraîne des non-linéarités dans leurs interactions qui sont potentiellement à l'origine d'évolutions rapides voire catastrophiques de leurs dynamiques (changements de régime). Ces changements de régime, qui correspondent au passage d'un état stable à un autre état stable de l'écosystème, touchent de nombreuses composantes des écosystèmes et sont potentiellement irréversibles ou difficilement réversibles. Ainsi, de nombreux changements de régime importants ont récemment touché des écosystèmes marins exploités. Par exemple, les effets conjoints de la pêche et du climat ont entraîné un bouleversement structurel de l'écosystème du Georges Bank et le remplacement des stocks de morue du Canada, exploitée depuis plusieurs siècles, par des organismes benthiques et démersaux (crustacés, céphalopodes). Dans plusieurs régions du monde (Namibie, Mer Noire, etc…), des écosystèmes typiquement structurés autour de chaînes trophiques de type diatomées-copépodes-poissons-pêcheries ont été remplacées par des écosystèmes de type flagellés-microzooplancton-méduses inexploitables par la pêche.

Par ailleurs, l'existence d'interactions intriquées et opérant à des échelles multiples entre les écosystèmes marins et les anthroposystèmes rend difficile la gouvernance des

activités humaines qui sont responsables des (et/ou impactées par les) changements environnementaux planétaires. Celles-ci sont extrêmement diverses, menées par des groupes sociaux et culturels hétérogènes et posent des problèmes juridiques particuliers et difficiles puisqu'elles se déploient souvent dans des espaces concernés par les systèmes juridiques internationaux du droit de la mer (United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS), dans les zones économiques exclusives et/ou dans les eaux internationales.

2- Etat de l'art

Les recherches concernant l'impact des CEP sur les écosystèmes marins combinent études expérimentales (e.g. en mésocosme pour la biogéochimie et les bas échelons trophiques ou en bassin pour les échelons trophiques supérieurs), observations de terrain (e.g. via des campagnes à la mer ou via le recueil et l'analyse de données de pêche ou de mesures satellitaires) et modélisation. Le présent document met essentiellement l'emphase sur la modélisation en raison de son importance en termes de prévision et de projection à l'usage de la communauté scientifique ou des instances publiques dans l'objectif d'élaboration de stratégies d'adaptation aux CEP.

Considérant initialement les différents éléments constitutifs des écosystèmes (atmosphère, océan, biogéochimie, populations halieutiques, économie des pêches) de manière disjointe, la modélisation des écosystèmes marins a logiquement progressé vers des modèles de plus en plus intégratifs et synthétiques, à des échelles de plus en plus larges et des résolutions de plus en plus fines.

Suivant l'exemple des modèles physiques de l'atmosphère et de l'océan, et forts de représentations simples et robustes (e.g. Fasham, 1991), les modèles biogéochimiques ont été développés à la suite du programme JGOFS de l'IGBP, principalement afin de représenter les flux de carbone à l'échelle globale. Récemment, des modèles couplés océan/atmosphère/biogéochimie marine ont été implémentés avec succès (modèles couplés climat-carbone de l'IPSL, Dufresne *et al*., 2002) afin de considérer de manière fine le cycle du carbone et le rôle de la biogéochimie marine dans le transfert de carbone de l'atmosphère vers l'océan de surface et l'océan profond. L'utilisation de ces modèles couplés climat-carbone a mis en évidence une rétroaction positive entre cycle du carbone et système climatique. Le changement climatique est responsable d'une diminution des puits de carbone (océanique et terrestre) qui en retour amplifie l'augmentation du CO_2 dans l'atmosphère et le changement climatique (Friedlingstein *et al.,* 2006). La rétroaction de la biogéochimie sur la physique via la modification de l'absorption lumineuse de l'eau de mer a été également considérée en particulier dans le Pacifique Equatorial (Lengaigne *et al*., 2007) et dans l'océan Arctique (Lengaigne *et al*., 2009). Ces travaux ont montré que la prise en compte de la rétroaction de la biogéochimie sur l'océan et l'atmosphère modifie substantiellement les résultats des modèles et les prédictions climatiques associées.

La plupart des modèles biogéochimiques utilisés aujourd'hui sont des modèles à compartiment de type NPZD (Nutritifs, Phytoplancton, Zooplancton, Détritus) couplés (forcés) en 3D à des modèles océaniques eulériens (OGCMs) qui fournissent les champs de courant et de température. La représentation sous forme de compartiments génériques permet de tenir compte de la stoechiométrie des différentes réactions et des flux d'entrée/sortie. En contrepartie, elle impose un nombre relativement réduit de PFTs (Plankton Functional Types), en général 2-3 nutriments (N, P, Si), 2-3 groupes phytoplanctoniques (flagellés et diatomées) et 2-3 groupes zooplanctoniques consommateurs et exportateurs de matière (microzooplancton pour le recyclage et mesozooplancton comme producteur de gros déchets). Elle réduit donc la diversité biologique à son expression la plus simple (quelques PFTs moyens) et ignore le rôle fonctionnel qu'elle peut avoir au sein de ces PFTs. De plus, le(s) compartiment(s) zooplancton constitue(nt) le plus souvent un terme de fermeture du système considéré qui,

malgré son rôle fonctionnel important et son impact sur les résultats des modèles, est généralement représenté de manière grossière. En effet, la diversité des physiologies, des histoires de vie et des comportements du zooplancton ainsi que le rôle des niveaux trophiques plus élevés ne sont pas explicitement représentés.

Les modèles classiquement utilisés pour représenter les niveaux trophiques supérieurs (zooplancton et poissons) étaient jusqu'à récemment dérivés des approches monospécifiques d'évaluation des stocks. Ils ne considéraient qu'une espèce dans un écosystème particulier, sans représenter l'ensemble du cycle de vie, les processus essentiels de la physiologie et du comportement, l'influence de l'environnement, l'espace et les interactions trophiques. Avec le programme GLOBEC de l'IGBP, les modèles ont évolué vers des modèles dédiés à l'étude de processus, visant à l'étude d'une phase particulière du cycle de vie des espèces. Les formalismes utilisés ont largement fait appel aux modèles individus centrés (IBM), souvent forcés par des modèles hydrodynamiques pour l'étude du transport larvaire par exemple. Par la suite, des modèles monospécifiques spatialisés fondés sur l'habitat (e.g. SEAPODYM, Lehodey *et al*. 2008) ont été développés pour prendre en compte l'influence de la variabilité climatique et océanique sur l'abondance et la répartition d'espèces pélagiques hauturières comme les thons dans le cadre d'une représentation eulérienne 2D. Ce n'est que récemment, notamment dans le cadre du réseau d'excellence européen EurOceans, que des modèles « end-to-end » couplant des modèles des hauts niveaux trophiques avec des modèles biogéochimiques ont été développés. Ainsi, le modèle multispécifique OSMOSE (Shin and Cury, 2004 ; Travers *et al*., 2009), fondé sur un formalisme IBM et couplé à un modèle NPZD, prend en compte le rôle de la prédation structurée en tailles sur la structure trophique des écosystèmes et l'existence de chaînes alimentaires alternatives. Egalement fondé sur la prédation structurée en taille et forcé par la physique et la biogéochimie, le modèle APECOSM (Maury, 2009) représente dans un formalisme eulérien 3D les flux d'énergie le long du spectre de tailles de différentes communautés pélagiques génériques en intégrant les processus clefs de la physiologie et du comportement des organismes (mouvements verticaux et horizontaux) et en détaillant la dynamique d'espèces focus comme les thons. De part son formalisme compatible avec les modèles physiques et biogéochimiques et ses bases mécanistes de la théorie DEB (Dynamic Energy Budget, Kooijman, 2001, 2009), APECOSM a été couplé avec le modèle biogéochimique PISCES et le modèle océanique NEMO (OPA). Le modèle intégré NPA (NEMO-PISCES-APECOSM), dont le développement a été initié dans le cadre d'EurOceans, explicite les interactions dues à la prédation et aux flux de matière (nutritifs, détritus) associés au métabolisme, du phytoplancton jusqu'aux top prédateurs (le zooplancton n'est donc plus le terme de fermeture du système). Il conserve la masse au niveau de l'ensemble de l'écosystème et propage la variabilité bottom-up et top-down dans les trois dimensions de l'espace.

Il faut cependant noter que la biodiversité dans tous ces modèles est insuffisamment prise en compte puisqu'ils s'appuient tous sur des représentations en termes de PFTs ou de communautés génériques et/ou sur un faible nombre d'espèces quand elles sont explicitées.

Le développement de modèles bio-économiques des pêches a une longue tradition en halieutique. Le paradigme dominant fait l'hypothèse qu'il est possible d'exploiter les ressources marines de manière durable dans une économie libéralisée. Peu de modèles bio-économiques ont cependant abordé le problème de manière multi-stocks, multi-flottilles et multi-marchés en considérant de plus la structuration spatiale du système économique. Des tentatives ont cependant été faites dans le domaine des pêches (pêcheries de petits pélagiques) par Mullon *et al.* (2006) et Mullon *et al.* (2009) en insérant l'approche bio-économique classique dans la théorie des « Computable General Equilibrium Models ».

3- *Interactions entre les groupes disciplinaires impliqués (analyse des succès et des échecs)*

Les principaux groupes disciplinaires impliqués dans l'étude des CEP dans le domaine marin sont : les climatologues, les océanographes, les écologistes et biogéochimistes marins, les halieutes, les économistes, les juristes, les sociologues et les anthropologues des pêches, les spécialistes de science politique et de la gouvernance, ainsi que ceux de la modélisation et du calcul scientifique (mathématiques appliquées, statistiques, informatique, etc.)

Cette liste est naturellement non exhaustive et d'autres disciplines scientifiques connexes, comme la génétique des populations par exemple, qui a pour objet l'étude de la biodiversité dans les écosystèmes marins, peuvent être pertinentes dans le cadre de recherches sur les CEP.

Puisqu'ils touchent la dynamique du Système Terre, système complexe si il en est, et ses multiples facettes interactives, les CEP doivent être abordés de manière holistique et intégrative, en privilégiant les analyses transdisciplinaires aux perspectives purement disciplinaires. Force est cependant de constater que le cartésianisme a la peau dure et que rares sont les équipes ayant réellement réussi à aborder les CEP dans le domaine marin en intégrant l'ensemble du spectre disciplinaire concerné.

En raison de leur proximité thématique et de l'évidence de leurs interactions, climatologues, océanographes et biogéochimistes marins ont cependant établi des liens forts et travaillent en étroite collaboration. De même, avec l'élargissement de leur perspective de l'espèce à l'écosystème, les halieutes et les écologistes marins ont fréquemment fait appel aux océanographes et aux biogéochimistes, principalement pour des études régionales et locales. L'intérêt réciproque des océanographes et des biogéochimistes pour les halieutes et les écologistes marins est, par contre, resté marginal, les premiers ne percevant pas l'intérêt qu'il y avait à considérer les hauts niveaux trophiques dans leurs analyses autrement qu'en termes d'impacts de la physique sur la biologie et les services fournis par les écosystèmes. Même si cela ne se reflète pas encore véritablement dans la composition des équipes, cette vision disciplinaire est cependant en train d'évoluer et de nombreux chercheurs considèrent désormais que les écosystèmes influencent de manière non négligeable les dynamiques physiques et biogéochimiques et adoptent une perspective intégrative dans laquelle les interactions entre les composantes du Système Terre ne sont plus ignorées. De la même manière, les liens entre halieutes, économistes et sociologues des pêches sont depuis longtemps restés ténus et univoques. La nécessaire intégration disciplinaire inhérente à la compréhension des phénomènes d'interactions au sein du Système Terre et à la gouvernance des activités humaines dans ce système complexe est cependant à l'œuvre ici aussi et les projets réellement transdisciplinaires (et pas simplement multidisciplinaires) se font aujourd'hui plus nombreux.

4- Méthodologies scientifiques et programmatiques adoptées

La considération des interactions complexes qui relient entre elles les différentes composantes du Système Terre (atmosphère, géosphère, biosphère, anthroposphère) a, jusqu'à aujourd'hui, peu été mise en avant dans les organigrammes institutionnels nationaux et les appels d'offres nationaux et européens. Le réseau d'excellence européen EurOceans et, plus récemment, le consortium EurOceans, ont cependant offert un cadre coopératif pour aller dans ce sens au niveau européen. Au niveau international, le programme IMBER (Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) met également en avant une telle intégration disciplinaire pour appréhender conjointement les dynamiques biogéochimiques et écosystémiques et les services rendus par les écosystèmes aux sociétés humaines. Sa seconde phase notamment (2010-2014), qui intègrera les programmes IMBER et GLOBEC, s'inscrira particulièrement dans cette perspective (Field *et al.,* 2009 report of the GLOBEC-IMBER Transition Task Team).

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

1- Intégration des effets de la biodiversité dans les modèles d'écosystème

Bien que le rôle fonctionnel de la biodiversité soit qualitativement étudié et vraisemblablement déterminant, les modèles biogéochimiques et écosystémiques utilisés aujourd'hui reposent sur une réduction de la biodiversité à un nombre limité d'espèces et de groupes fonctionnels. Les pistes envisageables pour une meilleure intégration du rôle fonctionnel de la biodiversité dans ces modèles sont les suivantes et devraient être explorées :

- Multiplier les groupes fonctionnels représentatifs d'une diversité fonctionnelle : Le Queré *et al*. (2005) proposent par exemple un modèle dans lequel 5 types fonctionnels de phytoplanctons et 4 types fonctionnels de zooplanctons représentent la diversité fonctionnelle du plancton marin,
- Fonder les représentations de la physiologie et du comportement des différentes espèces sur des modèles génériques (e.g. la théorie DEB) permettant de dériver par agrégation de variables des paramétrisations intégrant explicitement la biodiversité sans l'expliciter (e.g. sans multiplier les groupes fonctionnels considérés),
- Articuler les représentations agrégées (PFTs, spectres de taille, etc.) avec des représentations explicites d'espèces clés importantes d'un point de vue fonctionnel ou du point de vue des services rendus (e.g. espèces d'intérêt commercial).

Le développement de tels modèles explicitant la biodiversité devra être accompagné de la mise en place de Systèmes d'observation et de suivi de la biodiversité permettant leur élaboration, l'estimation de leurs paramètres et leur évaluation.

2- Rôle des écosystèmes marins dans la dynamique du Système Terre

Il est aujourd'hui reconnu que les changements globaux doivent être étudiés de manière holistique et intégrée, afin de comprendre les rétroactions complexes qui relient entre elles les différentes composantes du Système Terre (atmosphère, géosphère, biosphère, anthroposphère). Ces rétroactions sont en effet à l'origine de dynamiques non linéaires impossibles à appréhender correctement sans une prise en compte explicite des processus de couplage entre les différents éléments du système. Pour cette raison, le développement de modèles intégrés du Système Terre est au cœur des grands programmes internationaux chargés de l'étude des changements globaux. En particulier, les modèles couplés océan/atmosphère sont utilisés depuis plusieurs années par le GIEC pour prédire l'effet de l'accroissement de la teneur atmosphérique en GES sur les changements climatiques. De même, les programmes GLOBEC et IMBER promeuvent le développement de modèles « end-to-end » considérant les interactions complexes physiques / biologiques / ressources.

L'amélioration de ces modèles couplés passe notamment par la prise en compte des effets rétroactifs de la biosphère sur les différents systèmes physico-chimiques. Les enjeux de ces travaux sont évidents et plusieurs équipes internationales travaillent aujourd'hui au développement d'une nouvelle génération de modèles couplés océan-atmosphère intégrant les effets de la biosphère marine et terrestre.

Afin de considérer le rôle des écosystèmes marins dans leur ensemble dans la dynamique du Système Terre en intégrant les rétroactions existantes entre les différentes composantes du système, le couplage atmosphère / océan / biogéochimie / écosystèmes / anthroposphère devra être réalisé. Il s'agira d'une part, de considérer simultanément les

rétroactions des activités humaines sur les écosystèmes et des organismes marins supérieurs sur la biogéochimie marine et sur la physique des océans et d'autre part, de mesurer l'influence de ces rétroactions sur le fonctionnement présent et futur du système couplé océan / atmosphère / biogéochimie / écosystèmes / socio-systèmes (Fig.1).

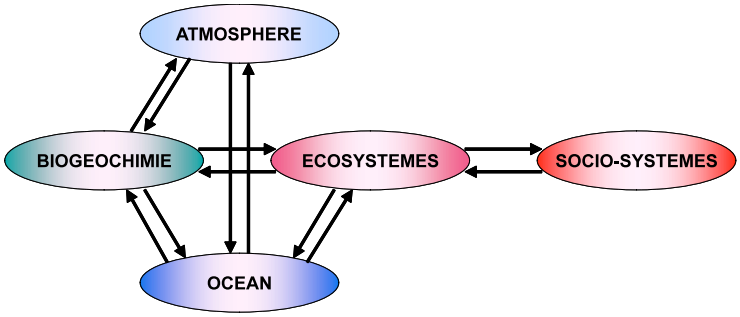


Fig. 1 : Diagramme schématique du système couplé considéré.

3- Articulation des approches globales, régionales et locales

Des modèles biogéochimiques ont été implémentés des échelles locales à l'échelle globale. L'échelle globale est d'une part nécessaire à l'étude du cycle du carbone planétaire et elle permet d'autre part l'obtention des conditions aux limites de la modélisation aux échelles régionales et locales. Au contraire, les niveaux trophiques supérieurs et la pêche ne sont pas couramment modélisés à l'échelle globale. Des modèles écosystémiques devront donc être mis en place à l'échelle globale et désagrégés « downscalés » aux échelles régionales et locales en tirant parti des outils développés pour les modèles physiques à cet effet (e.g. zoom agriff). Articuler ces différentes échelles de modélisation permettra de relier les dynamiques écosystémiques globales à celles de zooms locaux dans des régions d'intérêt d'un point de vue biogéochimique, écologique, halieutique, économique ou social, par exemple dans les pays du Sud. Une telle approche multi-échelles aurait d'autre part l'intérêt de permettre des comparaisons inter-régionales du fonctionnement des écosystèmes et d'intégrer dans les modèles globaux des processus locaux comme les interactions côte-large ou terre-mer par exemple. Elle permettrait enfin de prendre en compte les contraintes de gouvernance globales dans la gestion des activités humaines locales.

4- Vers des approches mécanistes conciliantes

La mise en place, à des fins d'étude de scénarii et de prévision, de modèles couplés (Earth System Model) intégrant de multiples composantes des écosystèmes marins de la physique à l'économie en passant par la biogéochimie et l'écologie est un objectif fondamental des recherches sur les CEP. Vu le degré de complexité de tels modèles et leurs objectifs de prédiction, il est absolument nécessaire de fonder les paramétrisations utilisées pour modéliser chaque composante du système sur des représentations mécanistes compatibles et cohérentes d'un point de vue théorique (consilience). Le caractère mécaniste est évident pour les modèles physiques qui reposent sur la mécanique des fluides et la thermodynamique. Les choses sont moins évidentes pour les modèles biogéochimiques et écologiques souvent fondés sur des représentations « ad hoc ». Ceux-ci devront donc gagner en rigueur et en cohérence tout en gardant un niveau de complexité gérable. Une piste est le recours à la théorie DEB (Kooijman, 2001, 2009) qui permet de lier bioénergétique (flux d'énergie au sein d'un organisme) et caractéristiques de l'histoire de vie pour tous les êtres vivants et ce, dans un formalisme mathématique rigoureux.

Thème 3 : Ressources en eau, sol et alimentation globale

Animateurs du thème : Pierre Chevallier et Christine King
Rédacteurs : Alberte Bondeau, Florence Carré, Pierre Chevallier, Christine King, Thierry Phulpin

INTRODUCTION : Présentation du thème

La sécurité alimentaire de la planète dépend entièrement de la disponibilité de ressources en eau : on admet que 60% des prélèvements d'eau sont consacrés à l'agriculture, 20% à l'eau domestique (alimentation, boisson, hygiène) et 20% à la production énergétique et industrielle. Or cette ressource, bien que renouvelable à l'échelle globale, fait l'objet de conflits d'usage aux échelles locale et régionale et est soumise à des changements rapides et inédits dans l'histoire de l'humanité qui appellent à repenser les stratégies de protection, de stockage, de prélèvement et d'usages.

Le réchauffement climatique modifie les mécanismes du cycle de l'eau - principalement l'évaporation et les précipitations - et par conséquent les ressources de surface et souterraines disponibles. La pression démographique d'une part, et l'enrichissement global d'autre part, en particulier des grands pays émergents, conduisent à une demande accrue, en quantité mais également en qualité, d'eau domestique et agricole et de biens alimentaires. L'évolution inéluctable des modes de production énergétique concerne directement la ressource d'eau, prélevée pour la production hydroélectrique, évaporée dans les centrales thermiques et nucléaires, consommée par les cultures destinées aux agrocarburants. Enfin la pression croissante sur tous ces usages multiplie les facteurs de dégradation de la qualité.

Si les usages de l'eau sont presque toujours le résultat de stratégies régionales qui dépendent non seulement d'une ressource très mal distribuée dans l'espace et dans le temps, mais aussi des modes de vie et de la décision publique (incluant l'usage des sols et l'aménagement du territoire), l'approche globale est une nécessité car la sécurité alimentaire et les équilibres économiques mondiaux en sont très largement redevables. Une résolution globale harmonieuse passe aussi nécessairement par une amélioration de la gouvernance internationale des patrimoines renouvelables et intrinsèquement liés que constituent l'eau et les productions alimentaires.

Alors que la planète comptera 9 milliards de bouches à nourrir à l'horizon 2050, de nombreuses études montrent que, les sols, ressources limitées, se dégradent : leurs propriétés intrinsèques sont menacées. Ce constat pose de manière accrue la question des moyens à mettre en œuvre pour assurer la sécurité alimentaire.

Axe 1 : Ressources en sol et en eau

ETAT DES LIEUX (Recherches passées et en cours) ET PERSPECTIVES (Quelques pistes pour des recherches futures)

1- *Etat de l'art*

A. Les sols

Conserver les sols est un enjeu majeur, leur dégradation réduirait drastiquement les possibilités de production alimentaire, végétale comme animale, alors que la moitié de l'humanité cultive la terre et, pour ¾ d'entre elle, le fait encore manuellement.

Les sols sont progressivement reconnus comme des ressources limitées tant en surfaces qu'en volumes. De l'avis de diverses instances européennes (ESBN, ESCSS, CSFD..) ou mondiales (ISRIC, NRCS, FAO, IUSS, etc.), leurs propriétés intrinsèques et/ou leur renouvellement sont menacés. Plusieurs initiatives[24] ont facilité l'ouverture des débats et, en Europe, elles sont à l'origine de la préparation d'un projet de Directive Cadre[25]. Plusieurs pays et organismes ont déjà anticipé l'annonce officielle de la Commission sur cette Directive en engageant des réflexions et des actions vers une protection accrue des sols.

Pour évaluer les impacts sur la dégradation de cette ressource, les étapes déjà franchies sont passées par : i) l'identification des menaces qui pèsent sur les sols : elles relèvent largement des CEP, les pressions anthropiques, climatiques ou les deux simultanément en sont clairement à l'origine (colonne 1 -tableau 1), ii) l'identification des fonctions des sols atteintes, iii) la détermination des différents paramètres retenus pour révéler ces dégradations physiques et /ou chimiques (colonne 2 -tableau 1). La référence la plus aboutie à ce sujet est le projet européen ENVASSO[26], qui vient de s'achever.

Menaces	Méthode de surveillance	Paramètres
Erosion	Mesures *in situ*	Épaisseur du sol, texture Topographie Occupation du sol, événements climatiques
Salinisation	Mesures *in situ*	concentration en sels
Diminution de la matière organique	Echantillonnage de sol et analyse	Concentration totale de carbone organique et d'azote Densité apparente
Pollution	Echantillonnage de sol et analyse	Concentration en éléments chimiques Caractéristiques hydrologiques
Imperméabilisation	Télédétection	Occupation du sol
Compaction	Mesures *in situ*	Densité apparente
Glissements de terrain	Localisation des événements précédents	Taux d'argiles, profondeur du sol, pente Caractéristiques hydrologiques

Tableau 1 : Menaces sur les sols et paramètres à surveiller [27]–

[24] African Soil Information Service africasoils.net, Digital Soil Mapping Working Group, GlobalSoilMap.net, SOWAP (SOil and WAter Protection)
[25] COM 2006-232- Proposition de Directive Cadre Européenne sur les Sols 2006 http://ec.europa.eu/environnment/soil
[26] http://www.envasso.com/publications.htm
[27] source : Directive of the Thematic Soil Strategy

Des appels à projets de recherche nationaux (e.g. MEEDDAT-GESSOL, ANR-VMC), européens (FP7), internationaux (projet FAO GLASOD[28]) ou des initiatives telles GlobalSoilMap.net et LADA[27], poursuivent la structuration des travaux sur la distribution spatiale des propriétés des sols à des échelles appropriées à l'agriculture, et sur la distribution spatiale des terres dégradées. Pour autant, la connaissance des mécanismes impliqués dans la dégradation des sols (synergies et compétitions entre fonctions des sols), et surtout, l'intensité de ces dégradations, tout autant que leurs vitesses d'évolution et les processus de régénération des terres dégradées requièrent encore des développements importants de compréhension et de méthodes[27].

B. L'eau

Les effets du changement climatique et le déclin de la biodiversité, les tensions entre les différents usages de l'eau, les pressions dues aux pollutions diffuses ou ponctuelles, font de la gestion des ressources en eau une des priorités des recherches environnementales au niveau national, européen et international.

Les ressources en eau sont certes théoriquement renouvelables, mais la gestion temporelle des bassins hydrographiques doit maintenant se raisonner dans un système intégré rivière - sol - eaux souterraines et sédiments.

L'accroissement de la vulnérabilité actuelle des ressources en eau est acté, souvent encore sur la base d'indicateurs simples dans leur principe, mais fortement dépendants de données peu disponibles[29].

En Europe, le 6ème Programme Cadre (FP6) vient de produire un effort massif sur le thème des ressources en eau, avec un volet « qualité » important en perspective de la DCE[30]. Plus de 50 projets visaient à identifier et limiter la dégradation de la qualité de l'eau prélevée pour l'agriculture, l'industrie, la production énergétique ou les usages domestiques. De très nombreux champs ont été couverts et relèvent de mécanismes de pressions anthropique et climatique, qui rentrent dans le champ des CEP : des études intégrées dans des contextes divers montrent que les ressources en eau sont renouvelables, mais selon les cas, restent limitées en volume et en surface[31] (AQUATERRA, JAYHUN, TWIN BASIN, MEDITATE). Des efforts majeurs se traduisent dans les domaines aussi divers que la métrologie, l'acquisition de données et les systèmes d'information architecturés (SWIFT, OSIRIS), la détermination des polluants (REBECCA), les modélisations et les outils de pilotage pour la réduction des intrants (FOOTPRINT), les approches pré-normatives (e.g. BRIDGE pour identifier des seuils de dégradation des ressources en eau), les solutions technologiques innovantes comme l'utilisation d'eaux non conventionnelles en irrigation (SAFIR). Enfin, les approches socio–économiques (AQUAMONEY, RECLAIMWATER) visent l'évaluation des coûts et bénéfices de mesures environnementales et leur appropriation par les populations.

De plus des concertations préparent actuellement de façon pluridisciplinaire les approches sur les risques environnementaux attachés à la gestion de l'eau sur les sols, les

---

[28] Sonneveld B.G.J.S., Dent D.L. How good is GLASOD ?, *Journal of Environmental Management* (2007), doi:10.1016/ j.jenvman.2007.09.008

[29] Les comptes de l'eau. Aquastat, Plan Bleu, World Water Assessment
Margat J., 2009. Quelles crises de l'eau en Méditerranée ? 5e rencontres Internationales Monaco et la Méditerranée. Mars – Plan Bleu.
Margat J., 2008.Les eaux souterraines dans le monde – UNESCO BRGM
De Marsily G., 2006. Les eaux continentales. Académie des Sciences, Paris

[30] Directive Cadre Européenne sur l'Eau, 2000

[31] FP6: AQUATERRA, JAYHUN, TWIN BASIN, MEDITATE, SWIFT, OSIRIS, REBECCA, FOOTPRINT, BRIDGE, AQUAMONEY, RECLAIMWATER, RISKBASE, SCENES

eaux, les sédiments (RISKBASE), et la production agricole ou énergétique (SCENES), à la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes.

En France, la diversité de ces facettes se retrouvent dans les programmes thématiques ANR (PRECODD, CES, VMC, VMCS) et du MEEDDAT (GICC, RDT, Eaux et Territoires).

2- *Interactions entre les groupes disciplinaires*

Les sols et leurs fonctions sont peu intégrés dans les problématiques autres que la production de biomasse et de matériaux : hormis sous l'angle de leur valeur foncière, ils entrent encore peu dans les évaluations et prises de décision économiques, sociales et politiques[32]. Il est donc primordial de changer notre rapport à l'usage des sols et d'expliciter les synergies entre pratiques (ou usages) des sols et contraintes environnementales et socio-économiques.

Pourtant ce processus s'opère déjà implicitement sous nos yeux : voir les grosses entreprises étrangères qui achètent des terres en Afrique et en Amérique du Sud, avec des conflits potentiels là où ces terres permettent de faire vivre la population locale. Le mauvais usage de ces terres, souvent lié à des pratiques d'agriculture intensive, a pour conséquence la dégradation de ces terres qui sont souvent la seule ressource financière de la population locale. La valeur ajoutée dégagée par leur exploitation est loin d'être la même pour ces entreprises et pour la population locale puisque les objectifs de production sont différents. Peut-on estimer - et si oui, comment - une valeur économique unique de ces terres qui ne se réduise pas à leur seule valeur foncière mais intègre les externalités (positives et négatives) économiques, sociales et environnementales des modes d'exploitation ? Le coût temporel et financier de la restauration de ces terres potentiellement dégradées peut-il et doit-il être pris en compte dans la valeur économique des sols ?

Des approches inter et pluridisciplinaires sont proposées pour mettre en valeur de façon plus large le rôle actif des fonctions du sol, jusqu'aux termes socio-économiques (e.g. appel d'offres GESSOL[33], ou les réflexions 'Entre-Science'[34]). Elles permettraient de mieux impliquer cet objet sol dans la problématique générale des CEP avant que les pressions exercées n'entraînent des évolutions irréversibles.

En revanche, **pour les ressources en eau**, une partie de l'offre de recherche va déjà très au-delà des inquiétudes sur les quantités d'eau et sur une possible dégradation de leur qualité. Elle s'oriente notamment vers les impacts à attendre en production alimentaire, selon une démarche très interdisciplinaire[35] :

- Développer des outils prédictifs des changements hydro-climatiques attendus et les impacts possibles sur les usages de l'eau comme l'évolution des besoins et donc des prélèvements nets d'eau selon les usages agricoles, industriels et domestiques,
- Identifier les impacts locaux sur les usages de l'eau par consultation d'acteurs,
- Evaluer en termes économiques ces impacts, scénarii tendanciels pour l'estimation de la demande en eau future,
- Identifier des stratégies d'adaptation.

D'ores et déjà, on sait que l'accroissement de la demande en eau sera plus rapide que le renouvellement des ressources. Mais élaborer des projections de ces tendances à

[32] Agence Européenne de l'Environnement « Assessing economic impacts of soil degradation », 2006
[33] MEEDDAT-GESSOL : appel à projets Sols et Développement durable – décembre 2008
[34] Procoli A. and Rochet F. 2008. ISRI vol. 33, N01, pp1-9
[35] Projet SNRI 2009 et rapport Agrimonde

2050 avec les données disponibles exigera encore davantage de pluridisciplinarité des équipes de recherche.

3- *Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées*

Les mêmes choix se retrouvent aux niveaux national, européen et international : ils prévoient en priorité de se doter de mesures et d'outils de compréhension des mécanismes et de réseaux de mesure.

A. *Mesures et outils de compréhension pour le suivi de la dégradation des sols*

Pour mesurer l'évolution des sols : RMQS[36] (France), ENVASSO (Europe) voire un réseau mondial comme GlobalSoilMap.net[37] actuellement fondé sur le *best effor*t des Etats et la mise en œuvre de Systèmes d'observations ne sont que des amorces à l'observation et la surveillance de l'état de santé des sols. En effet, le but de ces programmes est d'observer, de modéliser et d'interpréter les effets induits du changement global (action de l'Homme comprise) sur la dégradation des sols. Ces programmes permettront sur le long terme de hiérarchiser les facteurs d'évolutions des sols et de définir, en fonction des situations rencontrées, des seuils d'évolutions irréversibles du système sol.

Ces choix prévoient aussi de déployer des suivis de paramètres sur des échelles compatibles avec les solutions incitatives d'une utilisation durable des sols. C'est l'esprit du FP7[38] qui a lancé plusieurs projets, comme DIGISOIL et ISOIL, pour tester les solutions techniques et métrologiques les plus appropriées pour atteindre et suivre ces paramètres.
Ces projets de technologies coûteuses permettront d'évaluer finement et ponctuellement un état des lieux des sols et de réaliser des suivis temporels des paramètres. En revanche, ces techniques ne sont pour l'instant pas adaptées au suivi de grandes étendues (échelle de la région) pour lesquelles les images satellitaires sont alors requises. La construction d'indicateurs de dégradation adaptés à différents paysages et à différentes échelles n'est cependant pas l'objectif primordial de ces projets.

En sus des indicateurs, des valeurs seuils de dégradation sévère pourraient déjà s'échanger au niveau européen, en réponse au besoin des nouvelles Directives Cadre.

Mais les sols présentent une telle diversité à l'échelle mondiale, que de tels seuils, simples et extrêmes n'ont pas grand sens. Or, il est urgent de se doter d'outils réalistes d'évaluation de la dégradation et du suivi de leurs évolutions. Un mauvais système de repérage initial empêchera des détections précoces de situations vulnérables et laissera les pressions s'exercer jusqu'à des stades irréversibles.

Les solutions techniques restent limitées, voire difficilement applicables à de vastes territoires, et nombreux sont les indicateurs de mise en œuvre facile (accès à des données, couverture mondiale), mais d'adéquation réduite face aux paramètres physiques requis. Il

---

[36] RMQS Réseau de Mesures de la Qualité des Sols : http://www.gissol.fr/programme/rmqs/rmqs.php

[37] Le GlobalSolMap.net a pour objectif de fournir sur l'ensemble de la planète une carte des sols à résolution de 90 m pour toutes les propriétés permettant d'évaluer la production de biomasse et la dégradation des sols (pH, quantité de MO, CEC, etc.) à plusieurs profondeurs. Une méthodologie commune sur l'ensemble de la planète sera utilisée en fonction de la disponibilité des données. En Afrique, où peu de données sur les sols sont disponibles, des analyses de terre serviront à les évaluer. Dans d'autres cas, on utilisera les données (profils, cartes) existantes (appelées « Legacy Data »).

[38] DIGISOIL: Development and improvement of technologies for data collection in (digital) soil mapping: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/Digisoil/
ISOIL: Development and improvement of technologies for data collection in (digital) soil mapping: http://www.isoil.ufz.de

faudrait élargir la sélectivité des variables observables depuis l'espace[39], notamment dans le registre de l'exploitation des chroniques temporelles, pour identifier des critères propres aux sols et les extraire selon des modalités compatibles avec les besoins des modèles de fonctionnement de la végétation[40].

B. Mesures et outils de compréhension pour le suivi et les projections de besoins en eau

Au sein du FP7, déjà plus de 30 projets sont relatifs à la ressource en eau, avec une orientation marquée vers la problématique des CEP :

- Dans la suite des besoins de préparation de la DCE : tout ce qui relève de la caractérisation des masses d'eau et des conditions de leur retour au bon état écologique (e.g. les projets Wise, Genesis).
- Les aspects du changement climatique (évènements extrêmes, études des impacts, vulnérabilité et/ou résilience des milieux, adaptation) sont pris en charge dans de nombreux projets contextuels (e.g. ACQWA, EPOCA).
- La réhabilitation des ressources et des milieux sous pression anthropique mobilise des équipes éco-technologiques (e.g. les projets Aquafituse, Aquarehab)
- Les risques environnementaux et politiques énergétiques (e.g. risk base, Scène) ;
- Le projet INSPIRE-GEOSS pour capitaliser les données et faciliter les modes de représentation EuroGeoss.

Pour déployer des scénarii aux échelles régionales et bâtir puis évaluer des modèles « Pressions / impacts spatialisés / régions prioritaires », un certain nombre de données sont donc déjà disponibles. Mais une vraie difficulté réside, à ces échelles et d'autant plus à l'échelle globale (puisque les outils de détection couvrant l'échelle globale sont moins fiables que ceux couvrant de petites surfaces), dans la fiabilité des données disponibles voire dans leur existence notamment pour constituer des séries longues.

Ces questions sont posées aux niveaux local et régional dans la réflexion INSU-SOERE, qui rejoint les approches RIOB[41], et au niveau global par les nouvelles missions spatiales SMOS, SWOT, Thermique[42].

C. Ecotechnologies appliquées à un usage durable des ressources en sols et en eau

On note un déficit de projets permettant de voir plus loin que les développements de méthodologiques et métrologiques. Ainsi, au-delà de la protection des sols, il faut viser à mettre en adéquation l'usage et le potentiel des sols, de façon à assurer le maintien de leurs fonctionnalités, au sens d'une utilisation durable. A ce niveau, l'enjeu est bien d'atteindre la maîtrise technologique des sols. Selon les contextes d'utilisation des terres (caractéristiques biophysiques, acteurs sociaux, finalités économiques, modes d'usage des terres) et les scénarii (changements d'usage, changement climatique, pression démographique), il faut pouvoir démontrer et anticiper l'efficacité des solutions à promouvoir telles que:

---

[39] EOLANDEG: Earth Observation initiative in a former homeland of South Africa in support of EU activities in land degradation and integrated catchment management :http://www.eolandeg.com/
LADA: LAnd Degradation Assessment in Drylands: http://www.fao.org/nr/lada/

[40] Lagouarde J.-P. et Baret F., 2006. Bilan et prospective des activités Télédétection dans le département Environnement et Agronomie, INRA

[41] RIOB www.riob.org gestion de bassins et coopération transfrontalière

[42] Projet SWOT (NASA-CNES, PI, D. Alsdorf): http://bprc.osu.edu/water/index.php; GPM et sa composante européenne EGPM qui permettra de documenter les précipitations à l'échelle globale : http://gpm.gsfc.nasa.gov/science/sciencetalks/Hou_EGU06.pdf

- Des méthodes de réhabilitation-restauration des sols dégradés. Quelle occupation des sols envisager ? Comment restaurer les stocks de matière organique ?
- Des méthodes d'éco-ingénierie permettant d'amener les sols à des fonctions intéressantes par rapport aux besoins et aux CEP : stocker du carbone, recycler des matières organiques tout en préservant la structure des sols et la biodiversité.

De même, le champ très attractif des nouvelles technologies de l'eau (e.g. Singapore International Water Week) rassemble les préoccupations sur les recyclages d'eau, et- toutes les solutions d'éco ingénierie. Leur attractivité économique, même très localisée, peut offrir peut-être une clé pour sortir d'une situation de crise hydrique[43], mais une solide appréciation des impacts environnementaux et sociétaux exigera une recherche pluridisciplinaire étayée.

Axe 2 : Sécurité alimentaire / infrastructures / échanges / alternatives

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Etat de l'art

Depuis quelque temps la question de la sécurité alimentaire en relation avec la disponibilité des ressources naturelles (essentiellement l'eau et les sols) apparaît sur le devant de la scène dans le débat public. La principale question, portée par les scénarii du Millennium Ecosystem Assessment[44], est : comment nourrir en quantité et en qualité les 9 milliards d'humains qui peupleront la planète en 2050 ?

Un discours nouveau est apparu, relayé par exemple par G. de Marsily (2009)[45], plus inquiet pour l'avenir de la sécurité alimentaire, de la disponibilité en sols et des surfaces cultivables, que de la ressource en eau, malgré sa distribution spatiale et temporelle très déséquilibrée.

Dans la communauté scientifique française, cette préoccupation est sérieusement prise en considération avec, d'une part, la réflexion conduite à partir de la fin de l'année 2008 dans le cadre du Schéma National de Recherche et d'Innovation (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche) dont l'un des défis sociétaux et économiques est justement intitulé « Alimentation-Eau »[46] et, d'autre part, la publication en février 2009 du rapport Agrimonde[47], fruit d'une prospective de l'INRA et du CIRAD conduite depuis 2006.

Dans la communauté internationale, la question est au centre des débats de société et le récent Forum Mondial de l'Eau d'Istanbul (mars 2009) posait les quatre questions suivantes parmi un choix de 100 questions majeures concernant l'eau :

- How to achieve the required food production to meet the growing demand?
- How can food market measures boost rural development and poverty alleviation?
- Water for bioenergy or food?
- How can better water management reduce poverty and hunger?

[43] F.Gallard, 2008. L'eau, géopolitique, enjeux, stratégie – Ed CNRS.
[44] www.millenniumassessment.org/fr/index.aspx
[45] L'eau : un trésor en partage. Edition Dunod, France
[46] On ne dispose que de documents de travail
[47] Agriculture et alimentation du monde en 2050 : scénarios et défis pour un développement durable. www.inra.fr/gip_ifrai/content/download/2905/29507/version/1/file/Rapport+Agrimonde+2006-2008.pdf

De même, le Global Water System Programme de l'ESSP inscrit cette question dans son thème 3 « Resilience and Adaptation[48] ».

Le « Challenge Programme Water and Food[49] » du Consultative Group on International Agriculture Research (CGIAR) entre en 2009 dans une deuxième phase d'actions en se concentrant sur les interactions entre les ressources et les sociétés. Fondé sur une approche par grands bassins versants dans les pays du Sud, il complète des actions de diagnostic par une préoccupation de formation et des préconisations de nouvelles stratégies.

Les composantes à aborder peuvent relever des contraintes des milieux physiques, des palettes de choix technologiques au sens large (meilleures ou nouvelles pratiques de gestion des ressources et des territoires, nouvelles approches biotechnologiques, etc.) et/ou des scénarii pouvant pousser à la protection ou à la conversion en mode extensif ou intensif des ressources naturelles.

Dans le cadre de la sécurité alimentaire, les concepts « d'eau virtuelle »[50] et « d'empreinte eau (Water Footprint) »[51], peuvent être pris en considération avec les approches « d'eau bleue » (ressources disponibles de surface ou souterraine), « verte » (utilisée par la végétation pour sa croissance) et « grise » (usée et contaminée par les activités humaines)[52]. La mondialisation des échanges agricoles crée des flux de produits surtout pilotés par une logique économique où la recherche de qualité comme d'une cohérence environnementale et sociale doit trouver sa place.

2- Interactions entre les groupes disciplinaires

Tout particulièrement sur ce thème, la confrontation des disciplines est une nécessité. Les équipes de recherches impliquées relèvent non seulement de l'agronomie au sens large, des sciences de l'eau et du sol, de l'économie ou de la nutrition, mais aussi du droit et des sciences politiques, de l'ingénierie civile et des sciences de l'éducation.

La consultation des collectivités territoriales, des entreprises privées et des ONG – spécialement celles qui œuvrent dans l'humanitaire et l'assistance aux populations malnutries – est une source importante d'informations et de compétences pour les unités de recherches impliquées sur cette voie.

3- Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées

Sur un tel sujet, les méthodes scientifiques sont nombreuses, à l'instar de la diversité des disciplines mises en jeu et du degré de finesse des études conduites allant de la parcelle, jusqu'à des approches planétaires.

Néanmoins, toutes ces études nécessitent l'acquisition ou la consultation de données de nature et de qualité qui peuvent varier beaucoup au sein de la même recherche. De plus, le facteur humain est incontournable. Il est donc difficile, voire illusoire, de quantifier le degré de précision des résultats obtenus, ce qui, par contrecoup, handicape la communication sur

---

[48] www.gwsp.org/scientific_framework.html
[49] www.waterandfood.org/
[50] Parmi les nombreuses références sur le sujet, voir par exemple à l'échelle planétaire le travail récent de Chapagain and Hoekstra, 2008. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. *Water International*, 33(1), 19-32.
[51] www.waterfootprint.org
[52] Falkenmark M., 1995. Coping with water scarcity under rapid population growth. Conférence des Ministres de la SADC, Pretoria, 23-24 novembre 1995

les acquis apportés par la recherche. Cette situation, éminemment « politique » impose d'être particulièrement vigilant pour séparer ce qui relève de l'analyse scientifique rigoureuse et de la « perception citoyenne ».

II. Perspectives : Quelques pistes pour des recherches futures

Des actions techniques sont mises en œuvre pour satisfaire les besoins des sociétés, mais elles apparaissent de plus en plus comme insuffisantes. Il se dégage des enjeux nouveaux qui nécessitent des approches nouvelles :

- Les infrastructures hydrauliques ou les aménagements agricoles peuvent-ils être optimisés dans leur conception et dans leur gestion afin de limiter les pertes et d'apporter des solutions durables et équilibrées (neutres) dans leurs impacts environnementaux ?
- Les mises en place de solutions alternatives pour pallier la faiblesse des ressources (dessalement d'eau de mer ou saumâtre, poldérisation, réutilisation d'eaux usées, etc.) sont-elles acceptables, tant du point de vue économique, qu'énergétique, éthique ou culturel ?
- La production végétale et ses impacts sont-ils compatibles avec une préservation environnementale dans un contexte de CEP ? Quelles solutions attendre du recours aux biotechnologies ? Est-ce compatible avec la conservation d'espaces naturels et de la diversité génétique des cultures, ainsi qu'avec la protection de la biodiversité ?
- Quelles stratégies de financement peuvent être mises en place et comment sont-elles acceptées par les décideurs et les usagers ?

Axe 3: Rétroactions et atténuations concernant l'utilisation croissante de l'eau et des sols

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Problématique

Alors qu'il faudra nourrir une population de 9 milliards de personnes en 2050, de nombreuses études confirment que les sols se dégradent et que les ressources en eau diminuent, posant le problème des moyens à mettre en œuvre pour assurer une production agricole suffisante et durable. La concurrence éventuelle avec les agrocarburants renforce l'urgence d'étudier les mécanismes déterminant la dynamique des interactions entre toutes les composantes du Système Terre. Quels impacts du changement climatique sur la productivité des écosystèmes terrestres ? Quels effets d'une adaptation des pratiques agricoles en réponse à ces impacts ? Une augmentation du stress hydrique peut par exemple conduire à une augmentation de l'irrigation ou à une plus large diffusion de pratiques réduisant l´évaporation ou la demande, ceci en fonction de l'évolution des ressources en eau et de la dégradation du sol, des contraintes économiques, politiques et sociales. Une zone très dégradée peut conduire à un abandon des cultures et à une reforestation, impactant le cycle du carbone, donc le climat. Ces réponses différentes de la société vont agir différemment sur la dynamique des interactions pédosphère – hydrosphère – biosphère – atmosphère. Il s'agit donc de comprendre les liens et les mécanismes déclencheurs des dynamiques de rétroactions positives et négatives.

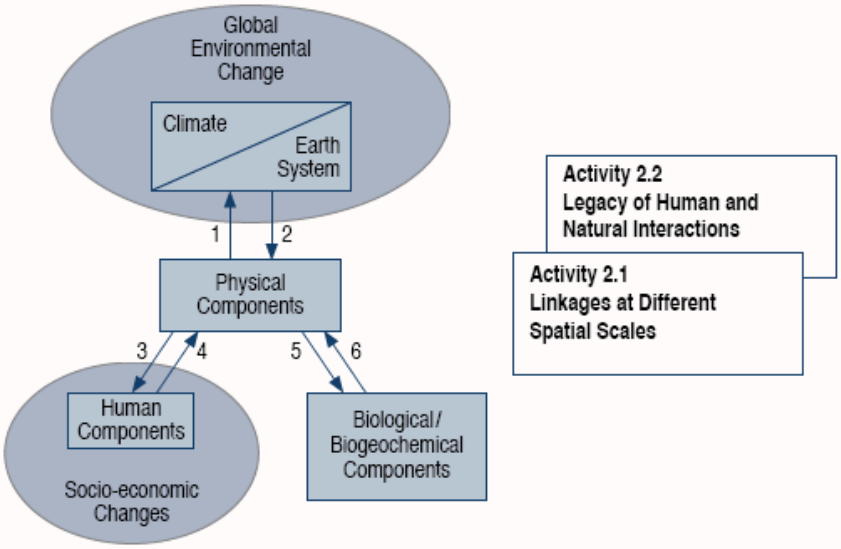
La question pour l'eau est abordée de façon convaincante par le Global Water System Project (GWSP) d'ESSP et les réflexions apportées sur ce thème peuvent facilement être étendues à la question des sols. La problématique essentielle est d'analyser les liens à grande échelle d'espace (connexions régionales, effets d'échelle) et de temps entre les

diverses composantes et comment ils déterminent d'autres connexions avec les composantes du Système Terre que sont le climat, la biologie, la biogéochimie. En outre, il est essentiel de saisir comment tous ces liens affectent la société à travers la dynamique démographique, les changements d'occupation du sol, la production alimentaire, le commerce global. Ces relations interfèrent avec de nombreuses rétroactions, qu'il est essentiel de comprendre et estimer.

Un exemple des rétroactions entre différentes composantes et compartiments disciplinaires est donné dans la figure suivante[53] :

Box 3: Interactions, thresholds, and surprises are a key aspect of the questions dealt with by the Global Water System Project

An important aspect of the Global Water System Project is the integration of biogeophysical and human dimensions. In the figure below, elements ranging across these thematic boundaries are joined by two-way interactions (numbered arrows). Change can occur in both directions.



As an example, the potential for changes in drought frequency and severity (**1**) could be caused by either natural climate variability or anthropogenic climate change. The resulting anomalous scarcity of water in turn would create an impact on regional agriculture (**3**) or forest ecosystems (**5**). Human response to these changes (**4**) might include, for example, reservoir construction. Such a strategy would affect the water budget (**2**) by altering evapotranspiration, runoff and groundwater recharge. Associated fragmentation of river systems could affect wetland ecosystem and bio-diversity, and invoke an unexpected collapse of sensitive fish species (**5**). The decision to build reservoirs also implies a reduction in sediment transport (**2**), which produces surprises in downstream coastal ecosystems via increased coastal erosion and nuisance blooms caused by altered nutrient chemistry at river mouth (**6**). Changes in forest ecosystems

La résilience et l'adaptation aux évolutions du système eau et sols doivent également être analysées suivant plusieurs scénarii. Leurs impacts sous forme de rétroactions doivent également être pris en compte. Les sujets à étudier pour envisager une utilisation durable de l'eau et de sols sont notamment :

- Etablir les besoins respectifs en termes de quantité et de qualité pour l'homme et pour les écosystèmes,
- Comprendre la capacité d'adaptation et la vulnérabilité en relation avec différents facteurs sociaux, environnementaux etc..,

[53] Source : site web du Global Water System Project

- Etudier comment différents modèles de gouvernance peuvent affecter la capacité d'adaptation de la population à l'échelle globale aux évolutions des ressources,
- Identifier les bénéfices d'une politique de l'eau et de sols prenant en compte les besoins des écosystèmes.

2- *Etat de l'art*

Quelques projets menés dans un contexte européen sont mentionnés ci-dessous.

A. Les sols

- SoCo Project (Sustainable Agriculture and Soil conservation): 2007-2009, JRC-IES-DG ENV[54],
- LADAMER Project (degradation status of Mediterranean lands): 2002-2005, EU-GMES[55],
- DesertWatch (UNCCD implementation, monitoring desertification): 2004-2006, ESA,
- DeSurvey (understanding and mitigating desertification): 2005-2010, EU DG-12[56]
- RAMSOIL (Risk Assessment Methodologies for Soil Threats): FP 6[57]
- SIDASS (A Spatially Distributed Simulation Model Predicting the Dynamic of Agrophysical Soil State within Eastern and Western European Countries for the Selection of Management Practices to Prevent Soil Erosion), ERBIC-15 CT98-0106,
- DIGISOIL et ISOIL (Interactions between soil related sciences – Linking geophysics, soil science and digital soil mapping): 2008-2011, FP7-ENV[58].

B. Les sols et l'eau

- AquaTerra (6th FP RTD)[59] .

C. L'eau

- Le programme GWSP définit bien les enjeux au niveau global. Il fédère de nombreuses initiatives qui se placent sous sa bannière[60],
- Le programme WATCH[61] est un projet intégré du FP6 qui rassemble les communautés spécialistes des ressources en eau et du climat pour analyser, quantifier et prédire l'évolution du cycle de l'eau en lien avec l'évolution du climat et l'évolution de la société,
- GLOWA[62] est un projet allemand qui vise à documenter plusieurs grands bassins fluviaux pour mieux comprendre les évolutions du cycle de l'eau.

En France, plusieurs projets ont été menés sous l'égide du GIS « Climat, Environnement, Société ». Citons :

- MORCE-MED : Plate-forme de modélisation régionale couplée pour l'étude des impacts régionaux du changement climatique. Application à la région Méditerranée[63] ;
- PLUIE-TIBET : Etude de la variabilité des précipitations au sud-est du Tibet par analyse isotopique des cernes des arbres, des glaciers et des précipitations, et modélisation[64] ;

---

[54] http://soco.jrc.ec.europa.eu/
[55] http://www.ladamer.org/ladamer/index.php?category=project
[56] http://www.desurvey.net/
[57] http://www.ramsoil.eu/UK/
[58] http://www.isoil.ufz.de/
[59] http://www.attempto-projects.de/aquaterra/
[60] http://www.gwsp.org/
[61] http://www.eu-watch.org/templates/dispatcher.asp?page_id=25222705
[62] http://www.glowa.org/
[63] Laboratoires du GIS Climat impliqués IPSL : LMD, SA, LOCEAN, LSCE
[64] Laboratoires du GIS Climat impliqués IPSL : LSCE, LMD

- REGYNA : Régionalisation des précipitations et impacts hydrologiques et agronomiques du changement climatique en régions vulnérables[65].

A cela, il faut ajouter les études et les projets menés au sein de divers organismes : ANR, BRGM, Cemagref, CNRS, INRA, IRD, etc. On n'oubliera pas dans ce panorama les contributions d'Agrhymet[66] et autres agences aux objectifs équivalents.

3- *Interactions entre les groupes disciplinaires*

Dès 1990, le projet Européen EFEDA (Field Experiment in a Desertification Threatened Area) a constitué une étude pionnière intégrée sur les interactions entre les écosystèmes terrestres, le sol, le cycle hydrologique et le climat sur un site pilote en Espagne. Face aux dangers liés au changement climatique et à la surexploitation du sol et des ressources en eau, le coordinateur du projet, H.J. Bolle[67], indiquait que l'estimation des stratégies de mitigation nécessitait un travail de recherche interdisciplinaire. En effet, c'est le dialogue entre les différentes disciplines qui permet de comprendre non pas un processus isolé en tant que tel (e.g., impact de l'irrigation en zone aride sur la salinisation des sols), mais son intégration dans le système atmosphère – biosphère - société de l'anthropocène: perte de productivité des cultures, conséquences économiques, décisions politiques en faveur d'une occupation du sol et d'une gestion des ressources en eau « soutenable », adhésion/refus de la société, abandon des cultures et séquestration de carbone, ou changement de pratiques culturales, modifications des cycles du carbone et de l'eau, rétroaction sur le climat.

Tous les projets cités plus haut, rattachés à la problématique du changement global en général, et à la surexploitation des ressources de l'eau et des sols en particulier, sont intégratifs. Ils traduisent la nécessaire coopération entre les différentes disciplines: physiciens et climatoloques pour prédire les évolutions des ressources en eau atmosphérique (distributions spatio-temporelles des précipitations, demande évaporative, humidité atmosphérique) ou l'eau bleue (auxquelles on intègre l'enneigement et les calottes polaires), hydrologues, spécialistes des sciences naturelles (agronomes, pédologues, écologues (rôle des écosystèmes et de la biodiversité), géographes, sociologues, économistes, politologues.

4- *Méthodes scientifiques et programmatiques adoptées*

Les méthodes reproduisent le schéma scientifique suivant : observer, modéliser, prévoir.

A. Les observations

Pour les observations, l'analyse par réseaux de mesures de bassins hydriques et de régions agricoles en zone sensible (zones de transition climatique, zones sahéliennes, zones de déforestation rapide) est essentielle. Le choix doit être cohérent avec les projets internationaux. Le but est de participer à mettre en relation les évolutions décelées d'un bassin ou d'une région à l'autre. La télédétection spatiale constitue un outil essentiel pour ces analyses de connexions régionales à l'échelle globale.

Associer des historiens et des géographes pour intégrer la profondeur historique des effets à long terme est également important.

---

[65] Laboratoires du GIS Climat impliqués IPSL : LOCEAN, LSCE, LMD ; CIRED
[66] http://www.agrhymet.ne/
[67] Bolle *et al*., 1993. *Ann. Geophysicae* 11 :173-189

B. La modélisation

Un autre axe réside dans la poursuite du développement et du couplage de différents modèles:

- Modèles climatiques,de végétation (incluant les modèles agrométéorologiques de croissance des cultures), et de leur couplage, afin de rendre possible la simulation de la dynamique temporelle des cycles du carbone et de l'eau. Il faut intégrer à ces modèles les schémas physiques ou biologiques résultant des études et observations réalisées sur les bassins et les zones expérimentales.
- Modèles de « land use » en prenant en compte les critères physiques, biologiques, socio-économiques et politiques affectant la gestion des sols: agriculture industrie/agroécologie, coûts d'exploitation, subventions agricoles, moratoires, urbanisation etc. Ce sont les interactions de ces critères avec le changement climatique qui déterminent les changements d'occupation des sols, dont les conséquences impactent tous les aspects de l'anthroposphère : climat, écosystèmes, biodiversité, quantité et qualité de la production agricole, santé, niveau de vie.

La télédétection peut aussi être un moyen de caler les modèles aux observations accumulées désormais sur une durée assez longue. La prise en compte dans ces modèles des téléconnexions et des temps de latence est un problème à traiter. La définition d'indicateurs de menace sur les différents systèmes est également un outil à développer.

L'intégration de la dimension politique (gouvernance) pour prédire les évolutions peut être conduite en déclinant des scénarii comme dans les projections du GIEC. La recherche d'indicateurs pertinents pour mesurer l'impact de la gouvernance sur la mitigation ou sur l'adaptation aux évolutions est une nécessité.

Les recherches passent par une documentation de bassins et de régions représentatifs, en particulier de zones sensibles.

II. Perspectives : Quelques pistes pour des recherches futures

- Etablir le bilan complet des sources/puits de carbone d'une action régionale: par exemple la reforestation en Europe, conséquence de l'abandon des terres agricoles dans certaines régions, ne conduit pas "uniquement" à une séquestration accrue du carbone: l'accroissement de l'urbanisation accompagnant cet exode rural est une source de carbone qui doit être prise en compte dans le bilan (Schaldach and Alcamo, 2007). De même, un moratoire sur la déforestation liée aux agrocarburants peut conduire à une déforestation indirecte lorsque les cultures de soja destinées à la production de biodiesel au Brésil s'installent sur les prairies des ranchers qui de fait se déplacent, eux, vers la forêt.

- L'étalement urbain dans les pays développés qui réduit les surfaces de terres arables fertiles disponibles. Il s'agit de mettre en œuvre des actions de mitigation : densifier la ville, renforcer et soutenir le secteur agricole des régions périurbaines, entre autres par un soutien à une relocalisation de la consommation alimentaire urbaine (e.g. voir le réseau PURPLE[68]).
- Les achats de terres par les pays « riches/émergents » dans les pays « pauvres »[69]. Ce point est très lié aux problématiques du "virtual water trade", renforçant l'absolue nécessité d'étudier de manière couplée l´évolution des ressources en eau et sols.

[68] The Peri Urban Dimension of the CAP, 2008: www.purple-eu.org
[69] von Braun and Meinzen-Dick, *IFPRI Policy Brief* 13, April 2009

- Assurer une meilleure gestion de l'eau de pluie dans les systèmes pluviaux (réduction de l'évaporation, récolte de la pluie tombée en dehors de la période de croissance de la végétation ou hors des champs).

- Etudier les voies de réduction de l'irrigation, par exemple le drainage intermédiaire des rizières, associée à une réduction du travail et des coûts, mais aussi à une réduction des émissions de CH_4 – Impacts à prendre en compte: augmentation des émissions de N_2O-, de l'offre alimentaire (e.g. poissons/canards des rizières continuellement inondées et qui jouent un rôle important dans certains systèmes agricoles traditionnels).

- Simuler l'utilisation en eau des différentes denrées (alimentaires ou non) agricoles, particulièrement dans un contexte de changement climatique, afin de pouvoir déterminer les meilleurs choix possibles permettant une production alimentaire abondante et nutritive, une éventuelle production d'agrocarburants, ainsi qu'une production suffisante de fibres, en utilisant le moins d'eau possible.

- Intégrer les décisions politiques résultant des coûts de dépollution dans les modèles de « land use » (gestion des cultures = gestion des sols = gestion de l'eau). Par exemple, la ville de Münich a très fortement réduit les coûts de traitement de l'eau potable en subventionnant une agriculture biologique sur son bassin versant (essentiellement des pâturages).

Thème 4 : Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales

Animateurs du thème : Amy Dahan et Pierre Matarasso
Rédacteurs : Michel Colombier, Partick Criqui, Amy Dahan, Hélène Guillemot, Pierre-Yves Longaretti, Pierre Matarasso, Yves-Charles Zarka

INTRODUCTION : Présentation du thème

L'évolution conjointe de la démographie, de l'aménagement des territoires, de l'économie et des modes de vie fait peser sur le Système Terre des contraintes environnementales à l'échelle planétaire. Elles tiennent à la fois à des contraintes amonts : les disponibilités de certaines énergies fossiles et matières premières comme le pétrole et le gaz (mais aussi les terres, l'eau, le phosphore, etc.) et à des contraintes avales, liées à l'accumulation des GES dans l'atmosphère, de polluants dans les milieux terrestres et marins, etc. Ces contraintes environnementales planétaires s'ajoutent aux impacts en termes de pollution locale et de réduction de biodiversité qui résultent des différentes activités humaines.

La gestion collective de ce double défi nécessite la mise en place de modes d'organisation et de gouvernance d'un tout nouveau type. Ces gouvernances devront s'exercer aussi bien au niveau planétaire qu'au niveau des territoires. L'une des incertitudes majeures concernant la dynamique environnementale planétaire provient de la difficulté à appréhender les effets conjugués de l'atténuation (mitigation) de toutes les atteintes environnementales résultant des activités humaines et les incertitudes liées aux adaptations de ces activités dans le cours des développements socio-économiques, alors même que ceux-ci sont mis en œuvre de manière antagoniste dans un jeu d'intérêts sociaux (individuels et collectifs), économiques et politiques aux niveaux local, régional et global.

Ceci pose des questions fondamentales concernant la croissance socio-économique, les régulations internationales, les modes de déploiement des politiques environnementales et des (in)cohérences entre local et global, entre court et long termes. Dans ce cadre éminemment complexe, la formulation même de scénarii macroscopiques est en soi un objet de recherche.

Axe 1 : Styles de vie, modes de vie durables

[avec des contributions empruntées à Cyria Emélianoff, Michelle Dobré, Michel Fijalkov et Edwin Zaccaï]

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- *Introduction*

L'extrême variété des conditions démographiques, territoriales, climatiques, sociales, culturelles rend impossible toute généralisation sur les modes de vie. Leur diversité peut toutefois être située entre deux extrêmes : les modes de vies urbains, en extension, et les modes de vies « ruraux pauvres » qui concentrent plus d'un tiers de l'humanité. L'Atelier s'est fixé comme objectif de traiter principalement du mode de vie « urbain occidental ». En effet, il est l'un des plus polluants et constitue en outre, en raison de sa diffusion en tant que « norme », un véritable « attracteur », une sorte de modèle sur lequel de nombreuses sociétés cherchent à se calquer. D'où l'importance de savoir si ce mode de vie peut être transformé dans le sens d'un maintien des aménités (c'est-à-dire des avantages et des services rendus aux personnes) qu'il présente, associé à une réduction drastique de ses conséquences environnementales négatives (externalités).

2- *Etat de l'art*

[D'après un projet de recherche en cours M. Fijalkoff *et al*., Programme Energie CNRS]

Les modes de vie et de consommation durables se sont imposés comme un axe structurant des recherches sur la durabilité urbaine, objets d'une abondante production depuis quelques années[70]. Il est difficile d'imaginer une ville durable sans que les modes de vie en soient fortement impactés. En effet, l'éco-efficience peut se conjuguer avec une forte consommation de ressources, en vertu d'effets rebonds. Les économies d'énergie résultant de certaines infrastructures ou technologies sont plus que compensées par l'accroissement global des consommations, comme le font apparaître par exemple les bilans des plans climat locaux conduits en Europe. Inversement, la promotion de modes de vie durables paraît contradictoire lorsque les infrastructures poussent à une consommation croissante de ressources[71]. La question de l'évolutivité des villes dans leur matérialité est donc de plus en plus couplée avec la question de l'évolution des modes de vie, fruits d'une culture technique aussi bien que des valeurs sociales, éthiques et culturelles.

Les recherches conduites à international sur les impacts environnementaux des modes de vie et de consommation ont particulièrement analysé le rôle des morphologies urbaines et le poids des valeurs environnementales des individus. Elles montrent la complexité des interactions entre les variables. Si les morphologies urbaines ont un impact sensible sur les consommations directes d'énergie (essence, chauffage, électricité), les consommations indirectes d'énergie augmentent avec les revenus des ménages, de manière

[70] Hertwich E., Briceno T., Hofstetter P., Inaba A. (eds), 2005. *Proceedings Sustainable Consumption*: the Contribution of Research, Workshop, 10-12 February, Gabel Hus, Oslo
Hertwich E., Ornetzeder M., 2005. The Environmental Benefit of Car-free-Housing: A Case in Vienna. *In* Hertwich E. *et al*. (ed), op.cit., p 161-170
Charter M., Tukker A., (ed), 2006. Sustainable Consumption and Production: Opportunities and Challenges, *Proceedings*, Launch Conference of the Sustainable Consumption Research Exchange (SCORE), 23-25 November, Wuppertal
Geerken T., Tukker A., Vezzoli C., Ceschin F. (ed), 2008. Sustainable Consumption and Production : Framework for Action. *Proceedings*, Second Conference of the Sustainable Consumption Research Exchange (SCORE), 10-11 March, Halle des Tanneurs, Brussels

[71] Southerton D., Chappells H., Van Vliet B., (ed.), 2004. Sustainable consumption: the Implications of Changing Infrastructures of Provision, Edward Elgar Pub., Cheltenham, UK, Northampton, MA

non linéaire[72]. Les citadins intra-muros accordent plus de temps au shopping et à la culture, et une « mobilité de compensation[73] » peut être mise en évidence[74]. Au-delà des infrastructures, l'affectation du temps libre semble déterminante pour l'empreinte écologique des habitants. Il ne semble pas exister de corrélation positive entre les valeurs pro-environnementales des individus et un niveau de consommation énergétique amoindri. Les théories du changement social sont mises au défi par la complexité des facteurs en interaction. Qu'elles mettent l'accent sur les déterminants (sociaux, techniques, économiques, écologiques), sur la liberté de choix des individus ou encore sur les « jeux d'acteurs » engagés dans l'action, la dimension prospective est en grande partie absente.

Les modes de vie renvoient également à la question de la justice environnementale et du partage équitable des ressources à l'échelle planétaire, dans le sillage des réflexions sur l'éco-développement. Les recherches sur la consommation «éthique»[75], «responsable»[76] ou «durable»[77] tentent de réarticuler les problématiques environnementales et sociales à l'échelle Nord-Sud. Si les modes de vie occidentaux sont à l'origine des deux tiers des impacts environnementaux globaux, tout en concernant à peu près un sixième de la population mondiale[78], une forte variabilité sociale et culturelle des «empreintes écologiques» est observée. A niveau de vie comparable, l'intensité matérielle des consommations varie d'un à quatre selon les pays[75] : d'importantes marges de manœuvre existent.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

Cet état des lieux montre la nécessité de réaliser des recherches sur la dynamique des modes de vie et de se placer dans une optique prospective. Ainsi, il s'agit d'identifier les variables clés de l'évolution des modes de vie en France et dans le monde et leurs impacts énergétiques, que ce soit les signaux faibles révélateurs de nouveaux comportements (habitat groupé, régimes alimentaires, loca-vorisme, nouvelles pratiques de mobilité, simplicité volontaire, etc.) ou, plus généralement, l'évolution des représentations sociales et des valeurs, des modes d'habiter, de travailler, de consommer, etc., dont les motifs ne sont pas nécessairement liés à des préoccupations environnementales mais qui peuvent avoir des effets significatifs, positifs ou négatifs, sur les consommations d'énergie.

Les thèmes (variables) clés identifiés par l'Atelier et qui devraient faire l'objet de recherches dans une optique prospective et de manière croisée sont explicitées ci-dessous.

1- Les bases techniques, technologies, énergies, organisations associées aux styles de vie

Des études sur les bases techniques, organisationnelles permettant l'émergence à court et moyen termes de «nouveaux styles de vie» qui ne sacrifieraient pas la plupart des standards de vie actuellement en vigueur en Europe et sur les possibilités de leur mise en œuvre à court et moyen termes devraient être encouragées. En effet, un certain nombre de

[72] Moll H., Noorman K., Kok R., Engström R., Throne-Holst H., Clark C., 2006. Pursuing more Sustainable Consumption by Analysing Household Metabolism in European Countries and Cities. *In* Jackson T. (ed), op. cit., p 67-87

[73] incluant le renforcement d'un tourisme mondialisé

[74] Perrels A., 2005. Grappling with hybrid structures in sustainable consumption models –disentangling urbanity and lifestyle. *In* Hertwich E. *et al*. (ed), op. cit., p 266-307

[75] State of the World, 2004. La consommation assassine. Comment le mode de vie des uns ruine celui des autres ? Pistes pour une consommation responsable. Ed. Charles Léopold Mayer, Paris

[76] Crocker D., Linden T. (ed.),1998. Ethics of Consumption. The Good Life, Justice and Global Stewardship, Rowman and Littlerfield Pub., Lanham, Oxford

[77] Jackson T. (ed.), 2006. The Earthscan Reader in Sustainable Consumption, Earthscan, London

[78] SCORE, 2008. Sustainable Consumption and Production: a Framework for Action, 20 p. www.score-network.org

problèmes se posent, parmi lesquels : des transformations industrielles importantes, la diffusion des savoir-faire et les formations nécessaires à leur mise en œuvre, des changements importants dans l'organisation de la vie matérielle, l'acceptabilité des solutions envisagées et leur adoption dans un cadre démocratique et non autoritaire.

Pour l'instant, l'articulation des modes de vie avec les solutions technico-économiques de «sociétés à faible impact environnemental» n'a pas encore fait l'objet d'une étude systématique, en particulier pour les problèmes posés par la transition énergétique. Cependant, plusieurs textes et conférences convergent[79].

La plupart des besoins au niveau de la demande finale pourraient être satisfaits sans perte d'aménités et en diminuant les dommages environnementaux. Les approches d'amélioration de l'efficacité énergétique au niveau de la demande ou d'éco-conception (notamment à travers la réduction des matériaux utilisés, c'est-à-dire la dématérialisation) constituent des voies d'innovation intéressantes. Elles ne s'opposent pas à une approche par l'offre d'énergie ou de matériaux produits de façon non polluante mais s'avèrent plus efficaces sur le plan économique. En effet, une unité d'énergie ou de matériau économisée est toujours moins coûteuse qu'une unité "propre" sur le plan environnemental. Par ailleurs, la production d'un même bien ou service avec une quantité plus faible d'intrants permet de réduire de manière importante toutes les empreintes environnementales des chaînes de production. C'est en raison de ces économies d'échelle au niveau des chaînes de production que l'efficacité économique peut être améliorée. Ajoutons qu'elle est potentiellement corrélative d'une réduction des emprunts pour la mise en place des unités de production, d'une réduction des importations et des tensions sur les matières premières au niveau mondial (donc d'une baisse de leur prix). Les pays dont l'économie évoluera vers l'amélioration de l'intensité énergétique (et/ou en matériaux) finale pourront ainsi se « découpler » du marché mondial pour ce qui est des caractères environnementaux de la production. Pour l'instant, il est possible de s'appuyer sur deux grands types de travaux :

- Ceux portant sur la faisabilité de nouveaux modes de vie du point de vue technique et économique. Il existe de nombreuses prospectives industrielles[80] sur ces sujets.
- Ceux portant sur l'apparition de nouvelles pratiques et qui qualifient l'acceptabilité des hypothèses de faisabilité technique et économique[81]

2- Les bâtiments et villes

Pour cet aspect, on se reportera aux perspectives de recherches dégagées par le thème « Aménagement du territoire et utilisation des sols ».

3- Les mobilités

Ce thème adresse de nombreuses questions à la recherche comme par exemple :

---

[79] Par exemple, on pourra se référer aux conférences de F. Moisan « Facteur 4 » et « Ecologie et mode de vie » de A. Maugard et de J.-L. Bergey sur la consommation durable :http://www.canalu.tv/producteurs/universite_de_tous_les_savoirs/(onglet)/collections/(id)/176901#onglet_collection. Voir également P. Matarasso : Pour la Science Spécial Climat 2007 : « Le facteur 4, un projet de société » ; Les travaux de B. Rogeaux à EDF (présenté au Think Tank IDEE-Fondation Tuck) ; Le rapport « facteur 4 » au Conseil d'Analyse Economique présenté par C. de Boissieu ; Les exercices de prospective au LEPII et à Enerdata de P. Criqui et B. Château ; Le rapport de A. Darnton « Driving Public Behaviours for Sustainable Lifestyles » et pour une approche plus théorique : G. Spaargaren : Sustainable Consumption. Cet auteur fait primer l'analyse des questions environnementales à partir des fins des individus et des familles, des histoires de vie

[80] voir le site www.Volkswagen2028.com, le projet ODMIR de « Maisons Phénix »

[81] Recherches de N. Blanc, C. Emelianoff, M. Dobré et au Royaume-Uni, de D. Evans and T. Jackson « Beyond rhetoric: the possibilities of and for 'sustainable lifestyles' » Authors: David Evans, Wokje Abrahamse in Environmental Politics, Sustainable consumption: a theoretical and environmental policy perspective.
G Spaargaren - Society and Natural Resources, 2003 – ksinetwork.com

- L'étude et l'évaluation prospective des types de mobilités et leurs impacts environnementaux à différentes échelles (mobilité urbaine, interurbaine, ville-campagne, mouvements pendulaires, mobilités intercontinentales, etc.),
- Les aménagements et innovations techniques nécessaires à la réduction de ces impacts,
- Les aménagements institutionnels et politiques, les infrastructures et réseaux de transports en commun et leurs articulations entre territoires et usagers,
- La théorisation de l'économie des fonctionnalités dans le domaine de la mobilité[82].

4- Les régimes alimentaires et les modes de productions agricoles

D'une manière générale, la question de rapprocher les productions de la demande alimentaire dans l'espace (traçabilité de la localisation de la production, filières courtes) et dans le temps (consommation de produits de saison) est au centre d'une problématique de la réduction des impacts environnementaux des systèmes agricoles et alimentaires. D'autre part, les régimes alimentaires impliquant une réduction des consommations des produits d'origines animales sont compatibles avec une réduction des surfaces nécessaires à l'alimentation et des impacts environnementaux associés[83,84]. Par exemple, assurer la couverture des besoins en protéines des individus par des protéines végétales et non animales se traduirait par une réduction importante de la déforestation car les terres déforestées en Amazonie, le sont principalement pour développer des productions destinées à l'élevage mondial (soja) ou du pâturage.

5- Les autres modes de consommations matérielles (vêtements, informatique, mobiliers….)

L'étude des nouveaux modes de consommation matérielle tournés vers la recherche de durabilité devrait être encouragée. Ces modes de consommation seront à mettre en rapport avec les nouveaux processus de production, de transport et de distribution dans une approche globale (e.g. ACV).

6- Les filières Industrielles et énergétiques,

Les économies d'échelles rendues possibles par amélioration de la productivité de ressources naturelles (c'est-à-dire par une consommation moindre de ressources à service égal ou amélioré pour le consommateur final) se traduisent par une réduction de la taille des usines produisant biens et équipements en amont. De même, produire de la mobilité par des transports en commun de grands flux (tramways, métro, etc.), des navettes à la demande (à trajets variables), est corrélatif d'une réduction d'un facteur 4 à 5 des consommations d'énergie et de métal comparé à la même mobilité réalisée par des véhicules de une tonne, motorisés à 80 KW, remplis au ¼ de leur potentiel et utilisés 700 h/an.

7- La citoyenneté, démocratie, collectivités territoriales

---

[82] Voir ici les travaux de l'INRIA sur les véhicules automatiques, la « route automatisée » au PREDITT ; les conceptions relatives à une reconversion de la mobilité vers une « économie des fonctionnalités » développées par les grands opérateurs de transports comme la RATP, la SNCF, les collectivités territoriales (Energie Cités), certains industriels de l'automobile (www.volkswagen2028.com), le MIT-urbanisme et enfin la théorisation de l'économie des fonctionnalités dans le domaine de la mobilité (D. Bourg). Si le futur économique et technologique d'une mobilité à bas profil énergétique existe, une contestation à caractère sociologique se fait jour également (travaux de Vilmouv à Créteil et bibliographie de Massot M.H., Orfeuil J.-P. et F. Asher F.)

[83] Low Emission Farming Systems: A whole-farm analysis of the potential impacts of greenhouse policy by Kingwell R. and Metcalf T., 2009

[84] Low Greenhouse Gas Agriculture, FAO april 2009

Une possibilité institutionnelle, technologique ne fait pas l'adhésion à un projet de société, d'une collectivité jusqu'ici marquée par le consumérisme et l'individualisme. Le changement de modes de vie est largement une question de gestion locale intégrée, aussi bien des services, que des transports, de la production d'électricité etc. Les formes nouvelles, de concertation, d'assemblées citoyennes et territoriales, de souverainetés territoriales doivent être étudiées. On peut supposer que les collectivités qui parviendront à faire les premiers pas serviront assez rapidement de modèle. Des travaux d'observation relatifs à toutes les nouvelles pratiques et à l'évolution des valeurs s'imposent en termes de recherche.

8- Les politiques et mesures

En 2008 l'OCDE a produit un rapport sur le thème « Promouvoir la consommation durable, bonnes pratiques dans les pays de l'OCDE »[85] dont les différents chapitres détaillent la question cruciale des politiques et mesures.

9- Évaluation, Monitoring

L'évaluation et la mesure de la durabilité, d'une ville, d'un éco-quartier sont des questions fondamentales, qui vont impliquer des évaluations de cycles de vie sur la plupart des biens et services consommés etc. Cette question soulève des difficultés d'ordre méthodologique : comment réaliser des mesures du « contenu carbone », de « l'empreinte écologique», d'un système ouvert ? Plusieurs propositions de méthodes existent (l'ACV, l'empreinte écologique etc.) et posent des questions d'ordre éthique et politique : quels droits vont s'attacher à la question ? Y aura t-il des sanctions pour qui aura une empreinte écologique trop élevée ? Enfin, la mesure de ces variables relatives aux impacts écologiques impliquera-t-elle des « dévoilements » d'informations privées autant que de secrets industriels [86] ?

Axe 2 : Environnement mondial et territorial : problèmes énergétiques, sociaux et politiques

[Préambule sur l'état de l'art au niveau international et national ; éléments empruntés au Programme « Territoires Environnement, Citoyenneté » dirigé par Y.- C. Zarka et soutenu par l'INSHS et l'INEE)[87]]

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- Développement durable et questions environnementales à l'échelle mondiale (Politique publique, philosophie politique, science politique)

La réflexion sur le développement durable s'est déployée ces dernières années autour d'un ensemble de concepts émergents parmi lesquels il faut citer : les biens publics aux niveaux régional et mondial, les services écosystémiques, et le thème « solidarités et environnement ».

Plus généralement, la question des limites posées dans les années 1970 par le Club de Rome[88], par K. Boulding[89], par R. Dubos[i], s'est progressivement imposée comme une

[85] OCDE, 2008 - Promoting Sustainable Consumption, Good Practices In OECD Countries
[86] Une analyse assez complète est présentée dans : « Pursuing More Sustainable Consumption by Analyzing Household Metabolism » H. C. Moll *et al.* ; Travaux en cours de S. Barles, LTMU-Marne la Vallée ; N. Buclet CREIDD, Université de Troyes.
[87] Y.-C. Charles Zarka : Le monde émergent. Trois volumes sur l'environnement, Armand Colin, à paraître en 2010
[88] Limits to Growth 1972

problématique déterminante pour le 21ème siècle. L'accroissement des besoins, via les processus de développement, d'une population mondiale croissante se heurte à un ensemble de contraintes sur les matières premières fossiles, l'eau, l'espace agricole et révèle les limites de l'environnement planétaire à absorber sans dommage pour la géochimie, le climat et la biodiversité, l'ensemble des rejets et pressions résultant de l'activité humaines.

Depuis la fin des années 1960, les constats et les diagnostics s'accumulent. A la fin des années 1980, en particulier à partir du « Rapport Bruntland » (Our Common Future, United Nations World Commission on Environment and Development (WCED 1987), de la création du GIEC en 1988 et de l'émergence des « Conférences des Parties » relatives au climat (COP), une progressive structuration d'un projet de régulation se met en place. Le sommet de Rio sur l'environnement et le développement en 1992, puis les conventions sur le climat et la biodiversité, les Agendas 21 achèvent de porter dans l'espace public et sur l'agenda politique des thèmes qui étaient jusque là peu pris en compte par les gouvernements. Le terme de « gouvernance mondiale » commence à se répandre.

En parallèle, une réflexion relative à l'éthique, la philosophie et les sciences politiques émerge. D'abord, au travers d'un questionnement théorique en particulier celui que poursuit G. Hardin[90] depuis la fin des années 1960, puis en 1979 avec le passage de la « tragédie des communs » au « management des communs » et à la gestion coopérative et collective des biens publics[91]. A ce dernier ouvrage, participent un certain nombre d'auteurs comme K. Boulding ou encore Vincent et Elinor Orstrom[92]. Ces écrits joueront un rôle central dans l'émergence de la réflexion sur les sociétés humaines et l'environnement. La discussion sur les biens publics mondiaux fait appel aux compétences des chercheurs en sciences politiques et introduit dans le discours environnemental des termes comme externalité, passager clandestin, « free lunch », défaillance de marché, etc[93].

Progressivement, une réflexion se structure autour des politiques environnementales, des externalités, des biens communs. Les axes de ces débats sont les concepts de « politiques et mesures », les taxes, les achats par l'Etat (« procurement ») destinés à induire une baisse de coût, de l'apprentissage par l'action (« learning by doing »), les marchés de permis d'émissions, etc. Ils concernent davantage la modification des comportements par des mesures économiques où réglementaires que le thème de la démocratie et de la décision publique. Ils font davantage appel à une régulation par le haut qu'à des initiatives des collectivités territoriales ou citoyennes. Ils se caractérisent au départ par une dominance de concepts et modèles économiques (modèles d'équilibre général, modèles dynamiques sans représentation des effets de seuils technologiques, etc.). Un vocabulaire et une grammaire du raisonnement se mettent en place dont il faudra faire une analyse critique.

Au début des années 1990, de nouveaux concepts se développent, à partir d'un certain nombre d'expériences dans le domaine de la maîtrise de l'énergie : citons par exemple, l'idée du « double dividende » relatif à la transformation de la fiscalité avec un passage des prélèvements du travail vers les activités polluantes, celle qu'un « free lunch »

---

[89] Boulding's 1966 essay. The Economics of the Coming Spaceship Earth Only One Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet, 1972, co-authored with B. Ward and United Nations Conference on the Human Environment

[90]Only one Earth: The Care and Maintenance of a Small Planet, 1972, co-authored with B. Ward and the United Nations Conference on the Human Environment

[90] Tragedy of the Commons, 1968. *Science,* Vol. 162, No. 3859, December 13, 1968, pp. 1243-124

[91] Managing the Commons: http://www.ecobooks.com/books/commons.htm

[92] Prix de l'Académie Noble pour l'économie 2009

[93] Cowen, Tyler (eds). Public Goods and Market Failures. New Brunswick, N.J.: Transaction Publishers, 1992

soit possible par les mesures de maîtrise de l'énergie ou une mise en œuvre plus systématique des transports en commun.

A la fin du 20ème siècle, la perspective se transforme progressivement au travers de l'apparition de nouveaux acteurs non étatiques et de la progressive théorisation de leur rôle dans la « gouvernance ». Ces acteurs sont d'abord de grandes ONG et associations de l'action environnementale (e.g. Greenpeace, le WWF, Friends of the Earth, le mouvement Via Campesina, etc.), puis viennent s'ajouter des « cercles de réflexions » (« Think Tanks »), d'abord aux Etats-Unis comme « Resources for the Future », « Pew Center on Climate Change », puis en France et en Europe (e.g. IDDRI, Fondaterra, etc.). Enfin des structures associatives plus locales orientées plus directement sur des actions de transformations voient le jour (e.g. Associations pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne (AMAP), les mouvements de citoyens tel que « Habitat Groupé »).

Face à ces évolutions, l'industrie finance certains travaux des « cercles de réflexions et d'influence » (« Think Tanks »), s'allie aux ONG internationales lors de négociations internationales sur l'environnement. Les pratiques de Responsabilité Sociale des Entreprises (RSE) qui impliquent des pratiques et une gouvernance associant diverses parties prenantes se développent. Les schémas et pratiques de ces concertations impliquant des alliances d'agents et acteurs économiques nouvellement constitués viennent s'ajouter aux perspectives plus anciennes des « politiques et mesures » de gouvernance par le haut. L'environnement introduit dans la décision de nouveaux acteurs qui sont le pendant des acteurs politiques et des administrations[94].

En parallèle, de nouvelles formes de concertations voient le jour comme les « conférences de citoyens ». L'ensemble de ces évolutions apporte un nouveau ton à la gestion des grandes questions environnementales au niveau des grands sommets mondiaux comme au niveau de questions locales d'aménagement du territoire (les OGM, l'éolien, le traitement des déchets, etc.)[95].

L'apparition de l'ensemble de ces nouveaux acteurs, leurs capacités à s'appuyer les uns les autres, à se transmettre de l'information, à se mobiliser, à déclencher des mouvements d'opinions est un des grands phénomènes du nouveau millénaire. Les États nationaux, leurs arènes de décisions doivent désormais compter avec ces nouveaux acteurs[96,97,98].

2- *Éléments sur la situation de la recherche et de l'enseignement relatifs aux « Biens Publics Mondiaux » en France*

Sur l'ensemble des thématiques qui précèdent, on observe en France la création d'un grand nombre d'enseignements (par exemple sur l'économie de l'environnement et la gestion des biens publics) ainsi qu'une demande pressante des organismes des politiques publiques régionaux nationaux et européens (par exemple sur l'évaluation environnementale). Enfin, les concepts nouveaux, tel que celui des services écosystémiques, restent très débattus. Une grande partie de ce qui s'enseigne, se débat,

[94] Feertchak H., 2007. Responsabilité sociale des entreprises (RSE) : l'environnement comme alibi ou comme levier ? communication à la Journée d'études Environnement et Responsabilité Morale, LPE Institut de Psychologie, Université Paris Descartes, 5 juin 2007

[95] Voir sur ce sujet, les travaux d'A. Nadaï (CIRED)

[96] Brondizio E., Ostrom E., and Young O., 2009. Connectivity and the Governance of Multilevel Social-Ecological Systems: The Role of Social Capital. *Annual Review of Environment and Resources* 34 (November): 253–78

[97] Ostrom E., 2009. A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325(5939) (July 24): 419–22

[98] Guillaume B. et Gervais C., 2009.Prospective et durabilité : une approche stratégique à rebours du temps pour gérer les risques environnementaux. *Cognitiques*, (Octobre), vol.13, n° Spécial "*Risque et Cognition",* p. 103-121

s'impose dans les appels à projets s'appuie davantage sur la littérature anglo-saxonne et des références relativement anciennes que sur le déploiement au niveau de notre pays d'un effort de recherche coordonné.

3- *Problématique environnementale et développement durable à l'échelle des territoires*

La problématique environnementale et celle du développement durable se posent aujourd'hui essentiellement en termes territoriaux. C'est en effet au niveau territorial que se font les relations entre le local et le global, entre le naturel et le culturel, entre les sources d'énergie et leurs usages, entre mode de production et type de consommation, entre les modes de vie et les choix politiques. La problématique environnementale met au premier plan le territoire défini ici comme un espace structuré et organisé par l'homme. Un territoire a une histoire, il est riche ou pauvre en énergie, il a fait l'objet d'acquisition et de transmission, il est soumis à une juridiction, à des autorisations, il peut admettre certaines activités et pas d'autres, etc.

L'Atelier a voulu souligner ci-dessous un certain nombre de ces aspects territoriaux de la problématique environnementale, concernant les choix énergétiques, la production et la consommation, et l'aménagement des lieux de vie[99].

A. Choix énergétiques à l'échelle des territoires

La question de l'énergie s'insère dans deux enjeux majeurs : premièrement, la contrainte de la limitation des émissions de gaz à effet de serre, deuxièmement, la déplétion des ressources fossiles et le renchérissement de l'énergie. Ces enjeux vont impliquer des transformations profondes dans les modes d'usages et de productions de l'énergie. Ces transformations s'insèrent dans une évolution des cadres institutionnels et techniques relatifs à l'énergie.

La distinction entre le secteur de « l'offre d'énergie » et le secteur de la « demande d'énergie » est aujourd'hui largement caduque pour plusieurs raisons, spécialement au niveau des territoires. D'une part, sur le plan institutionnel, les entreprises « libéralisées » du monde de l'énergie se transforment de plus en plus en opérateurs qui prennent en charge la distribution de services énergétiques. D'autre part, sur le plan technique, les possibilités de production locales en fonction de besoins locaux, de divers vecteurs énergétiques (solaire thermique, photovoltaïque, éolien, etc.) imposent peu à peu la vision de « systèmes énergétiques intégrés ». Enfin, ce rapprochement de l'offre et de la demande a mis en évidence d'immenses possibilités d'amélioration de l'efficacité de la production des « services énergétiques » que nous utilisons tous (pour nous chauffer, nous transporter….). Cette évolution a fait des diverses collectivités territoriales des acteurs essentiels du monde de l'énergie qui sont venus s'ajouter aux grands opérateurs de centrales et de réseaux.

Dans un double mouvement contradictoire, les grands opérateurs gagnent un contrôle accru sur les modalités de la consommation d'énergie et de services énergétiques en même temps que les collectivités territoriales gagnent des marges de négociation et de manœuvre. Enfin, la catégorie même d'« énergie » tend à se dissoudre dans une vision globale et intégrée des besoins humains (habiter, se déplacer, se nourrir, etc.) compatible avec la préservation de l'environnement local autant que limitant les impacts locaux sur les grands cycles géochimiques terrestres.

[99] Pour les aspects agricoles de l'aménagement territorial : voir les bibliographies de M Guérin (Cemagref), J.-F. Soussana (INRA) et pour les aspects énergétiques A. Nadaï (CIRED)

Une semblable évolution, techniquement, économiquement et institutionnellement possible sous diverses formes vers des territoires à bas profil énergétique, n'a aucune raison de s'apparenter à un chemin de privation. Bien au contraire, elle est compatible avec une amélioration des conditions de vie. Mais cette évolution devra résulter de l'association d'une concertation approfondie au niveau territorial et d'une coordination aux niveaux nationaux et européens. Il sera nécessaire, à chaque phase de cette transformation, que les aspirations, les objections, les souhaits, les espoirs des citoyens habitant le territoire se trouvent respectés. Cette évolution va nous entraîner vers des formes entièrement nouvelles d'organisation de notre « vie matérielle », ainsi que vers un approfondissement et une intensification des formes démocratiques.

B. Production et consommation durables : cycle de vie des produits (déchets, recyclage, etc.)

Les préoccupations de développement durable incitent à sortir d'une prééminence de l'offre et à considérer les actes de production et de consommation de manière intégrée en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie du produit. Manifestement, le produit jetable est moins durable que le produit réparable. Cependant, la durée de vie du produit peut être assez brève mais son éco-conception doit permettre la réutilisation à plusieurs reprises d'un maximum de ses composants. L'impact sur l'espace de production et le rapport entre bassins de production et de consommation sont les principales composantes territoriales de cette question. Les liens des questions sur production et consommations durables peuvent se traiter à deux niveaux différents qui sont certes liés mais également relèvent de problématiques complémentaires mais différentes. Ainsi ce qui est proprement de l'ordre du « style de vie » relève de l'acceptation voire de tendances spontanées à changer ses pratiques aux niveaux des individus et des familles voire de petites collectivités. Nous sommes dans ce cas dans un champ comportemental qui relève de la sociologie. Les questions qui impliquent des organisations en réseaux comme les transports, la distribution d'eau, la collecte des déchets impliquent des décisions au niveau des collectivités territoriales. Les recherches relèvent alors de la géographie et des sciences politiques[100].

L'impact sur l'espace productif et la localisation de la production

La limitation de la diffusion d'éléments toxiques sur le site de production, la sobriété dans l'utilisation des matières premières et de l'énergie interrogent les conditions techniques de production. Elles posent aussi la question de la réhabilitation des sites industriels anciens, leur dépollution, leur évolution esthétique. L'amélioration de la situation dans un territoire donné (européen par exemple), peut être obtenue par le report des problèmes environnementaux (les émissions polluantes notamment) dans d'autres territoires. La question de la production et de la consommation durables a ainsi un rapport direct avec la division internationale du travail.

Actuellement, les bassins de production les mieux insérés dans la concurrence internationale associent logique de connaissance et systèmes techniques flexibles. L'éco-conception, elle-même, peut structurer son propre espace de production en présentant dans certains sites des opportunités pour les territoires de création et de maintien d'emplois, de R & D ou de services de réparation, avec une incidence sur la production locale de déchets et

[100] Les programmes du CNRS, « Territoires Environnement Citoyenneté », dirigé par Y. C. Zarka, « Eau et Territoires », « PIRVE » dirigé par O. Coutard sont à ces interfaces, de même que des programmes comme le PIREN SEINE qui étudient l'écologie d'un bassin en fonction de l'agriculture et des activités qui s'y déroulent. Les travaux de S. Barles, O. Coutard, N. Blanc, J. Laterrasse, des équipes du LATTS, du LTMU, du LADYSS sont également situés à cette interface mais avec une dominante plus « territoriale » que sociologique. Il en va de même de l'équipe « Territoires » du Cemagref dirigée par M. Guérin. Le programme « Territoires, Environnement, Citoyenneté » est précisément un programme d'interface qui réunit également des membres des équipes précédentes.

de ses retraitements. Le comportement du consommateur a souvent des conséquences directes sur la pollution des territoires de production. La réduction drastique des xénobiotiques agricoles par exemple nécessiterait de la part des consommateurs de modifier leurs critères physiques de choix des fruits et légumes (à l'origine en France d'environ 1/4 de ces émissions toxiques)[101].

Le rapport entre bassins de production et de consommation

Les enjeux du changement climatique conduisent à reconsidérer les conditions de transport et à réhabiliter les circuits courts en particulier dans le domaine de l'agroalimentaire. Dans des activités comme le tourisme où il existe un lien organique entre bassin de production et de consommation la durabilité du système, dépend directement de la manière d'organiser les liens entre activités, patrimoines naturels et culturels et de la qualité de vie associée. La vie urbaine croissante pouvant notamment renforcer un tourisme intercontinental et une consommation de produits « exotiques ».

C. Politiques d'aménagement du territoire et durabilité

La question des politiques d'aménagement du territoire est posée au niveau mondial. Elle fait partie de la définition de politiques publiques à des niveaux plurinationaux, comme cela est le cas du niveau européen, ou des niveaux fédéraux dans le cas des USA. Pour l'instant aucune politique véritablement internationale ne s'est mise en place. Des embryons de telles politiques commencent à émerger même dans le cas des Négociations Climats ou des grands accords liés à la biodiversité, la déforestation. Ces questions seront traitées au chapitre suivant. Il n'existe pas encore de schémas institutionnels bien clairs, et reconnus mondialement qui permettraient de lier les décisions locales (régionales) à des politiques publiques mondiales. Dans l'état actuel des choses, les politiques publiques mondiales s'établissent entre les États nations ou les regroupements de tels États comme l'Europe ou encore les fédérations véritables (Etats-Unis, Canada, Brésil, etc.). Des régions autonomes comme la Catalogne, voire les Landers Allemands s'insèrent progressivement dans ces négociations. De ce fait, l'exemple européen est celui qui nous donne le plus d'information, dans une situation de recherche, sur les questions de souveraineté, de subsidiarité, etc. Mais il faut admettre qu'un important travail de philosophie politique d'une part, d'élaboration juridique d'autre part, reste à réaliser avant qu'une réelle stabilité institutionnelle se mette en place au niveau mondial.

Les politiques d'aménagement du territoire ont deux objectifs principaux : l'accompagnement du développement économique des territoires et la réduction de leurs disparités économiques et sociales. Les institutions qui, depuis les années 1960, encadrent et délimitent ces politiques ont connu de profondes mutations. En France, l'État avec la DATAR a joué un rôle central dans la planification stratégique, l'implantation des grandes infrastructures de transport renforçant l'accessibilité aux territoires, la création des métropoles d'équilibre (années 1970), ou la définition des pôles de compétitivité favorisant le renforcement des capacités de recherche et de technologies des villes et des régions. L'Europe, bien que n'ayant pas de compétence formelle en matière de politique territoriale, est aujourd'hui un acteur institutionnel important par les normes d'aménagement que portent ses politiques (initiatives européennes, politiques régionales et rurales, politiques sectorielles).

Face aux contraintes et aux opportunités liées à la mondialisation de l'économie, l'attractivité et la compétitivité ont été au centre des décisions gouvernementales récentes d'aménagement, à l'échelle européenne où le modèle polycentrique est promu pour une réduction des disparités régionales (SDEC, 1999) et à l'échelle nationale. Ces deux objectifs

[101] Sur ces thèmes, voir les travaux de N. Buclet (CREIDD) et S. Barles (LTMU)

sont cependant souvent contradictoires. La compétitivité est synonyme de renforcement ciblé des avantages comparatifs alors que l'équité appellerait une répartition du soutien public sur l'ensemble des territoires. À une échelle plus fine, la concentration a participé aux dynamiques de périurbanisation avec des coûts pour l'environnement (consommation des sols, engorgement des infrastructures et concentration des émissions de CO_2, pollutions et qualité des eaux), mais elle a permis à un certain nombre de communes rurales d'éviter de se dévitaliser. Les remembrements des terres agricoles ont contribué aux regroupements fonciers agricoles, mais ont entraîné des arrachages de haies dans l'ouest de la France qui ont homogénéisé les paysages et causé l'érosion physique et le lessivage chimique des sols. Les politiques d'aménagement du territoire qui se sont succédées questionnent plus généralement leur impact écologique (tracés autoroutiers, implantations industrielles, implantations touristiques promues par les différents Plans neige, développement urbain, etc.).

La problématique du développement durable apporte aujourd'hui un nouveau regard sur l'aménagement et pose la question du renouvellement des démarches entreprises. Elle met l'accent sur la protection de l'environnement et sur les interactions qui existent entre les échelles locales et globales de l'aménagement, entre les critères environnementaux, économiques et sociaux. Elle suppose un changement dans les approches et les méthodes de l'action publique. En particulier elle fait appel aux territoires et à leur capacité à mobiliser leurs ressources dans le cadre de projets de développement. Les acteurs privés et civils deviennent des moteurs importants de la mise en œuvre de l'action publique au même titre que les acteurs politiques et administratifs. De nouvelles pratiques émergent – le partenariat, l'action collective telle que le lobbying ou les mouvements associatifs – pour une prise en compte des références environnementales. On peut citer à titre d'illustration le soutien aux circuits courts de production et de distribution (favorisant le rapport entre bassins de production agricoles et bassins périurbains de consommation de la ville proche), l'aménagement de corridors verts au sein des régions urbaines (permettant en termes d'aménagement des coupures à l'urbanisation et la cohabitation homme/ faune/ flore et le maintien de corridors écologiques). La contractualisation consacrée par la décentralisation a ainsi donné toute sa place aux collectivités locales notamment aux régions, mais aussi à d'autres acteurs institutionnels locaux (associations, services de l'État, SAFER, etc.)[102].

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

Les évolutions dans les modes d'usage et de production de l'énergie à l'échelle des territoires adressent aux sciences humaines et sociales les questions d'une transformation profonde de l'univers matériel de la vie humaine qui se réalise conjointement au partage de l'effort et de la responsabilité. Comment conjoindre démocratie et évolution vers des sociétés à bas profil énergétique sous contraintes environnementales et économiques ? Quelles doivent être les nouvelles pratiques en matière énergétique en matière de construction, de transport et d'alimentation ?

De nombreuses pistes de recherche peuvent être dégagées sur les problématiques de production et de consommation durables à l'échelle des territoires : Quelles sont les formes d'organisation des différents acteurs sur les territoires (producteurs, consommateurs et citoyens) qui peuvent favoriser à la fois l'emploi, l'adaptation aux besoins et à la concurrence avec un impact environnemental satisfaisant ? La nécessité de mieux intégrer la question de la consommation a-t-elle des incidences sur les territoires de la production et leur répartition en Europe ? Quelles sont les conditions culturelles de cette intégration ? Existe-t-il une tendance de fond à la contradiction entre citoyens (conscients des enjeux du

[102] Guérin M., 2008. Evaluation des politiques de développement rural, quelques éléments d'analyse. *Economie Rurale*, n°301, pp.39-52. Voir les autres travaux de M. Guérin en bibliographie (cf. annexes)

développement durable) et consommateurs ou au contraire des convergences sont-elles possibles autour de nouvelles valeurs ? Quelles sont les représentations et les institutions qui peuvent favoriser cette convergence ? Le développement durable réactive différentes formes de rapprochement entre bassins de production et de consommation entraînant une confrontation entre usages (productif et résidentiel notamment). Quelles sont les incidences sur les diversités culturelles de cette confrontation ?

Enfin, sur les politiques d'aménagement du territoire : Quels sont les registres d'action des politiques d'aménagement du territoire aujourd'hui ? En quoi la problématique de la durabilité renouvelle-t-elle les pratiques des politiques d'aménagement du territoire, leurs apports et leurs limites ?

Axe 3 : La gouvernance du Système Terre

ETAT DES LIEUX (Recherches passées et en cours) ET PERSPECTIVES (Quelques pistes pour des recherches futures)

Le concept de gouvernance du Système Terre (F. Biermann 2005, 2007) reflète la transformation à grande échelle des problèmes traditionnels de politique environnementale, en un défi intrinsèque pour la gouvernance : la transformation du Système Terre.

L'expression de gestion du Système Terre est devenue de plus en plus courante. Elle est utilisée dans les programmes de recherches en Sciences de la Nature, en particulier quand il s'agit de fournir ou récolter des données sur les paramètres du Système affectés par l'action humaine. Le terme de gouvernance est plus large que celui de gestion, et il est devenu crucial dans les sciences sociales. Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur son utilisation, ce terme signifie généralement : trouver des formes nouvelles de régulation qui se situent au-delà de l'activité traditionnelle et hiérarchique des Etats; par exemple, l'autorégulation par des acteurs sociaux, la coopération privé - public pour résoudre des problèmes de sociétés, les nouvelles formes de politiques multi-échelles, la construction d'institutions et d'architectures adéquates etc.

Sur la gouvernance et l'étude de ses divers *régimes*, deux traditions intellectuelles et disciplinaires majeures coexistent : celle des relations internationales (P.M. Haas)[103], et celle des « Science Studies » (B. Latour)[104] (dites parfois aujourd'hui des « Civic épistémologies »[105,106]). Leurs modes de représentation se croisent et possèdent tous deux leur légitimité. La première se concentre sur les architectures[107], les visions économiques, la reconfiguration des intérêts nationaux et des grands blocs d'Etats. La seconde s'intéresse à un ensemble plus varié d'acteurs (ONG, sociétés civiles, experts..). Surtout, elle accorde une attention privilégiée au rôle crucial de la connaissance scientifique et technique dans les nouvelles questions de gouvernance : organismes d'expertise, processus de co-construction des connaissances et des ordres politiques, production de normes et d'indicateurs etc.

---

[103] Haas P.M., 1989. Do Regimes Matter? Epistemic Communities and Mediterranean Pollution Control. *International Organization*, vol. 43, nº 3, p. 377-403

[104] Latour B., 1999. Politiques de la nature. Comment faire entrer les sciences en démocratie ? La Découverte, Paris

[105] Jasanoff S., 2005. Designs on Nature: Science and Democracy in Europe and the United States, Princeton, Princeton University Press

[106] Miller C.A., 2000. The Dynamics of Framing Environmental Values and Policy: Four Models of Societal Processes, *Environmental Values*, vol. 9, p. 211-233

[107] Aldy J.E., Barrett S.B, and Stavins R.N., 2003. Thirteen plus one: A comparison of global climate policy architectures. *Climate Policy*, 3 (4): 373-397

L'approche des « Science Studies » cherche à englober les styles de raisonnement, les modes argumentatifs, les standards d'évidence et les normes d'expertise qui caractérisent la délibération publique et les institutions politiques (S. Jasanoff 1995); en d'autres termes à cerner comment la connaissance est dynamiquement construite, et appliquée à la recherche de significations ou à l'implémentation de politiques dans les sociétés contemporaines[108]. Comprendre la connaissance est ici comprendre la connaissance en acte; une connaissance qui performe et est performée par les processus sociaux. Dans cette perspective, les expertises environnementales globales évoluant en étroite imbrication avec les processus politiques[109,110], il importe d'entrer dans ces « boîtes noires » où se fabriquent les savoirs et les normes sur le Système Terre, pour mieux comprendre le rôle de l'expertise scientifique dans la gouvernance et les différentes formes de ses interfaces avec la décision politique.

Plusieurs thématiques liées à l'étude de l'expertise et de la gouvernance du Système Terre devraient donc retenir l'attention des chercheurs.

1- L'expertise entre science et politique : définir ce qui compte

Si l'expertise prétend souvent fonder sa crédibilité sur une séparation formelle entre science et politique, de nombreuses études ont montré qu'elle ne fonctionne jamais de cette façon[111,112]. Le GIEC, par exemple, tire son autorité de sa légitimité scientifique et de la constitution d'une « communauté épistémique », mais aussi de sa capacité à prendre en compte des impératifs géopolitiques, de son rôle dans les négociations climatiques et du soutien de diverses institutions et organisations[113, 114, 115, 116]. La définition des problèmes scientifiques étant alors souvent indissociablement politique[117], il est d'un grand intérêt d'étudier, au sein des organismes d'expertise ou des institutions internationales[118], la façon dont sont discutés et décidés les programmes urgents, ce qui doit compter en priorité. De quelle façon, via quelles institutions s'expriment les demandes et sont déterminés les thèmes « policy relevant »[119] ? En quoi façonnent-ils les normes sur la façon efficace de gérer la recherche ? A titre d'exemples, il serait intéressant d'examiner, dans les expertises globales, comment et entre quels acteurs se négocient les échelles de temps et d'espaces à étudier, les facteurs principaux à prendre en compte, les mesures les plus urgentes, ce qui sera repris dans les négociations et ce qui est jugé - peut-être temporairement - moins prioritaire.

---

[108] Knorr Cetina, K., 1999. Epistemic Cultures: How the Sciences Make Knowledge. Cambridge, MA: Harvard University Press

[109] Agrawala S., 1998. Structural and process history of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climatic Change*, 39, 621-642

[110] Dahan A. and Guillemot H., 2009. Climate Change: scientific dynamics, expertise, and geopolitical stakes, in *Global Science and National Sovereignty: Studies in Historical Sociology of Science,* G. Mallard, C. Paradeise, Routledge, New York, 2008. p 195-219

[111] Jasanoff S. (ed.), 2004. States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order. New York, Routledge

[112] Grundmann R., 2006. Ozone and Climate. Scientific Consensus and Leadership, *Science, Technology & Human Values*, vol. 31, nº 1/Jan, p. 73-101

[113] Edwards P., 1996. Global comprehensive models in politics and policy making, *Climatic Change*, 32 (2), 149-161

[114] Demeritt D., 2006. Science Studies, Climate Change, and the Prospects for Constructivist Critique. *Economy and Society,* 35 (3): 453-47

[115] Dahan A., 2008. Climate expertise: between scientific credibility and geopolitical imperative *Interdisciplinary Science Reviews*, vol. 33, nº 1, p. 71-81

[116] Miller C. and P. Edwards, 2001. Changing the atmosphere: expert knowledge and environmental governance. Cambridge, MIT Press

[117] Grundmann R., 2007. Climate Change and Knowledge Politics, *Environmental Politics*, Vol. 16, n°3, 414-432.

[118] Goldman M., 2006. Imperial Nature: The World Bank and Struggles for Social Justice in the Age of Globalization. Yale University Press

[119] Shackley S., Risbey J., Stone P. and Wynne B., 1999. Adjusting to policy expectations in climate change modeling : an interdisciplinary study of flux adjustments in coupled atmosphere-ocean general circulation models,.*MIT joint program on the science and policy of climate change*, report n°48.

2- *Architecture de la gouvernance du Système Terre ; relations entre savoirs et décisions à différentes échelles*

Le fonctionnement et la construction de plusieurs cas paradigmatiques (régime climatique, biodiversité) ont fait l'objet de premiers travaux qui méritent d'être poursuivis et approfondis. Plusieurs séries de questions semblent déterminantes :

- Comment l'intégration des gouvernances globales, régionales, nationales et locales s'opère-t-elle ? Y a-t-il synergies, effets de blocage ou intrications complexes, à élucider ?
- Comment l'efficacité ou les performances des institutions environnementales sont-elles affectées par le fait pour celles-ci d'être insérées (ou parties prenantes) dans des architectures plus vastes ? A ce propos, le concept d'arène a fait l'objet de travaux intéressants[120, 121] qui mériteraient d'être poursuivis.
- Certains changements globaux peuvent susciter des choix conflictuels et des difficultés d'arbitrage, par exemple entre préoccupations liées au climat, à la biodiversité, ou à l'agriculture, et ceci à différentes échelles.

S'il n'existe pas, dans la littérature, de conclusion générale claire quant à l'importance ou au rôle des sciences dans les décisions politiques, des travaux montrent que dans les questions environnementales globales, les positions prises par les Etats dépendent relativement peu de l'expertise[108] et restent souvent dominées par des préoccupations locales ou nationales. L'impact effectif des sciences dépend de facteurs complexes qui diffèrent beaucoup selon les régions et les pays, notamment de la manière dont la connaissance est produite, dont elle est communiquée, et surtout du cadre interprétatif et de l'agenda politique des décideurs. Ainsi, une certaine défiance ou du moins une ambivalence peuvent subsister derrière les apparences d'un assentiment sur le constat scientifique[122]. Partant de l'indétermination de la décision par les savoirs disponibles[123], il serait utile de poursuivre des enquêtes à différentes échelles sur les relations entre projets technoscientifiques et décision, en prenant en compte les critères variés qui président à la confiance et la diversité des enjeux politiques, économiques et sociaux intervenant dans les décisions.

3- *Les "agents" qui tirent la gouvernance internationale du Système Terre, au-delà des Etats - nations :*

Organismes d'expertise (IPCC, IPBES, SBSTA (des deux conventions), ONG[124], agences internationales (e.g. AIE), organismes onusiens (Banque Mondiale, PNUE, etc.)... : pour chaque champ où la gouvernance du Système Terre se déploie (climat, eau, nourriture etc.), une cartographie instruite des acteurs, l'étude de leurs interactions, l'histoire de leurs implications dans le champ et de leurs rôles dans la définition des cadrages, seraient

---

[120] Bonneuil, C., Joly, P.B., Marris, C., 2008. Disentrenching experiment ? The construction of GM-crop field trials as a social problem in France. *Science, Technology and Human Values* 33(2): 201-229.

[121] Dahan A. (dir), 2007. *Les Modèles du futur,* La Découverte, Paris ; Dahan A., Aykut S., Guillemot H., Korczak A., 2009. Les arènes climatiques : forums du futur ou foires aux palabres ? La conférence de Poznan, s.l.: Centre Alexandre Koyré. Research Report February 2009 :http://www.koyre.cnrs.fr/article.php3?id_article=660

[122] Lahsen, M. and Nobre C.A., 2007. Challenges of connecting international science and local level sustainability efforts: the case of the Large-Scale Biosphere–Atmosphere Experiment in Amazonia, *Environmental Science & Policy*, Vol. 10, pp. 62-74

[123] Sarewitz D., 2000. Science and environmental policy : an excess of objectivity. in R. Frodeman (ed.), *Earth matters : the Earth Sciences, Philosophy and the Claims of Community*, pp. 79-98

[124] voir bibliographie dans Dahan et Buffet (à paraître)

fructueuses pour comprendre les constellations d'accords et de désaccords[125]. Il s'agit notamment de prendre en compte les recompositions sociales importantes et rapides auxquelles ces crises et leurs prises en charge donnent lieu au sein des différentes instances de gouvernance. Ainsi, la circulation des scientifiques en position d'expertise et des experts contribuant à la décision politique (notamment dans les pays en développement) est à mettre en relation avec la porosité croissante entre recherche académique en sciences sociales et intervention de ces chercheurs dans l'aide à la décision. De même, il faudrait étudier comment la place croissante des experts dans les ONG informe les débats.

Le concept d'agent qui se répand aujourd'hui[126] va au-delà de celui d'acteur et mérite d'être mieux défini. Est-ce le pouvoir, non seulement d'agir face à la transformation du Système Terre, mais aussi de produire des effets (positifs ou négatifs) dans les systèmes naturels ? Quels seraient alors les principaux agents de cette gouvernance du Système Terre ? Les Etats sont-ils tous des agents de la même façon? Comment évaluer la signification ou le rôle de ces agents dans la gouvernance du Système Terre ?

4- La qualité démocratique de la gouvernance : accountability, diversité des points de vue, controverses

En effet, la gouvernance est désormais indissociable de la question du débat public : Qui peut construire des solutions et selon quelles modalités ? Quels sont les modèles du débat public ? Quelles sont les capacités de transformation des sociétés ? Comment les mettre en mouvement ? Comment interagissent les visions hiérarchiques, la communication publique, les savoirs ? La "compliance" apparaît comme n'étant plus seulement une affaire de juristes; comment un régime de gouvernance peut-il mettre en œuvre des procédures de "compliance" ? On sait depuis M. Foucault et M. Douglas[127], qui argumentent la chose tous deux dans des perspectives différentes, que l'autorité sociale et politique est profondément enracinée dans des systèmes de connaissance. Les deux auteurs laissent ouverte une question cruciale : est-ce que l'autorité épistémique peut être constituée démocratiquement ou bien une telle autorité est-elle inévitablement "illégitime" ?

On assiste à une complexification et à un élargissement des problèmes environnementaux plus qu'à un resserrement autour de quelques paradigmes. Les diagnostics, les enjeux comme les mesures proposées offrent un tableau de plus en plus diversifié. Il s'agit aussi, pour les sciences sociales de déployer cette diversité de points de vue, d'intérêts, de valeurs sur différents sujets. Par exemple, travailler les alliances et antagonismes concernant des solutions proposées comme le CCS, les énergies renouvelables, les biocarburants, les puits de carbone. Plus spécifiquement, alors que l'existence d'expertises scientifiques globales très formalisées et consensuelles tendent à déconflictualiser les discours publics sur ces sujets et laissent peu de place aux controverses, qui apparaissent de fait de moins en moins légitimes[128], l'observation empirique montre que se manifestent néanmoins des oppositions de différents ordres. Il est donc intéressant, scientifiquement mais aussi politiquement, d'étudier ces voix discordantes, en distinguant les sujets de désaccord, leurs évolutions et parfois leurs convergences, et en identifiant les groupes d'acteurs qui les portent, les intérêts et les enjeux (politiques, mais parfois épistémiques).

5- Généalogie du Système Terre et de sa gouvernance

---

[125] voir par exemple le projet de recherche sur « Gouvernance sur le soja durable »
[126] Biermann F. *et al*., 2009. Earth System Governance. People, Places and the Planet. IHDP Report n° 20, Bonn
[127] Douglas, M and Wildavsky A. 1983. Risk and Culture: An Essay on the Selection of Technical and Environmental Dangers. Berkeley, CA: University of California Press
[128] Latour B., 2004. Why Has Critique Run Out of Steam ? From Matters of Fact to Matters of Concern. *Critical Inquiry* Vol 30 n° 2 pp.25-248

Les menaces environnementales auxquelles l'humanité est confrontée présentent un caractère inédit ; en quelques années ont été forgés de nouvelles normes, une nouvelle doxa et sans doute un nouveau « grand récit » englobant le passé, le présent et le devenir de l'humanité et de la Terre. Au-delà des évidences scientifiques, il serait intéressant de mettre en perspective cette construction du Système Terre et du souci environnemental global en étudiant la généalogie de ces préoccupations, comment elles se rattachent à des causes précédentes ou les réinvestissent, et comment le rôle de la science a évolué dans cette nouvelle configuration. On pourrait s'intéresser à la façon dont la perspective climatique - mais pas seulement cette dernière - tend à globaliser[129] des domaines qui relevaient auparavant plutôt du « local » (biodiversité, forêts etc.), à la façon dont les représentations sont ainsi modifiées, et aux institutions et acteurs qui portent ces évolutions.

Sur ces thématiques, quatre dimensions principales devront être croisées : celle du pouvoir, celle de la connaissance, celle des échelles, et enfin celle des normes. Elle pourront l'être à propos de quatre domaines de systèmes globaux principalement : eau, climat, nourriture, économie, mais aussi santé, construite de plus en plus dans une dimension globale.

Axe 4 : Modélisation, scénarii et prospective[130]

I. ETAT DES LIEUX : Recherches passées et en cours

1- La situation de la modélisation sur les changements environnementaux planétaires au niveau international.

Au niveau international, plusieurs types de modèles ont été présentés dans les arènes scientifiques traitant soit du changement climatique, soit des changements environnementaux globaux. Il est possible de donner la liste non exhaustive suivante :

- Modèles sectoriels traitant des choix énergétiques,
- Modèles sectoriels énergétiques couplés à des modules macro-économiques simplifiés (modèles de croissance optimale) ou détaillés,
- Modèles intégrant énergie/économie/climat[131] avec une rétroaction du climat sur l'économie,

[129] Demeritt, D., 2001. The Construction of Global Warming and the Politics of Science, *Annals of the Association of American Geographers*, 91 (2): 307-37

[130] Le paragraphe 1 a été rédigé par P. Matarrasso, les paragraphes introductifs ayant été largement inspirés par les travaux sur le thème modélisation et décision lors du Séminaire « Changements Climatiques, Expertise et Futurs » animé par A. Dahan au Centre A. Koyré (EHESS-CNRS). Les paragraphes suivants sont repris ou inspirés des textes qui ont été écrits pour la définition de la « Chaire de Modélisation pour le Développement Durable » créée par N. Maïzi (Directrice du Centre de Mathématiques Appliquées de l'Ecole Nationale des Mines de Paris) et J.-C. Hourcade (Directeur du Centre International de Recherche sur le Développement et l'Environnement).
Le paragraphe 2 et la partie « perspectives » ont été rédigés par P.-Y. Longaretti et P. Criqui (Directeur du LEPII). Le LEPII est intégré dans le dispositif de recherche consacré à l'énergie (TENERDIS) qui associe des équipes du CNRS, du CEA et des Universités.
Au potentiel précédent, il faut ajouter l'équipe plus récemment créée par le CEA « ITESÉE » et les capacités de prospective réunies par la Direction Stratégique d'EDF (D. Bouttes, R. Crassous) et aux Etudes et Recherches d'EDF (B. Rogeau, P. Pourouchottamin). Plusieurs «Think Tanks » consacrés à l'énergie doivent également être mentionnés : le Club Liaison Industrie Prospective (CLIP, Présidé P. Radanne, IDDRI), le think tank IDEE lié à la fondation Tuck et à l'IFP (Al. Rojey). Le C3ED et le GIS climat interviennent aussi sur les thèmes relatifs aux choix énergétiques. La nouvelle chaire OSD (Optimisation and Sustainable Development) initiée à l'Ecole Polytechnique avec le soutien de Microsoft vient renforcer les potentiels précédents. Enfin, ces derniers mois, la création de l'ANCRE (Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie) a également relancé un processus de réflexion sur la prospective énergétique et globale

[131] Dahan A., 2007 (ed.). Les modèles du futur. Changement climatique et scénarios économiques : enjeux scientifiques et politiques. La Découverte, Paris

- Modèles sectoriels énergétiques et de « l'économie matérielle », couplés avec une représentation, simplifiée du climat et des bénéfices ou dommages potentiels résultants des changements environnementaux,
- Modèles « intégrés » censés représenter l'ensemble des activités humaines, les choix d'usage des terres (land use), les variations du climat et leur influence sur les activités agricoles, les migrations, etc.

La construction de ces modèles pose un certain nombre de problèmes théoriques et pratiques qu'il n'est pas inutile d'examiner avant de décliner les potentiels de la recherche Française dans ce domaine.

L'évolution du système planétaire est sous la dépendance des décisions humaines relatives à l'économie globale et à la gestion de l'ensemble des sous- systèmes dont cette économie globale est la résultante. Lorsque l'on parle de « décision », on entend usuellement les décisions mais aussi les différentes formes de « comportements ». Ceci concerne aussi bien les décisions et comportements qui s'appliquent aux flux financiers ou matériels (choix de consommation, niveaux des dépenses des ménages, de l'État, etc.) que les décisions qui sont relatives à l'investissement nécessaire à la production. Lorsque l'on parle de « décision », on englobe en général une totalisation d'actions qui s'étendent depuis des actions plus ou moins planifiées et volontaires jusqu'à des comportements de réaction parfois non concertés voire inconscients qui résultent de l'ensemble des conditions qui prévalent à ce moment (ensemble des prix mondiaux et locaux, politiques publiques et taxations, situation météorologique et climatique, etc.)

Les modèles qui incorporent l'action humaine sont donc par nature « multivoques » c'est à dire qu'il sont susceptibles d'une pluralité d'évolutions liées soit aux aléas propres à la nature des choses et aux différentes incertitudes (aléas du climat, « découvertes » scientifiques imprévisibles, etc.), soit aux décisions et actions humaines à tous les niveaux qui peuvent prendre plusieurs cours à chaque instant. En conséquence, un certain nombre de modèles sont utilisés pour éclairer les décisions de politiques publiques.

Les modèles peuvent être séparés selon deux pôles conceptuels :

- Le pôle des modèles de « prévision » ou simulation séquentielle dans le temps. L'éventail des futurs possibles est pris en compte via différentes hypothèses de comportement économiques ou de choix politiques
- Le pôle des modèles « d'optimisation » des trajectoires temporelles entre des points de départ et d'arrivée prédéfinis. Différentes trajectoires résultent des différents types de contraintes fixées au cours de l'optimisation.

Dans les deux cas, il s'agit, par des méthodes différentes, d'éclairer les choix en fonction des objectifs fixés et des contraintes du problème étudié (externes ou auto-imposées). Par exemple, quelle niveau de taxation va permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'une quantité donnée à un horizon temporel donné, dans un contexte environnemental et socio-économique général donné ? De plus, les modèles distinguent souvent mal ce qui est méthodologique (les méthodes numériques de résolution), ce qui est formel (le modèle mathématique) et ce qui est ontologique (la nature du réel).

La tradition des modèles dynamiques numériques en macro-économie, qui s'est souvent incarnée dans un certain nombre de modèles de simulation, s'est principalement développée au travers de modèles exprimés en temps continu et sous forme de systèmes

d'équations différentielles. Ces modèles ne pouvant en général pas être résolus par des méthodes analytiques ont dû faire appel à la simulation numérique séquentielle[132].

Historiquement, les modèles d'optimisation reposent sur une représentation du réel en processus discrets (analyse d'activités[133]) associée dans le cas des analyses dynamiques à des équations d'évolution exprimées par des schémas aux différences finies. La résolution s'effectuant par les méthodes de la programmation mathématique, méthodes dérivant en recherche opérationnelle, d'une extension de la programmation linéaire[134].

A. La question de l'équilibre macro-économique: comment articuler équilibre et dynamique

Les modèles traditionnels d'équilibre général calculable[135], tels que les décrits leur initiateur H. E. Scarf, sont des modèles exprimés en analyse d'activités au niveau de la production et dont la consommation s'exprime en général par des fonctions de demande non linéaires dont le système de prix est l'argument. La résolution par l'algorithme de Scarf ou d'autres méthodes va donc déterminer simultanément les niveaux des différentes activités de production et un système de prix qui obéit à un ensemble de contraintes (que les activités ne soient pas déficitaires, que les budgets des consommateurs soient équilibrés, etc..). Ces modèles ont fait flores pour l'analyse des politiques publiques sous la forme des exercices de statiques comparatives par lesquels on cherche à comprendre comment se déforme l'équilibre sous l'influence de divers instruments économiques (taxes, quotas). La question fondamentale qui continue à se poser est l'articulation de deux phénomènes économiques qui agissent concurremment mais sont tout de même contradictoires au moins dans les termes qui les désignent: l'équilibre économique d'une part, la dynamique économique de l'autre. Les sciences plus anciennes, plus formalisées et plus exactes comme la physique ont eu à résoudre également cette question. Le cas de l'économie est naturellement plus ardu dans la mesure où il existe des agents humains qui prennent des décisions ou agissent de manière plus ou moins consciente, plus ou moins mimétique, plus ou moins rationnelle, ce qui transforme de manière irrégulière la dynamique[136].

Une autre difficulté considérable résulte de l'hétérogénéité des processus de développement. Ainsi, l'intégration de circonstances institutionnelles nouvelles, les circonstances du monde boursier et financier, les découvertes technologiques, les évolutions démographiques, les guerres, etc. se combinent pour rendre difficile une approche théorique de la conjonction « dynamique » « équilibre ».

B. Grandes tendances et objets des modélisations énergétiques en lien avec les évolutions macro-économiques ; modélisation et décision

---

[132] Sur la question de l'histoire de la modélisation, voir « Les Modèles du Futur » sous la Direction de A. Dahan, (ed), La Découverte , Paris, 2008

[133] Sur les fondements théoriques et historiques de la modélisation en analyse d'activités, voir Koopmans T., 1953. Activity analysis and its application, *American economic review*, 43 (2) CFP 75c, 1951, John Wiley. Téléchargeable sur http://cowles.econ.yale.edu/P/cm/cfmmain.htm

[134] Cette tradition provient des travaux initiaux de Von Neumann, Dantzig and Koopmans sur l'analyse d'activités et la programmation linéaire (voir la monographie n° 13 de la Cowles Foundation)

[135] Sur les modèles d'équilibre général calculable, voir Debreu G.: Existence of equilibrium for a competitive economy, 1954, *Econometrica*, 22, 82-109; Scarf, H.: The computation of economic equilibria, 1973, Yale University Press. Téléchargeable sur http://cowles.econ.yale.edu/P/cm/cfmmain.htm;
Mitra-Kahn, B.H. : Debunking the Myths of Computable General Equilibrium Models », 2008, SCEPA Working Paper

[136] Pour un aperçu détaillé des différentes techniques de modélisation, la meilleure source demeure le « *New Palgrave Dictionary of Economics* », où l'ensemble des modèles et théories économiques anciennes, modernes ou contemporaines est analysé par les meilleures économistes de notre temps. Désormais en ligne, le New Palgrave peut être considéré comme une bibliographie de tout le chapitre modélisation : http://www.dictionaryofeconomics.com/dictionary

La complexité de la décision autour du thème de l'énergie, en particulier pour optimiser ou choisir les solutions techniques et économiques les plus adaptées permettant de répondre au défi climatique et aux variations des prix de l'énergie, a rendu nécessaire la conception d'instruments de modélisation permettant de favoriser le dialogue entre les différents acteurs: ingénieurs, institutionnels, industriels. A l'étranger, comme en France, un certain nombre de modèles ont ainsi été proposés.
Ils ont pour objet de simuler l'impact des évolutions de prix des énergies et des décisions politiques relatives aux émissions de gaz à effet de serre de l'industrie, de la production d'énergie électrique et de l'ensemble des secteurs de la société française. Ils permettent également d'extrapoler ces résultats au niveau international pour évaluer la faisabilité des engagements environnementaux futurs de chaque pays (Post Kyoto).

Ce que l'on peut considérer comme les fonctions essentielles de ces modèles sont:

- De proposer une vision stratégique de l'avenir énergétique, enjeu économique considérable, constituant un risque politique majeur qu'il est nécessaire d'éclairer par un regard sur les impacts environnementaux,
- De préparer les futures décisions stratégiques des industries en intégrant les enjeux environnementaux et ceci par des objectifs d'éco-conceptions définis très en amont,
- D'évaluer la part relative des offres « décarbonées » d'énergie (renouvelable, nucléaire, etc.) et la mise en œuvre systématique d'une production des biens et services finaux la plus efficace possible,
- D'intégrer progressivement des futures évolutions macro-économiques mondiales, régionales, nationales, locales, qui se dérouleront sous la triple contrainte du développement économique mondial (avec son contexte de population croissante et ses disparités démographiques) des pénuries à venir de terres, d'eau, de matériaux fossiles,et enfin, des nécessités de préservation de l'environnement planétaire comme des milieux locaux.

C. Recherche en modélisation et dispositif de formation en France[137]

Le développement d'outils de modélisation et d'aide à la décision aux interfaces économie – ressources – climat, sont en France fondés sur l'articulation entre des modèles technico-économiques (e.g. MARKAL/TIMES[138] développé au CMA, ou dans une autre logique, POLES[139] au LEPII/ENERDATA), des modèles décrivant les interdépendances économiques sur la moyenne et longue durée (e.g. Imaclim-R, CIRED) et des formes réduites de modèles du Système Terre (e.g. Mini-Ker ou Oscar, CIRED).

La recherche sur ces modèles est associée à un dispositif de formation de haut niveau dédié à la prospective et à ses outils numériques. Ce dispositif est appuyé sur des formations existantes dans les Ecoles de ParisTech : le Mastère spécialisé OSE (Optimisation des Systèmes Énergétiques au CMA) et le Master EDDEE (Économie du Développement Durable, de l'Environnement et de l'Énergie). Cette association de modèles et de formations est destinée à fournir une formation complète sur les outils de la modélisation prospective, leur utilisation pour le calcul économique et la gestion stratégique des questions énergétiques. Ils participent également de l'analyse historique et institutionnelle des grands dossiers du développement. Ces initiatives visent à combler le déficit actuel d'ingénieurs, gestionnaires et chercheurs aptes à développer et mobiliser des outils de modélisation dans un contexte interdisciplinaire. Il s'agit d'allier une technicité de haut niveau, une forte capacité de problématisation et une connaissance des processus

[137] Les objectifs de la plateforme « Modélisation » (CIRED LEPII), de la Chaire « Modélisation pour le Développement Durable » (CIRED-CMA et de ITESEE-CEA)
[138] http://www.etsap.org/documentation.asp
[139] http://webu2.upmf-grenoble.fr/iepe/Recherche/Rech5.html#recherche

réels de délibération autour des tensions entre la courte, moyenne et longue durée.

Les équipes de la Chaire « Modélisation pour le Développement Durable » abordent ces enjeux scientifiques de façon complémentaire en liant leurs compétences en mathématiques appliquées et en sciences économiques et de gestion et en partant d'un diagnostic partagé sur :

- L'importance d'un dialogue entre économistes et ingénieurs, point critique de toute prospective efficace qui devra intégrer les sciences de la nature,
- L'utilité de modèles « hybrides » pour dépasser les limites actuelles du dialogue parfois conflictuel entre la prospective technologique ascendante (bottom-up) et la prospective économique descendante (top down), et endogénéiser les liens entre l'économie et le changement technique,
- L'imbrication des dossiers énergie – climat et quatre enjeux clés du développement durable: la compétition entre les usages agricoles, forestiers et énergétiques des sols ; les dynamiques urbaines et les transports ; les tensions sur l'eau et les ressources primaires ; la dimension spatiale des politiques d'investissement industriel,
- La nécessité d'une représentation plus réaliste des comportements des entreprises et des consommateurs dans des systèmes institutionnels donnés.

L'ambitieux effort de regroupement précédent vise à l'émergence en France d'un Centre de Ressources sur la modélisation prospective appliquée aux enjeux de développement durable. A terme, on espère que l'initiative en cours, interne au CNRS, d'un « grand instrument » de prospective et de modélisation porté par le CIRED et le LEPII (justifié par une interopérabilité et une complémentarité des modèles POLES et IMACLIM[140]) rejoindra les problématiques développées au sein de la Chaire « Modélisation pour le Développement Durable ». Un lien est également en cours d'établissement avec la nouvelle Chaire OSD (Optimisation for Sustainable Development)-Polytechnique, Microsoft et les enseignements sur l'énergie à l'ENPC.

D. Les réseaux autour de la modélisation des changements environnementaux globaux

La modélisation autour du thème de l'interaction énergie-économie, du « nexus développement durable croissance verte » ne saurait se concevoir sans des liens étroits avec d'autres équipes de recherche, d'enseignement ou possédant des objectifs plus fonctionnels d'aide à la décision au niveau européen, national, régional. Un certain nombre de regroupements sont intéressés par la collaboration avec les équipes de modélisation, parmi lesquels :

- En France : Le Réseau R2DS, le Programme de la FONDDRI, la fondation Tuck, l'INRIA, etc.
- En Europe : Le réseau Climate Strategy, le Potsdam Institute for Climate Impact Research, l'Université de Cambridge et la Fondazione Eni Enrico Mattei, les projets européens NEEDS 7, RES2020, etc.
- A l'échelle internationale : l'AIE, le MIT, l'Energy Modeling Forum, les Universités de Maryland et Stanford, le consortium formé de partenaires au Brésil, en Chine, l'IIASA, le réseau francophone MONDER, l'ETSAP etc.

Actuellement, des coordinations et confrontations entre modèles se réalisent au sein de l'Energy Modelling Forum organisé par Stanford et en général associé au congrès annuel ETSAP et à la Fondation Enrico Matteï. De nombreux contacts se sont également formés dans le cadre du Groupe 3 du GIEC.

[140] http://www.imaclim.centre-cired.fr

2- *Modèles climatiques et économiques : articulations, forces et faiblesses*

Dans cette section, deux types de modèles sont examinés plus en détail : les modèles climatiques et les modèles économie/énergie. Les modèles globaux intégrés environnement/économie/énergie sont également pertinents, mais ne sont pas représentés en France. Quelques références bibliographiques sont néanmoins données à ce sujet[141].

A. Modèles climatiques[142]

Les deux derniers rapports du GIEC (2001 et 2007) donnent une vision très détaillée de l'état de l'art sur la construction, l'évaluation, la comparaison, les résultats et les zones d'incertitude des modèles climatiques. Seuls quelques éléments concernant ces modèles sont rappelés ici.

Le climat résulte de l'état moyen de l'atmosphère terrestre, conditionné par sa structure et sa composition et par la façon dont son équilibre énergétique s'établit sous l'effet du flux solaire et des échanges avec les autres composants du Système Terre : les océans, les calottes de glace, et la surface terrestre. Les outils et concepts de la climatologie sont pratiquement les mêmes que ceux de la météorologie, mais contrairement à cette dernière, la climatologie s'intéresse à un état de l'atmosphère moyenné sur des échelles de temps plus grandes que l'année. En conséquence, elle est beaucoup plus sensible aux conditions aux limites (flux solaire et échanges aux interfaces) qu'aux conditions initiales, et son « horizon de prédictabilité » temporelle est considérablement plus grand.

Les modèles climatiques se sont progressivement complexifiés entre les années 70 et les années 90, en couplant un modèle de dynamique et de transfert radiatif de l'atmosphère à des modèles de la surface terrestre et de circulation océanique. Les océans en particulier sont des réservoirs de chaleur et de gaz (notamment les GES) plus importants et d'une beaucoup plus grande inertie que l'atmosphère. De ce fait, ils jouent un rôle essentiel sur le climat et son évolution. La composition de l'atmosphère, notamment sa teneur en vapeur d'eau, en aérosols et en gaz à effet de serre, contrôle son bilan radiatif global et donc le climat. En conséquence, les cycles naturels et artificiels de ses composés ont progressivement été incorporés dans les modèles depuis les années 90. Cette tendance s'est poursuivie avec la prise en compte croissante des mécanismes de chimie atmosphérique et de dynamique de la couverture végétale terrestre depuis les années 2000. Les gains exponentiels en puissance des centres de calcul ont rendu possible cette complexification continue et ont permis, dans le même temps, un accroissement important de la résolution spatiale des modèles. Néanmoins, la dynamique d'échelles à prendre en compte est considérable et tous les phénomènes ne peuvent être calculés aux différentes échelles (plus de 10 ordres de grandeur entre l'échelle globale de la planète et les plus petites échelles pertinentes du problème). Les phénomènes non calculés sont paramétrisés, tâche rendue difficile par la compréhension encore limitée de certains des processus concernés. Ces deux facteurs constituent la principale source d'incertitudes et de différences (en fonction des choix de paramétrisation) des modèles climatiques. Notamment, les principaux effets physiques contrôlant la dynamique des nuages (en particulier le rôle des

[141] La littérature sur les types de modèle brièvement évoqués dans cette partie est pléthorique. Seules quelques références introductives sont données dans le texte

[142] Sur les modèles climatiques : Donner L.J. and Large W.G., 2008. Climate Modeling, *Annual Reviews of Environment and Resources*, 33, 1-17; Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., M. Marquis, Averyt K.B., Tignor M. and H.L. Miller H.L. (eds.), 2007.Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change», Cambridge University Press.
Téléchargeable sur http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html

aérosols) sont mal connus et se situent à des échelles non résolues. Ils constituent la première source d'incertitude dans le calcul du forçage radiatif de l'atmosphère. De même, la topographie aux échelles non résolues (tant terrestre que marine) peut avoir un effet important sur les flux atmosphériques et océaniques. Réciproquement, les échelles non modélisées seraient souvent essentielles pour la prise en compte des impacts économiques et sociétaux du changement climatique, et cette limitation constitue un des points importants d'incertitude à l'interface entre les modèles physiques et les modèles socio-économiques. Finalement, les modèles climatiques ne rendent que peu ou pas compte des possibilités de changements « abrupts » de régime climatique; notamment les conditions de libération massive du méthane piégé dans le pergélisol des zones polaires ou dans les sédiments océaniques sont mal comprises et ses effets potentiels sur le réchauffement climatique peu pris en compte.

D'une façon générale, les informations entre les modèles climatiques et les modèles économiques circulent souvent « à sens unique » : les scénarii d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre sont une entrée des modèles climatiques, et les impacts du changement climatique associés à ces émissions sont des contraintes des modèles économie/énergie. Les modèles intégrés globaux environnement/économie/énergie[143] (comme par exemple, en Europe, les modèles IMAGE ou IMAGE-TIMER, même si la dynamique macro-économique est exogène) visent à prendre en compte une rétroaction entre activités humaines et climat, mais souvent, le module « climat » de ces modèles intégrés est beaucoup plus simple que l'état de l'art en modélisation du climat.

Il existe un peu plus d'une vingtaine de modèles du climat dans le monde, dont deux en France (l'un développé par l'institut Pierre-Simon Laplace, et l'autre par Météo France). Par ailleurs, des modèles simplifiés, calés sur les modèles complets et émulant leur comportement ont été développés (notamment, le modèle MAGICC — Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change). Ces modèles sont destinés à explorer plus facilement les impacts du changement climatique (tels que l'augmentation des températures et du niveau des mers) dans les différents scénarios d'émission, et sont de ce fait utilisés par le GIEC, mais aussi dans le cadre de la modélisation économie/énergie.

B. Modèles économie/énergie

Contrairement aux différents modèles climatiques dont les bases physiques et le cadre de modélisation sont communs, il existe divers types de modèles économiques permettant de faire de la prospective énergétique et d'étudier les interactions entre économie et environnement, notamment via le calcul de « trajectoires d'émissions » d'un côté, et la prise en compte des impacts du changement climatique de l'autre.

Un premier axe de lecture consiste à séparer les modèles de projection/simulation et les modèles d'optimisation, notamment d'optimisation inter-temporelle. Un second axe de lecture distingue les modèles globaux (ou « top-down ») des modèles sectoriels, le secteur considéré étant ici l'énergie (ou « bottom-up »). Cette seconde catégorie de modèles est quelquefois qualifiée de modèles « d'ingénieur », mais cette dénomination masque le fait

[143] Sur les grands modèles intégrés Economie/Energie/Environnement : La parution du rapport du Club de Rome dans les années 1970, fondé sur le modèle WORLD3, a lancé un débat qui se poursuit de nos jours. La dernière version de ce modèle est présentée et discutée dans Meadows D. and Randers J. : Limits to growth, the 30-year update, 2004. Chelsea Green Publishing Company
Ce modèle a donné naissance à divers autres modèles intégrés beaucoup plus complexes et désagrégés, dont le modèle IMAGE en Europe : http://www.pbl.nl/en/themasites/image/index.html
WORLD3 a été très critiqué pour son manque de réalisme économique par les théoriciens de l'économie qui, réciproquement, semblent sous-estimer les contraintes environnementales liées aux flux linéaires dans l'économie soulignées dans « Limits to growth ». Sur la critique d'ordre économique, voir par exemple les travaux de Nordhaus W.D., concepteur du modèle DICE : http://nordhaus.econ.yale.edu

que les prix d'équilibre du marché de l'énergie sont la variable dynamique centrale de ces modèles, et non, par exemple, les flux physiques d'énergie entre les différentes filières énergétiques, même si ces flux sont bien sûr représentés dans tous les modèles. La figure ci-dessous illustre ces deux axes de lecture et mentionne dans chaque catégorie quelques modèles développés ou utilisés en France et en Europe.

En France, les modèles IMACLIM (développé au CIRED) et POLES (développé au LEPII et à ENERDATA) sont orientés vers l'analyse des politiques climatiques.

	Modèles de projection	Modèles d'équilibre par les prix ou d'optimisation
Modèles économiques. d'ensemble	HERMES NEMESIS …	IMACLIM GEM-E3[144] GEMINI
Modèles sectoriels (énergie, agriculture, etc.)	POLES PRIMES …	MARKAL TIMES EFOM

Modèles d'ensemble

Les modèles d'ensemble ou « top-down » partent d'un équilibre macro-économique où les facteurs de production sont progressivement désagrégés en capital, travail, énergie, matériaux. Energie et matériaux sont ensuite progressivement séparés en différentes sources et secteurs, de façon plus ou moins détaillée. Travail, énergie et matériaux sont considérés comme largement substituables. Les demandes intermédiaires (du secteur de production) et finales (des consommateurs) sont elles aussi désagrégées par étape entre les différents types de biens et services.

A l'intérieur de cette catégorie de modèles, on peut distinguer des modèles de prévisions de moyen ou long terme (2030 à 2050, les échelles de temps des modèles climatiques et économiques ne sont généralement pas les mêmes), où les flux ne sont pas issus d'un calcul d'équilibre mais sont fortement calibrés sur des données économétriques passées, et des modèles décrivant les différents marchés de biens ou services de type équilibre général calculable, dont le contenu théorique est plus fort et la calibration économétrique plus faible, et où les échanges intersectoriels sont décrits par des matrices de type entrée-sortie ou matrices de comptabilité sociale. De tous les types de modèles décrits ici, ces derniers sont les plus représentés au niveau international.

La dynamique macro-économique de croissance économique est le plus souvent calculée de façon interne au modèle, mais de manière très simplifiée par prise en compte des flux d'investissement. Cependant des éléments de croissance endogène avec croissance du stock de connaissances ou de prise en compte du progrès technique sont progressivement introduits. Les politiques publiques sont prescrites de façon externe, puisque ce sont précisément ces politiques qu'il s'agit d'évaluer.

La dynamique inter-temporelle se développe sous contraintes internes (contrainte budgétaire des ménages, par exemple) et externes (trajectoires économiques répondant à un profil d'émission, par exemple), le choix de ce dernier type de contraintes donnant alors

[144] http://www.gem-e3.net/themodel.htm

un caractère normatif à cette catégorie de modèles. Ces modèles d'équilibre général donnent à tous les niveaux de désagrégation, la production, les prix, l'emploi, en prenant en compte les équilibres épargne-investissement et, lorsqu'il s'agit de modèles régionaux (par exemple, limités à l'Europe), le commerce extérieur est généralement pris en compte de façon assez agrégée.

Modèles sectoriels

Ces modèles sont considérablement plus détaillés que les précédents en ce qui concerne les secteurs de consommation et les différentes filières et technologies représentées entre les demandes finales d'énergie et les sources primaires telles que combustibles fossiles, nucléaire et sources d'énergie renouvelables. La désagrégation spatiale est en général également plus grande, parce que fondée sur la description de systèmes énergétiques nationaux, de même que par contrecoup la représentation des importations et exportations sur le secteur de l'énergie. En contrepartie, les données macro-économiques globales, notamment les trajectoires de croissance, sont en général définies de façon externe au modèle.

Lorsqu'il s'agit de modèles de simulation, ils calculent de façon interne l'équilibre partiel offre-demande sur les différents marchés de l'énergie au cours du temps, la demande étant déterminée par le scénario de croissance choisi, et l'offre étant liée aux capacités de production. Si, de plus, une contrainte de trajectoire d'émission est fixée, ces modèles fournissent une évaluation des coûts sectoriels de réduction des émissions de carbone impliquées par une politique donnée de lutte contre le changement climatique.

Les modèles sectoriels d'optimisation tels que MARKAL décrivent l'ensemble des chaînes énergétiques mises en œuvre et recherchent la combinaison de ces chaînes permettant de minimiser – en général de manière inter-temporelle – le coût global de la satisfaction des besoins en énergie. L'optimisation inter-temporelle se fait de plus sous contrainte, soit de l'utilisation de certaines ressources, soit le plus souvent de la limitation de certains impacts environnementaux, locaux ou globaux. Ces modèles présentent en résultat l'état d'un système idéal, compte tenu des technologies anticipées, de leurs coûts et de leurs performances.

Modèles hybrides

Parmi les tendances récentes en matière de modélisation économique des changements globaux, on doit noter le développement de modèles hybrides, qui à la suite du modèle MERGE (fusion d'un modèle d'optimisation énergétique et d'un modèle d'équilibre général simplifié) conduisent à introduire plus de détails technologiques sur l'énergie, dans une structure de modèle économique d'ensemble. Certaines recherches conduisent aussi à des usages combinés en « soft link » (par opposition au « hard link ») de modèles énergétiques et de modèles économiques. Elles procèdent du même esprit et, si elles sont moins satisfaisantes dans leur principe, elles permettent dans la pratique de conserver la richesse de description des deux familles.

C. Articulation entre modèles économiques et modèles climatiques

A travers la description des modèles climatiques et économiques/énergétiques, on peut concevoir trois grands types d'interactions entre les deux types de modèles :

- Les modèles économiques (équilibre des marchés et croissance globale) définissent les évolutions de la demande en énergie et en ressources, qui à leur tour impactent les grandes variables physiques. Ces données sont utilisées en entrée des modèles

climatiques, mais il n'y a pas de rétroaction du changement climatique sur la prévision économique.

- Dans un second niveau d'approche, on incorpore dans les modèles économiques des contraintes d'émission. Des analyses de type coût-efficacité permettent alors de comparer les coûts des réductions des émissions par rapport à un scénario de référence sans politique, ou sans politique nouvelle. Finalement, des analyses de type coût-bénéfice fournissent une comparaison des coûts de réductions et des estimations de coûts évités des dommages liés aux impacts du changement climatique.

- Les modèles intégrés économie/environnement permettent de prendre en compte directement au cours de la simulation une rétroaction des dommages dus au changement climatique sur le comportement de l'économie, mais ce gain en intégration se fait aujourd'hui au détriment d'une perte en finesse de description.

Une articulation intégrée efficace entre modèles climatiques et économiques suppose probablement la mise au point de modèles simplifiés des deux types, calibrés sur le comportement des grands modèles et permettant d'explorer une grande variété de scénarii. Mais il y a là une contradiction non résolue et qui explique sans doute en grande partie la lenteur des progrès dans ce domaine. Elle tient au fait que la plupart des impacts des changements globaux sur l'économie ne peuvent être pris en compte qu'à partir d'une analyse à l'échelle régionale ou infra-régionale tant pour le climat que pour l'économie.

II. PERSPECTIVES : Quelques pistes pour des recherches futures

1- Points forts et limites des différents modèles économiques

En général, les évaluations de coûts des politiques environnementales s'avèrent sensiblement plus élevés dans les modèles d'équilibre sectoriel de simulation/projection que dans ceux d'optimisation. Cet écart est lié aux différences de méthodologies adoptées dans les deux types de modèles, et à leurs points forts et points faibles respectifs.

Dans la pratique, il peut s'avérer très difficile d'analyser le contenu formel des différents modèles, non seulement parce que leurs éléments constitutifs ne sont en général pas publiés, mais également parce qu'une distinction insuffisante est faite entre leur contenu formel d'un côté, et les méthodes de résolution mathématiques et numériques employées de l'autre. Par ailleurs, une partie de la différence entre les objets et possibilités des différentes approches résulte des différentes visions du monde des modélisateurs, qui les amènent à choisir l'un ou l'autre type de modèles. Ces a priori sont autant une source de richesse dans l'échange que de confusion dans l'évaluation des avantages et inconvénients réels de chaque type d'approches. Néanmoins, quelques remarques d'ordre général peuvent être formulées.

L'avantage le plus significatif des modèles d'optimisation par rapport aux modèles de simulation est leur capacité à atteindre un état futur prédéfini en suivant une trajectoire temporelle optimale par rapport à des critères choisis par l'utilisateur. Mais cette performance s'obtient au prix de diverses simplifications. En particulier, l'arbitraire relatif dans le choix du taux d'actualisation conduit à une très grande variété d'estimations des coûts de mitigation et d'adaptation face au changement climatique. De plus, l'évolution dans les modèles d'optimisation se traduit par une suite d'états d'équilibres, ce qui les rend difficile la prise en compte des effets retard et des boucles de rétroactions qui sont à la source des instabilités systémiques de l'économie, et, dans les cas où des contraintes environnementales sont prises en compte dans les modèles, les nombreux délais entre causes et conséquences observés dans les systèmes naturels sont difficiles à représenter. Par ailleurs, dans la pratique, l'implémentation d'environnements d'optimisation (e.g. GAMS) exige une linéarité

d'un certain nombre de relations constitutives essentielles de ces modèles. Une partie de ces défauts peut être corrigée par l'adoption de contraintes adaptées dans le processus d'optimisation, dont le choix, la forme et la pertinence dépendent largement du savoir-faire du modélisateur[145].

Réciproquement, les modèles de simulation permettent plus facilement d'incorporer non-linéarités, délais et boucles de rétroaction, hystérésis, etc. Il est également plus facile en principe de les coupler avec des modèles du climat ou à d'autres questions liées à la gestion de l'environnement telles que l'usage des sols et des ressources en eau. Dans la pratique, ces possibilités sont partiellement obérées par la calibration des comportements économiques dynamiques sur des données économétriques historiques, dont la pertinence dans le contexte présent et futur de tension sur les ressources, de dégradation de l'environnement et de la mise en œuvre possible de politiques fortement contraignantes est difficile à apprécier. De façon générale, comme pour les modèles d'optimisation, les phénomènes économiques dynamiques sont nettement moins bien formalisés que les phénomènes d'équilibre.

Certaines difficultés sont communes à tous les types de modèles. Par exemple, l'évaluation intrinsèque des dommages liés au changement climatique est limitée par la connaissance partielle dont on dispose, notamment en ce qui concerne les effets de seuil. Une question particulièrement ardue reste celle des comportements dans les deux catégories de modèles. Dans les modèles d'optimisation inter-temporelle ce qui défini les choix d'investissement est un comportement économique simplifié représenté par le critère d'optimisation qui est dépendant du taux d'actualisation. A cela s'ajoute l'hypothèse d'une « clairvoyance parfaite ». Les modèles de simulation sont au contraire myopes et le modélisateur doit spécifier pour chaque période des règles de choix des technologies et d'investissements qui ne peuvent prendre en compte les anticipations des agents économiques (évaluations du progrès technique, impact des changements environnementaux, limites en ressources fossiles, état global de l'économie internationale, cours des monnaies etc.)[146, 147,148].

Plus généralement les deux types de modèles se heurtent à la difficulté de représenter les hétérogénéités éventuelles entre les critères de choix des différents agents. Le caractère éminemment conjoncturel et variable de ces comportements souligne le fait que les modèles ne peuvent pas prétendre à épuiser la réalité mais simplement à présenter des « arguments mis en formes ». Ces limitations militent pour un développement de maquettes et de petits modèles conceptuels permettant de mieux maîtriser les dynamiques couplées de l'économie, du climat et de la technologie.

Les deux types de modèles souffrent également de limitations fréquemment soulignées par d'autres disciplines en Sciences Sociales dans la représentation du comportement des différents acteurs. Ils ne permettent pas non plus de prendre en compte des changements abrupts de « régime économique » résultant de modifications profondes des institutions. Par ailleurs, sauf dans le cas des modèles intégrés environnement/économie, il n'existe pas de modèle associant démographie et croissance économique (à l'exception du modèle « Ingenue » de M. Aglietta). Dans le même ordre

[145] On pourra se reporter au modèle Markal-dommages réalisé par Loulou, Kanudia et Labriet ainsi que sur son traitement en termes de mitigation coopérative

[146] Manne A.S. and Rutherford T.F., 1994. International Trade in Oil, Gas and Carbon Emission Rights: An Intertemporal General Equilibrium Model. *The Energy Journal, International Association for Energy Economics*, vol. 15(1), pages 57-76

[147] Böhringer C. and Rutherford, T. F., 2009. Integrated assessment of energy policies: Decomposing top-down and bottom-up," *Journal of Economic Dynamics and Control*, Elsevier, vol. 33(9), pages 1648-1661, September

[148] Bohringer C. and Rutherford, T. F., 2008. Combining bottom-up and top-down. *Energy Economics*, Elsevier, vol. 30(2), pages 574-596, March

d'idée, il serait important de disposer de modèles sectoriels mondiaux détaillés et couplés entre énergie, agriculture, usage de l'eau et des sols. Ce besoin se conjugue avec un manque de bases de données historiques (et de complétude des bases existantes, telle que la base GTAP).

2- Autres directions possibles de développements futurs

Les principes généraux de ce qui peut constituer une transition vers la durabilité du développement humain sont assez bien identifiés, que ce soit dans les versions dites « fortes » ou « faibles » de la substituabilité entre ressources naturelles et artificielles. Par contre, l'application pratique de ces principes va se décliner à toutes les échelles géographiques et de gouvernance, des grands blocs continentaux aux échelles locales. Dans les faits, les déclinaisons locales vont dépendre des atouts et limites à toutes ces échelles. Par exemple, si la contrainte énergétique globale ou la politique énergétique européenne amène à l'horizon des quelques prochaines décennies une relocalisation partielle des échanges économiques, les marges de manœuvre et les implications à l'échelon des régions européennes apparaissent actuellement sous explorées.

Ces échelles sont au mieux très mal prises en compte dans les modèles économiques et climatiques : un effort spécifique de modélisation semble nécessaire, en coordination avec l'important effort de modélisation à l'échelon européen déjà en cours. Par exemple, la mise en œuvre par un nombre croissant d'agglomérations de plans climats territoriaux devrait se traduire dans un futur très proche par l'émergence de nouveaux types de modèles, permettant en particulier d'étudier la dimension économique des stratégies d'adaptation et de mitigation à ces échelles géographiques.

DEUXIEME PARTIE : LA PROSPECTIVE

Quelles priorités de recherches sur les Changements Environnementaux Planétaires ?

Les changements environnementaux planétaires (CEP) recouvrent les problématiques à grande échelle dépassant un territoire ou une région. Vers une meilleure co-gestion de l'environnement et du développement (adaptation et atténuation) impose d'appréhender scientifiquement les interactions d'échelles du local au global et du global au local. Cette prospective est destinée à faire émerger en France les sciences intégrées du Système Terre, et contribuer en particulier aux actions internationales ESSP[149] et IHDP[150] de l'ICSU. Elle nécessite de renforcer tant les disciplines que ces domaines, notamment les Sciences Humaines et Sociales, que l'interdisciplinarité vers une requalification des questionnements scientifiques.

Pour l'ensemble des questions identifiées ci-après, l'environnement désigne l'ensemble biosphère-hydrosphère-atmosphère-géosphère. Il inclut explicitement les relations entre les sociétés humaines et leurs diversités géographiques, économiques, éthiques et culturelles.

Question 1 : Quelles sont les trajectoires démographiques, économiques, techniques, et sociales, à faible impact environnemental, qui permettent d'assurer les besoins fondamentaux des sociétés ?

I. Enjeux

La trajectoire actuelle du Système Terre entraîne des perturbations environnementales importantes pouvant avoir des conséquences majeures sur les sociétés. Les futures évolutions démographiques, économiques, techniques, et sociales devront concilier à la fois la satisfaction des besoins des populations humaines et la protection de l'environnement. Pour cela, une meilleure compréhension des déterminants de ces évolutions dans l'espace et dans le temps, de leurs conséquences et des moyens d'action, est nécessaire.

II. Axes prioritaires

Cette problématique peut s'articuler suivant différents axes de recherche, incluant notamment :

- La démographie, y compris la localisation de la population, les évolutions démographiques, les migrations internationales et régionales, et les tendances d'urbanisation,

[149] http://www.essp.org
Voir également : http://www.essp.org/fileadmin/redakteure/pdf/others/ESSP_Strategy.pdf
[150] http://www.ihdp.unu.edu

- L'articulation production-transport-consommation, en particulier les modes de production, leur technologie et leur localisation, la question du commerce international, des réseaux, les modes de consommation, en lien avec l'évolution des préférences et des cultures, et enfin les principes d'éco-conception, d'écologie industrielle et d'économie de la fonctionnalité,

- La construction de scénarii cohérents en termes de gestion des ressources (énergie et autres ressources naturelles et fossiles), de trajectoires macroéconomiques, de modes de régulation économique, politique et sociale et d'anticipation, de rupture et/ou d'irréversibilité.

III. Approches à développer

Ces différents thèmes de recherche pourront être déclinés en particulier sur les registres de l'évaluation et de la réduction des impacts environnementaux, des aspects d'atténuation et d'adaptation aux changements environnementaux planétaires.

Les recherches attendues peuvent en outre envisager les rétro-actions, afin de permettre notamment de comprendre comment les changements environnementaux planétaires pourraient impacter d'une part, les évolutions démographiques, économiques et sociales et d'autre part, les besoins fondamentaux des sociétés.

On pourra s'intéresser aux populations et communautés les plus vulnérables, une attention particulière pourra être portée aux questions d'équité, de justice sociale, de normes, ainsi que de définition et de quantification des besoins fondamentaux.

Est encouragée la recherche visant à clarifier la définition et le contenu de concepts largement répandus tels que croissance verte, décroissance, écodéveloppement, durabilité, développement durable *vs* non durable, etc.

Ces thèmes pourront également être abordés selon différentes approches, par exemple historique, descriptive, de prospective, de modélisation et d'observation.

1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples

- Les changements environnementaux globaux sont-ils de nature à causer des mouvements massifs de population ou à modifier les fondamentaux démographiques de la planète ?

- Les tendances actuelles de développement du commerce international, d'urbanisation rapide, et de concentration des populations sur les côtes sont-elles compatibles avec un développement à basse intensité carbone et faible niveau de risque ?

- Les capacités d'investissement à l'échelle mondiale sont-elles suffisantes pour financer une transition économique et technologique vers un monde à basse intensité carbone et, si oui, quels sont les outils pertinents pour mobiliser ces ressources, notamment dans les pays en voie de développement ?

- Peut-on imaginer des politiques publiques d'aménagement du territoire permettant de concilier les tendances actuelles d'urbanisation rapide, la gestion des risques naturels, la demande de production agricole et la préservation de la biodiversité, tout en réduisant les obstacles à l'accès au logement (notamment dans les pays en voie de développement où une partie importante de la population vit dans du logement informel et des bidonvilles) ?

- Quelles combinaisons d'innovations technologiques, de politiques publiques et de modification des comportements pourraient permettre de concilier l'augmentation des transports de passagers et de biens et la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre ?

2- *Actions ESSP et IHDP concernées*

IHDP Core science projects :
- Industrial Transformation (IT)[151]
- Urbanization and Global Environmental Change (UGEC)[152]
- Global Environmental Change and Human Security (GECHS)[153]

IHDP Sponsored Research Network :
- Population – Environment Research Network (PERN, IHDP/IUSSP Co-sponsored Network)[154]

ESSP joint projects :
- The Global Carbon Project (GCP)[155]
- Integrated Risk Governance (IRG)[156]

3- *Autres programmes internationaux sur le changement global concernés*[157]

IGBP Projects :
- Analysis, Integration and Modelling of the Earth System (AIMES)[158]
- Global Land Project (GLP)[159]
- Integrated Land Ecosystems-Atmosphere Processes Studies (ILEAPS)[160]

4- *Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif)*

Anthropologie, Démographie, Droit, Economie, Géographie, Histoire, Ingénierie, Psychologie, Sciences politiques, Sociologie, etc.

Question 2 : Quels sont les impacts globaux des différentes options régionales d'occupation du territoire (urbain, rural, naturel et marin) ?

I. Enjeux

La traduction aux échelles régionale ou locale de la question planétaire précédente soulève des questions de recherche qui peuvent être abordées avec une grande diversité d'approches.

---

151 http://www.ihdp-it.org/
152 http://www.ugec.org/
153 http://www.gechs.org/
154 http://www.populationenvironmentresearch.org/
155 http://www.globalcarbonproject.org/
156 http://www.irg-project.org/
157 On fait référence ici aux 4 grands programmes internationaux sur le changement global à l'initiative du partenariat ESSP: IGBP (http://www.igbp.net/), IHDP (http://www.ihdp.unu.edu/), DIVERSITAS (http://www.diversitas-international.org/) et WCRP (http://wcrp.wmo.int/wcrp-index.html)
158 http://www.aimes.ucar.edu/
159 http://www.globallandproject.org/
160 http://www.ileaps.org/

Aux échelles régionales et locales s'expriment les différentes composantes du changement global, avec des poids différents découlant de l'histoire économique et sociale et des conditions environnementales des types d'espaces. Des composantes énumérées en Q1a, se déduisent et se précisent des problèmes afférents à l'espace (e.g. la raréfaction de l'espace lui-même, les pollutions à dissémination régionale, l'évolution des ressources en sols et en eau…), au niveau du fonctionnement social des différents types d'espaces (e.g. une gouvernance plus partagée entre acteurs et appropriation de dispositifs institutionnels…), au niveau des innovations permises par la technologie (éco-technologies préventives et curatives, aménagements, tertiarisation de l'économie,etc.).

II. Axes prioritaires

Les trajectoires de développements démographiques, économiques, techniques, et sociales de ces régions sont donc des objets de recherche et dans la diversité des situations, on peut identifier des régions sous fortes tensions pour lesquelles la faisabilité de développements viables est la plus problématique. L'étude de ces situations à risques est à privilégier, tant pour des enjeux de vulnérabilité locale (faible capacité d'adaptation face aux impacts des CEP) que de viabilité à grande échelle (responsabilité dans l'atténuation des CEP). De même, les interactions spatiales (régional-global mais aussi "Nord-Sud", "Orient-Occident", villes-espaces ruraux, migrations de populations, etc.) sont elles-mêmes des objets de recherche.

La gestion de l'espace aux échelles locales ou régionales doit en particulier intégrer correctement les risques induits par les différentes dynamiques des changements globaux mais aussi des « filières » qui en dépendent. Elle doit reposer sur des (dé)localisations raisonnées localement et globalement en privilégiant la limitation des impacts, sur la résolution des conflits dans l'utilisation des sols, sur l'évolution nécessaire (et parfois très coûteuse) de son stock d'aménagements (par exemple côtiers et portuaires, barrages, etc.) et ses perspectives institutionnelles.

Les mégapoles, les zones côtières, les régions sous très forte pression démographique sont des types d'espaces où s'exacerbent les problèmes de vulnérabilité et ils doivent être privilégiées. Pour les villes, les processus de métropolisation, l'évolution de l'urbanisme, les aménagements fonciers par exemple doivent faire l'objet de recherches innovantes dans le contexte des CEP. On peut décliner de la même manière les recherches sur les zones côtières ; de nouvelles collaborations disciplinaires y sont indispensables.

III. Approches à développer

Les relations entre types d'espaces, se déclinant de multiples façons, posent des questions très diverses à la recherche, de la gouvernance du Système Terre et des problèmes géopolitiques au niveau des états, à un approfondissement des conditions pour dégager des partenariats gagnant-gagnant. La méthodologie sous-jacente est le plus souvent à construire scientifiquement.

En retour, les nouveaux aménagements technologiques et institutionnels aux niveaux régional ou local vont rétroagir avec le niveau global. Une méthodologie nouvelle doit permettre de mesurer *ex ante* l'effet agrégé des politiques au niveau rétroaction et de son ingénierie. Elle est à construire dans des conditions interdisciplinaires très poussées pour évaluer la viabilité à long terme et à grande échelle.

Les approches pourront être multiples : l'histoire, les sciences pour l'ingénieur, la modélisation, les études de cas, les méthodes comparatives, la méthodologie prospective,

les recherches participatives sont soit des innovations, soit des approfondissements entre autres de cette extension souhaitée mais la complexité des CEP et les conditions de l'intégration au niveau régional impliquent une réelle mise en œuvre d'une interdisciplinarité avancée.

Des approches à différentes échelles spatiales et temporelles sont attendues pour appréhender les phénomènes globaux et locaux présentant des dynamiques temporelles différenciées.

1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples

- Comment relier les changements locaux et globaux ? Par des suivi de terrains d'études à plusieurs échelles spatiales différentes (par exemple, pour le milieu urbain : type de bâtis, morphologie des quartiers, diffusion d'une zone urbaine, etc.) afin de mieux caractériser les processus dynamiques de l'évolution des milieux / types d'espaces ?

- Comment caractériser et évaluer la vulnérabilité et les stratégies d'adaptation aux CEP dans les territoires (ou situations) à risques ?

- Les mesures d'adaptation aux CEP : Comment s'assurer de la cohérence des mesures mises en œuvre à différentes échelles d'espaces ? Quelle intégration des gouvernances aux différentes échelles ?

- Quelle est la contribution urbaine aux changements environnementaux planétaires ? Cette contribution qui est aussi bien directe qu'indirecte, peut être analysée de façon macroscopique en considérant l'urbanisation comme processus planétaire, ou plus fine, en identifiant les variables clés de cette contribution d'une ville à l'autre – ce qui implique autant une réflexion sur les modes de vie que sur les modes de villes.

- Comment mieux caractériser l'ensemble des processus et dynamiques de l'évolution des milieux urbains, agricoles, côtiers etc. à différentes échelles spatiales (e.g. pour la ville : type de bâtis, morphologie de quartier, diffusion d'une zone urbaine, etc.) ?

2- Actions ESSP et IHDP concernées

IHDP Core science projects :
- Global Land Project (GLP)[160] (co-sponsored with IGBP)
- Land–Ocean Interactions in the coastal zone (LOICZ)[161] (co-sponsored with IGBP)
- Urbanization and Global Environmental Change (UGEC)[162]

IHDP Sponsored Research Network :
- MRI : Mountain Research Initiative (project : mountain.TRIP)[163]
- Integrated Risk Governance (IRG)[157]

3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés

IGBP Projects:
- Integrated Land Ecosystems-Atmosphere Processes Studies (ILEAPS)[161]

4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif)

[161] http://www.loicz.org/
[162] http://www.ugec.org/
[163] http://mri.scnatweb.ch/

Agronomie, Anthropologie, Climatologie, Démographie, Droit, Ecologie, Economie, Géographie, Modélisation, Sciences politiques, Sociologie, Urbanisme, etc.

Question 3 : Comment mieux connaître, comprendre et prévoir les interactions entre écosystèmes (continentaux, marins et côtiers) et CEP ? [164]

I. Enjeux

Dans un objectif de préservation des services écosystémiques et de la biodiversité, de prévision de leur dynamique future et d'intégration des grandes fonctionnalités de la biodiversité dans les modèles de CEP, il apparaît nécessaire de mieux connaître et comprendre les effets des changements globaux sur les organismes, les grands groupes fonctionnels et les écosystèmes. Les conséquences des changements globaux tels que les changements d'utilisation des sols ou l'exploitation des fonds marins, le réchauffement climatique, les pressions anthropiques directes, ou encore la multiplication des phénomènes d'invasions biologiques, sur les écosystèmes doivent être étudiés de manière intégrée. Les effets cumulés se déclinent en termes d'impacts non linéaires sur la biodiversité, sur la qualité des milieux et des habitats et sur la santé des organismes des écosystèmes. Ils seront notamment déterminants pour la gestion durable et l'exploitation soutenable des écosystèmes et leur étude constitue un préalable à la mise en œuvre de stratégies d'adaptation et d'atténuation.

II. Axes prioritaires

Les recherches sur les réponses intégrées des éco- et socio-systèmes aux changements climatiques et aux autres changements globaux doivent être développées selon différents axes : impact sur les flux d'eau, d'énergie, de carbone, d'azote et de phosphate, effets des évènements extrêmes sur les bilans d'eau et de carbone des écosystèmes, interactions entre adaptation et services écosystémiques, analyse et dynamique des réseaux trophiques; relation entre la dynamique des espèces et des communautés; caractérisation et interactions au sein des communautés et groupes fonctionnels; études des basculements entre différents régimes dynamiques sous influence des changements globaux; effets des changements globaux sur les écosystèmes le long de gradients; effets sur la phénologie et les traits de vie des organismes; étude des processus adaptatifs…

Des questions importantes portent sur l'influence de la présence ou de l'absence de composantes clés de la biodiversité (espèces clés de voûtes dans les réseaux trophiques; ingénieurs d'écosystèmes) sur le fonctionnement des écosystèmes (terrestres ou marins) et leur réponse aux CEP. Cela sous-entend de s'intéresser aux facteurs qui interviennent dans la stabilité des écosystèmes. Les processus et les composantes qui présentent des points de rupture, c'est-à-dire qui réagissent de façon fortement non linéaire aux forçages climatiques et anthropiques doivent être étudiés en priorité.

Plus généralement, il convient de développer des connaissances pour une évaluation comparative de la résilience des différents biomes face aux CEP et d'estimer quels sont les impacts à grande échelle (sociaux, économiques et autres) de la perte de biodiversité. Ceci

[164] Les interactions entre écosystèmes et CEP recouvrent les questions suivantes : Comment les écosystèmes sont-ils affectés par les CEP et comment leurs états changent en réponse aux CEP (étude des rétroactions) ? Comment une meilleure gestion des écosystèmes peut-elle contribuer à un développement soutenable ?

devrait passer par l'intégration entre les grandes fonctionnalités de la biodiversité et les services d'origine écosystémique. Une priorité devrait ainsi être donnée aux liens entre fonctionnement des écosystèmes et services écosystémiques dans le cadre d'études "multi-facteurs" (climat, changement d'usage des sols etc.) de terrain (paysages marins ou terrestres).

III. Approches à développer

Deux approches complémentaires sont à approfondir :

La question des échelles spatiales et temporelles pertinentes

- Quelles sont les échelles spatiales et temporelles pertinentes pour étudier les interactions écosystèmes, CEP et biodiversité en fonction des objectifs et des facteurs primordiaux impactant l'écosystème ?
- Quelles sont les interactions entre les phénomènes intervenant à différentes échelles (aller des études locales à globales et inversement) ?
- Comment étudier l'évolution des niches écologiques des espèces en se référant aussi aux données paléoécologiques ?

Un aspect négligé est de travailler sur les modalités de persistance locale des espèces, en raison de micro-hétérogénéités environnementales. Un cas particulièrement intéressant est celui des zones refuges de faune et de flore qui sont des zones privilégiées pour le maintien de la diversité spécifique en génétique et qui se sont maintenues malgré les vicissitudes des aléas climatiques du Pléistocène. Des études prenant en compte ces persistances locales dans les modèles dynamiques régionaux de la biodiversité paraissent indispensables.

Au-delà de l'aspect intégratif, il est nécessaire de prendre en compte des biomes clés situés dans des zones géographiques, elles aussi clés vis-à-vis des changements climatiques.

Les outils et les données pertinents pour étudier le fonctionnement des écosystèmes dans le contexte des CEP

Des modèles d'écosystèmes intégrant les interactions entre les grands compartiments, les flux, la diversité génétique et spécifique doivent être formalisés. Il est nécessaire de développer des prévisions fondées sur des modèles mécanistes (e.g. modélisations déterministes de processus), de régionaliser les modèles globaux, ou encore de développer des indicateurs écosystémiques dans une approche intégrative des écosystèmes. Des outils de diagnostic, des modèles pour identifier « des situations de crise » et les paramètres de contrôle seraient utiles à l'étude des régimes (transitoires) et du fonctionnement des écosystèmes non linéaires (identification des bifurcations).

Les questions des dispositifs d'observation de la biodiversité, de collecte des données, de mise à disposition de celles-ci et de pérennisation tant des observatoires que des données, sont mises en avant, notamment pour le long terme. Un dispositif d'observation de la biodiversité comparable par sa couverture spatiale aux dispositifs de suivi du climat et qui donne en temps réel l'état des éco- et socio-systèmes est ainsi nécessaire pour appréhender les trajectoires à l'œuvre. Les approches couplant observation et modélisation constituent une démarche à privilégier, de même que l'assimilation de données pour initialiser et guider les trajectoires.

1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples

- Comment intégrer des effets des changements de la biodiversité dans les modèles d'écosystèmes ? Des pistes : identifier et multiplier les groupes fonctionnels représentatifs d'une diversité fonctionnelle, représenter la physiologie et le comportement et plus généralement les traits de vie des différentes espèces (théorie DEB), articuler des représentations agrégées (PFTs, spectres de taille etc.) avec des représentations d'espèces clés sur le plan fonctionnel ou des services rendus, etc. A ce niveau, la dimension instantanée (diversité fonctionnelle à l'instant t) comme la dimension dynamique (les CEP modifient en temps réel la constitution et le fonctionnement des communautés et groupes fonctionnels) devront être prises en compte.

- Comment améliorer la compréhension et la capacité de prédiction sur la manière dont les écosystèmes répondent à une combinaison de facteurs naturels et anthropogéniques. Et, à quelle vitesse les changements environnementaux vont-ils affecter l'ensemble des biens et services fournis par les océans ? Quelles sont les mesures qui pourraient être développées pour s'adapter ou mitiger ces changements ? Quels sont les impacts sur les secteurs économiques ?

- Comment intégrer les conséquences des processus adaptatifs dans l'analyse et la modélisation des interactions entre les éco et socio-systèmes et les CEP ? Tant les populations que les espèces (y compris l'homme) ou les communautés vont réagir aux CEP via des adaptations, soit en termes de plasticité phénotypique et comportementale, soit en termes d'adaptation génétique, les effets directs ou indirects des CEP agissant alors comme forces de sélection. Le développement de nouveaux outils de connaissance qualitative et quantitative des processus moléculaires associés aux processus adaptatifs constitue une opportunité nouvelle dans ce domaine, de même que la disponibilité de Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR) comme l'Ecotron, qui permettent de tester *in vivo* l'effet de certains facteurs des CEP.

- Comment mieux tirer profit des enseignements du passé des écosystèmes terrestres pour améliorer notre approche prédictive du futur de ceux-ci ? Il importe à ce niveau de cibler les crises anciennes qui se rapprochent le plus de la situation actuelle (exemple de la période allant de la fin du Paléocène au début de l'Eocène et marquée par un maximum thermique comparable dans son ampleur au changement actuel).

2- *Actions ESSP et IHDP concernées*

IHDP Core Science Projects :
- Global Land Project (GLP)[160] (co-sponsored with IGBP) et dans la continuité du projet Global Change and Terrestrial Ecosystems (GCTE[165], sponsored by IGBP) (terminé)
- Land – Ocean Interactions in the coastal zone (LOICZ)[162] (co-sponsored with IGBP)

IHDP Sponsored Research Network :
- MRI : Mountain Research Initiative (project : Glochamore)[164]

3- *Autres programmes internationaux sur le changement global concernés*

Programme DIVERSITAS[158]

IGBP Projects :
- Global Ocean Ecosystem Dynamics (GLOBEC)[166]
- Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research (IMBER)[167]

---

[165] http://www.gcte.org/
[166] http://www.globec.org/

4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif)

Agronomie, Anthropologie, Biogéochimie, Biologie (sous-domaines par exemple : biologie évolutive), Climatologie, Ecologie (sous-domaines par exemple : écologie des communautés, écologie du paysage), Economie (sous-domaines par exemple : économie des pêches, de l'agriculture, etc.), Halieutique, Modélisation (mathématiques appliquées, statistiques, informatique etc.), Océanographie, Paléontologie, Paléoécologie, Sciences politiques, Sociologie, etc.

Question 4 : Comment évaluer les interactions alimentation de la population mondiale, ressources naturelles (eau, sol, vivant) et les CEP ?

I. Enjeux

À l'horizon 2050, le défi est de nourrir 9 milliards d'humains, et plus globalement d'assurer leur bien-être. L'enjeu spécifique est d'optimiser l'usage des services écosystémiques d'approvisionnement[168] dans un environnement propice.

Force est de constater que les ressources en eau (y compris l'habitat marin), en sol et vivantes sont limitées, convoitées et dégradées. Les ressources vivantes (végétales et animales, continentales et marines) sont menacées. Les disponibilités spatiales et temporelles de ces ressources nécessaires à la sécurité alimentaire sont très inégalement réparties. Assurer durablement l'alimentation de la population mondiale nécessite une analyse-diagnostic, quantitative et qualitative, des interactions entre les CEP et ces ressources dites renouvelables mais vulnérables (eau, sol, vivant), ainsi que de leurs rétroactions sur le Système Terre.

L'analyse de ce constat constituera l'objet majeur de la réponse à la question posée ici. Les études visant à la consolider sont souhaitables, notamment en projetant des scénarii associés à des évolutions nouvelles ou en anticipant des inter- (rétro-) actions dûment documentées.

II. Axes prioritaires

Quatre axes complémentaires d'analyse sont à approfondir dans ce contexte :

Un axe à dominante physique et technologique

- Comment évaluer les menaces sur les ressources actuelles et futures ?
- Comment identifier les technologies de remédiation ou d'atténuation associées ?
- Comment évaluer les impacts des modifications des technologies et des pratiques de production (agro-écologie, éco-ingénierie, aquaculture etc.) ou de consommation (modes alimentaires)[169] ?

---

[167] http://www.imber.info/
[168] Au sens du *Millennium Ecosystem Assessment* : http://www.millenniumassessment.org/
[169] Voir les conclusions de l'Atelier 3 de la première phase de l'ARP CEP.

- Quelles sont les stratégies possibles d'adaptation et d'atténuation qui préservent les ressources de façon durable, tout en favorisant une équité susceptible de réduire les conflits potentiels ?

Un axe à dominante écologique

- Quelles sont les interactions entre les écosystèmes cultivés et les écosystèmes dits "naturels" ou les compartiments non exploités (pollinisateurs, faune du sol, faune sauvage inféodée aux espaces agricoles, etc.) ?
- Pour les écosystèmes dits "naturels" ou les compartiments non exploités qui assurent un grand nombre de fonctions et de services écosystémiques nécessaires à l'agriculture (pollinisation, fertilité des sols, contrôle biologique, régulation hydrique, atténuation des perturbations, etc.), quelles sont les possibilités d'une utilisation plus efficace de ces "portions" de biodiversité ?

Un axe à dominante économique

- Quelles sont les interactions entre la dynamique des marchés régionaux et internationaux, les CEP et les modes de consommation dans un contexte de globalisation des productions ? On note par exemple sur les marchés mondiaux, le doublement au cours des 30 dernières années du volume de la production animale aquatique échangée. Les concepts d'« analyse de cycle de vie » et d'« eau virtuelle », qui peuvent être élargis à celui de « sol virtuel », entrent dans ce champ[170]. La contribution de l'agriculture, à la préservation et à la gestion de certains milieux pourrait également faire l'objet d'études, le but étant d'identifier les contributions positives, et de comprendre les leviers pour les renforcer.

Un axe à dominante politique et anthropologique

- Quels sont les modalités et les mécanismes juridiques, économiques et sociaux à mettre en œuvre pour une régulation durable de l'accès et/ou de l'usage des ressources en eau, en sol et en organismes vivants (végétaux et animaux), afin de garantir quantitativement et qualitativement la sécurité alimentaire planétaire ? Cela concerne en particulier : la mobilisation des acteurs pour la gestion des communs[171], le financement des infrastructures, les mécanismes de subventions et d'aide publique, l'encadrement de l'accès et des usages, le dialogue avec les acteurs des filières, les rapports sociaux de production.

Bien sûr, ces quatre points de vue se combineront souvent dans les projets de recherche. Cela sera par exemple le cas, lorsque l'on traitera de la résolution des conflits d'intérêt sur les ressources disponibles (production végétale alimentaire *vs* non alimentaire, agriculture *vs* urbanisation *vs* zones préservées, eau agricole *vs* eau industrielle et énergétique, aires marines *vs* pêches et utilisation du littoral, etc.) et/ou de la relation entre une vision globale et une action locale.

III. Approches à développer

Les projets de recherche devraient être structurés autour de « chantiers » de terrain à valeur générique, dans le sens où les réflexions conduites, les méthodes développées et les

[170] Pour une information sur ces concepts, on pourra par exemple consulter le site de *Life Cycle Initiative* : http://lcinitiative.unep.fr/ et celui de *Water Footprint Network* :http://www.waterfootprint.org/
[171] Par référence aux travaux d'E. Ostrom, Prix Nobel d'économie 2009

résultats obtenus peuvent être exploités dans des situations non spécifiques de la zone d'étude. Dans cette optique, l'utilisation de la télédétection spatiale et de la modélisation pour apprécier la représentativité de la zone d'étude type et généraliser les résultats d'une méthodologie au plan global en traitant explicitement les intégrations d'échelle sera encouragée.

Enfin, en "toile de fond", ces approches devront notamment prendre en considération la qualité et la quantité des données et des observations utilisées, les situations sanitaires et énergétiques des populations concernées, les moyens de transport, les modes de vie et d'organisations sociétales, ainsi que leurs rétroactions sur les CEP.

1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples

- Comment les CEP affectent-ils les déterminants de la sécurité alimentaire (production agricole, pêches et aquaculture, accès à l'alimentation et à l'eau, offre et demande agricole etc.) ?

- Quels sont les déterminants et les impacts globaux des systèmes alimentaires ? Comment évaluer les impacts globaux des changements de modes alimentaires ? Comment les pertes de biodiversité agricole impactent-elles l'agriculture et la sécurité alimentaire ?

- Comment analyser la capacité d'adaptation des systèmes d'exploitation et des acteurs dans la gestion des ressources en eau et en sol face aux CEP ?

- Les CEP et les impacts sur des ressources en eau et sol de moins en moins renouvelables : faut-il attendre de percevoir un impact sur la sécurité alimentaire pour s'en préoccuper ? Quels impacts environnementaux sont déjà engagés sur la santé, la biodiversité, les implantations humaines, le comportement biophysique des surfaces?

- Comment les CEP affectent-ils la répartition de l'eau ? Quelles peuvent être les rétroactions et quel poids peuvent-ils les avoir dans l'accélération/ralentissement des processus ? Quelles sont les conséquences pour les systèmes agricoles fortement dépendants ? Quelles solutions d'adaptation/mitigation envisager ? Comment prendre en compte le coût énergétique et social de la redistribution spatiale et temporelle de l'eau ?

2- Actions ESSP et IHDP concernées

ESSP joint projects :
- Global Water System Project (GWSP)[172]
- Global Environmental Change and Food Systems (GECAFS)[173]

ESSP et CGIAR[174] :
- The CGIAR Challenge program "Climate Change, Agriculture and Food Security" (CCAFS)[175]

IHDP Core Science Projects:
- Industrial transformation (IT)[152] : une partie des projets du thème "food".

3- Autres programmes internationaux sur le changement global concernés

[172] http://www.gwsp.org/
[173] http://www.gecafs.org/
[174] http://www.cgiar.org/
[175] http://www.ccafs.cgiar.org/

DIVERSITAS Cross-cutting Network :
- AgroBiodiversity[176]

4- Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif)

Agronomie, Agroéconomie, Anthropologie, Climatologie, Démographie, Ecologie, Economie de l'environnement, Halieutique, Hydrologie, Hydrogéologie, Pédologie, Sciences du sol, Sciences Politiques, Sociologie, Télédétection, etc.

Question 5 : Quelles relations entre expertise, gouvernance et société face aux CEP ?

I. Enjeux

Tant les CEP que les expertises scientifiques qui définissent leurs représentations contribuent à reconfigurer le social et le politique à toutes les échelles. Le déploiement des problématiques environnementales planétaires pose de multiples questions sur les dynamiques de la production des connaissances, sur le fonctionnement des expertises et sur le rôle des agents et institutions impliqués dans les diverses formes de gouvernance (au sens large d'instances de régulation, au-delà des autorités étatiques – y compris les organismes internationaux, les ONG, etc.).

Cette nouvelle « gouvernance du Système Terre [177] invite à interroger la construction de ces questions en tant que problèmes publics, leur communication dans les médias, les formes de mise en débat collectif sur ces sujets, les réactions et controverses qui se manifestent (ou non) dans les arènes nationales et internationales. Ces changements naturels et sociaux soulèvent aussi des questionnements sur les différentes représentations de l'environnement et de ses changements. Quelles valeurs et quels imaginaires sont mobilisés ? Comment ces perceptions conduisent-elles à des appropriations publiques, et peuvent-elles susciter des évolutions des comportements et des modes de vie ?

II. Axes prioritaires

Ces problématiques peuvent se décliner suivant trois axes de recherche :

Un axe "Science, expertise et gouvernance"

Comment la connaissance est-elle dynamiquement construite et appliquée à la recherche de significations ou à l'implémentation de politiques dans les sociétés contemporaines ? Les objets de recherche de cet axe concernent notamment :

- La définition des problèmes scientifiques dans le domaine des CEP au sein des organismes d'expertise ou des institutions internationales. Il s'agit d'entrer dans ces « boîtes noires » où se fabriquent les savoirs et les normes sur le Système Terre, pour mieux appréhender le rôle de l'expertise scientifique dans la gouvernance.

[176] http://www.agrobiodiversity-diversitas.org/
[177] Biermann F. *et al.*, 2009. Earth System Governance. People, Places and the Planet. IHDP Report n° 20, Bonn

- L'implémentation des normes, entre savoirs et décision. L'impact effectif des Sciences dans les décisions politiques dépend de facteurs complexes : régions et pays, manière dont la connaissance est produite et communiquée, agenda politique. Certains changements globaux suscitent des choix contradictoires et des difficultés d'arbitrage, notamment entre préoccupations liées au climat, à la biodiversité, aux forêts ou à l'agriculture, et ceci à différentes échelles. L'analyse de la mise en œuvre sur le terrain des projets, dispositifs et normes environnementales (e.g. MDP et REDD) constitue un important domaine de ce champ de recherches.

- L'architecture de la gouvernance du Système Terre. Pour chaque champ où la gouvernance du Système Terre se déploie (climat, eau, forêts, alimentation etc.) une cartographie des acteurs, l'étude de leurs interactions, l'histoire de leurs implications et de leurs rôles dans la définition des cadrages seraient fructueuses pour comprendre les constellations d'accords et de désaccords. Il s'agit notamment de prendre en compte les recompositions sociales importantes et rapides auxquelles ces crises et leurs prises en charge donnent lieu au sein des différentes instances de gouvernance.

Un axe "Espaces publics, débats, controverses"

La gouvernance est indissociable de la question du débat public : il convient donc d'étudier les constructions des problèmes et des solutions. L'analyse de l'information, de la communication et de la mise en débat public de ces questions environnementales globales doit être approfondie. Les objets de recherche de cet axe concernent en particulier :

- L'étude de la diversité des points de vue et des controverses (sujets de désaccord, identification des groupes d'acteurs qui les portent, évolutions et convergences, intérêts et enjeux politiques, épistémiques, etc.),

- Généalogies, perspectives historiques : face au caractère inédit des menaces environnementales auxquelles l'humanité est confrontée, en quelques années se sont forgés de nouvelles représentations et peut-être un nouveau « grand récit » englobant le passé, le présent et le devenir de l'humanité et de la Terre. Au-delà des évidences scientifiques, cette construction du Système Terre et du souci environnemental global doit être mise en perspective en étudiant la généalogie de ces préoccupations, comment elles se rattachent à des causes antérieures ou les réinvestissent, et quel rôle joue la science dans cette évolution. Quels sont les liens entre la globalisation des problèmes environnementaux et un sentiment d'appartenance à une humanité commune ?

Un axe "Représentations, appropriations, comportements"

L'étude des modes de vie renvoie à la question de la justice environnementale et du partage des ressources à l'échelle de la planète. Quelles adaptations du système social sont nécessaires pour accommoder les nouveaux modes de vie aux contraintes environnementales ? Inversement, quelles conséquences les changements dans les systèmes sociaux ont-ils sur l'environnement ? Il s'agit en particulier de s'intéresser aux :

- Incitations et comportements **:** Quelles sont les conséquences (y compris non intentionnelles) des incitations formelles (économiques, juridiques, etc.) et informelles (ex: techniques de communication) à modifier les comportements (de consommation d'énergie, alimentaires, fertilité etc.) et à vivre de façon durable sur les arrangements sociaux ? En effet, si la motivation en matière de comportement pro-social peut échapper

à la logique classique d'incitation[178], nous en savons trop peu sur les effets probables de la perception de ces incitations sur les comportements pro-environnementaux.

- La représentation des systèmes complexes (faiblesses cognitives, difficultés à envisager des résultats lointains dans le temps ou l'espace, design des aides à la décision etc. sont des thèmes à étudier) à travers des études visant à faciliter la prise de décision (e.g. prévision du comportement des systèmes complexes) et/ou la compréhension des CEP, de leurs fonctionnements et de leurs relations avec les systèmes écologiques et les styles de vie par le non expert et l'opinion publique.

- Les représentations du bien-être et les modes de vie soutenables : les études sur les relations entre le bien-être, les systèmes de valeurs et les conceptions de style de vie sont à encourager.

- Le développement de nouveaux consensus et normes : La perception des normes proposées par les experts mais aussi par des non experts doit être étudiée et en particulier l'efficacité des objectifs explicitement donnés sur les comportements en matière d'adaptation aux CEP.

III. Approches à développer

Ces thèmes pourront être abordés selon différentes approches selon les champs de recherche :

- A travers des études de cas paradigmatiques qui ont déjà fait l'objet de premiers travaux mais qui méritent d'être poursuivis et approfondis. (ex: régime climatique, biodiversité),
- Par des enquêtes à différentes échelles**,** par exemple sur les relations entre projets technoscientifiques et décision, en prenant en compte les critères variés qui président à la confiance et la diversité des enjeux politiques, économiques, environnementaux et sociaux intervenant dans les décisions seraient utiles.
- Par des études rétrospectives ou historiques permettant par exemple de mieux comprendre comment les sociétés s'adaptent aux CEP, ou d'interroger les histoires et les usages de concepts aujourd'hui très présents (ex: décroissance, croissance verte).
- Sur de tels enjeux de société, les approches favorisant la participation du public et les démarches de concertation devraient être encouragées.

D'une manière générale, tout projet de recherche susceptible d'éclairer la prise de décision et les comportements des consommateurs devrait être considéré en priorité s'il permet de proposer des stratégies susceptibles d'amener les individus à adapter leurs comportements pour les mettre en adéquation avec une société sobre en carbone.

1- Liste de questions de recherche à titre d'exemples

- Comment et via quelles institutions sont déterminés les thèmes « policy relevant » ? Où et comment sont débattues et construites les normes censées définir les façons de gouverner et d'administrer de demain ? Dans les expertises globales, comment et entre quels acteurs se négocient les échelles de temps et d'espaces à étudier, les seuils à ne pas dépasser, les facteurs principaux à prendre en compte, ce qui sera repris dans les négociations et ce qui est jugé, peut-être temporairement, moins prioritaire ?

[178] Bénabou, R. et Tirole, J., 2003. Self-knowledge and self-regulation: An economic approach. *In* Brocas I. and Carrillo J.D. (Eds.). *The psychology of economic decisions*: Vol. 1: Rationality and well-being. Oxford: Oxford University Press.

- Comment l'intégration des gouvernances globale, régionales, nationales et locales s'opère-t-elle ? Y a-t-il synergies, effets de blocage ou intrications complexes, à élucider ? Comment l'efficacité ou les performances des institutions environnementales sont-elles affectées par le fait d'être insérées (ou parties prenantes) dans des architectures plus vastes ?

- Qui peut construire des solutions aux problèmes environnementaux globaux et selon quelles modalités ? Quelles peuvent être les formes du débat public ? Quelles sont les capacités de transformation des sociétés face aux CEP ? Comment les mettre en mouvement ? L'autorité épistémique peut-elle être constituée démocratiquement ? Comment les résultats et les expertises sur les CEP sont-ils communiqués (scientifiques, médias) ? Comment sont-ils reçus dans l'espace public ? Comment sont-il réappropriés, voire transformés et reconfigurés suivant les différents groupes d'acteurs ?

- La perspective climatique tend à globaliser des domaines qui relevaient auparavant plutôt du « local » (biodiversité, forêts, etc.) ; comment la construction de ces domaines en est-elle affectée? Quels institutions et acteurs portent ces évolutions ?

- Quelles sont les stratégies de communication les plus adaptées pour modifier les comportements des consommateurs (consommation d'énergie, d'émissions carbone, moyens de transportation, etc.) ? Quels seront les impacts des mesures d'incitations juridiques ou économiques (lois, taxes etc.) sur les comportements et leur acceptabilité politique (ex: perception de l'équité, effets de culpabilisation, etc.) ?

- Existe-t-il des moyens d'accroître la valeur subjective et sociale de styles de vie compatibles avec une société post-carbone (parler de *croissance verte* plutôt que de *décroissance* etc.)?

- Existe-t-il des moyens de présenter des informations sur l'impact environnemental des choix de consommation pour favoriser l'intelligence écologique (le choix avisé des produits, services etc. pour minimiser son empreinte carbone, etc.). Existe-t-il des moyens d'améliorer la présentation des informations scientifiques sur l'évolution du climat et changements globaux pour favoriser leur compréhension par et impact sur le public général ?

2- *Actions ESSP et IHDP concernées*

IHDP Core Science projects :
- Earth System Governance (ESG)[179]
- Industrial Transformation (IT)[152] : en particulier les projets du thème "Governance and transformation processes"

IHDP Pilot science project:
- Integrated Risk Governance (IRG)[157]

3- *Champs disciplinaires à mobiliser (à titre indicatif)*

Anthropologie, Droit, Economie, Histoire et Sociologie des sciences, Philosophie, Psychologie, Sciences de l'Education Sciences de la Technologie et de la Communication, Sciences Politiques, Sociologie, etc.

[179] http://www.earthsystemgovernance.org/

GLOSSAIRE ET PRINCIPAUX ACRONYMES

Glossaire

Adaptation (capacité d') : (capacité d') ajustement d'un système social ou d'un écosystème (naturel ou anthropisé) face aux changements auxquels il est soumis afin d'en atténuer les effets potentiels, d'exploiter les opportunités ou de faire face aux conséquences.

Atténuation (ou mitigation) : Mise en œuvre d'approches technologiques et/ou politiques permettant la réduction des impacts des changements environnementaux planétaires dans un contexte de développement durable.

Changements environnementaux planétaires (ou Changement global) : Terme générique couvrant de multiples changements environnementaux et écologiques à la surface de la Terre en réponse à une combinaison de facteurs naturels et anthropiques. Cela comprend notamment les modifications d'usage des terres et des fonds marins (déforestation, urbanisation, intensification/déprise agricole, désertification, pêche, etc.), les modifications des cycles biogéochimiques (azote, carbone, eau,…), les évolutions de la biodiversité (perte de biodiversité, invasions biotiques, destruction d'habitats et/ou surexploitation de populations, etc.), le changement climatique, l'acidification des océans…

Système Terre : représente l'ensemble des composantes physiques, biologiques, et sociales, des processus et interactions qui déterminent ensemble l'état et la dynamique de la planète, incluant les biotopes et l'homme.

Vulnérabilité : degré auquel un système est susceptible d'être affecté négativement par les effets des changements globaux (d'origine climatique ou anthropique). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'importance et du rythme des changements auxquels le système est exposé, mais aussi de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation face à ces changements. Le concept de « danger » est considéré dans ce contexte comme un synonyme de vulnérabilité.

Liste des principaux acronymes

ACV	Analyse de Cycle de Vie
ADAGE	ADaptation de l'AGriculture et des Ecosystèmes anthropisés au changement climatique
AIE	Agence Internationale de l'Energie
AIMES	Analysis, Integration and Modelling of the Earth System
AMAP	Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne
ANCRE	Alliance Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARP	Atelier de Réflexion Prospective
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CAE	Conseil d'Analyse Economique
CCAFS	The CGIAR Challenge program "Climate Change, Agriculture and Food Security"
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique

CEC	Capacité d'Echange Cationique
Cemagref	Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement
C3ED	Centre d'Economie et d'Ethique pour l'Environnement et le Développement durable
CEP	Changements Environnementaux Planétaires
CES	Programme de Recherche Contaminants, Ecosystèmes, Santé (ANR)
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research
CIRAD	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
CIRED	Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement
CMA	Centre de Mathématiques Appliquées
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNFCG	Comité National Français sur les Changements Globaux
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CLUE model	Conversion of Land Use an its Effects
COM	Proposition de Directive Cadre Européenne sur les Sols
COP	Conference Of the Parties
CREIDD	Centre de Recherches et d'Etudes Interdisciplinaires sur le Développement Durable
CSFD	Comité Français sur la Désertification
DATAR	Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DGVM	Dynamic Global Vegetation Model
DICE	Dynamic Integrated Climate Economy model
EDD	Département Environnement et Développement Durable du CNRS
EDF	Electricité de France
EFEDA	Field Experiment in a Desertification Threatened Area
EGU	European Geophysics Union
EHESS	Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales
ENPC	Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
ERA-NET	European Research Network
ESA	European Space Agency
ESBN	European Soil Bureau Network
ESCSS	Emergency Situations and Civil Safety Service (United Nations)
ESG	Earth System Governance
ESSP	Earth System Science Partnership
ETSAP	Energy Technology System Analysis Program
FACE	Free Air CO_2 Enrichment
FAO	Food and Agriculture Organisation
Fondaterra	Fondation Européenne pour des Territoires Durables
FP	Framework Programme (UE)
GAMS	General Algebraic Modeling System
GCM	General Circulation Model
GCP	Global Carbon Project
GCTE	Global Change and Terrestrial Ecosystems
GEC	Global Environmental Change
GECAFS	Global Environmental Change and Food Systems
GECHS	Global Environmental Change and Human Security
GEOSS	Global Earth Observation System of Systems
GES	Gaz à Effet de Serre
GESSOL	Gestion Durable des Sols / Fonctions environnementales et gestion du patrimoine sol (MEEDDAT)
GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

GIS-Climat	Groupement d'Intérêt Scientifique Climat Environnement Société
GLOBEC	Global Ocean Ecosystem Dynamics
GLP	Global Land Project
GTAP	Global Trade Analysis Project (with database)
GWSP	Global Water System Project
IBM	Individual- Based Model
ICSU	International Council for Science Unions (Comité international pour la science)
IDDRI	Institut du Développement Durable et des Relations Internationales
IFPRI	International Food Production Institute
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IHDP	International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change
IHDP-IT	Industrial Transformation (project)
IIASA	International Institute for Applied Systems Analysis
ILEAPS	Integrated Land Ecosystems-Atmosphere Processes Studies
ILEE	Institut Languedocien de recherche sur l'Eau et l'Environnement
IMAGE	Integrated Model to Assess the Global Environment
IMBER	Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research
INEE	Institut Ecologie et Environnement (CNRS)
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INRIA	Institut National de la Recherche en Informatique et Automatique
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers (CNRS)
IPBES	Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Plate-forme intergouvernementale science-politique sur la biodiversité et les services écosystémiques)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPSL	Institut Pierre-Simon Laplace
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRG	Integrated Risk Governance
ISRIC	International Soil Reference and Information Centre
IUSS	International Union of Soil Sciences
IUSSP	International Union for the Scientific Study of Population (Union Internationale pour l'Etude Scientifique de la Population)
JRC	Joint Research Center (UE)
LADYSS	Laboratoire Dynamiques Sociales et Recomposition des Espaces
LATTS	Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés
LEPII	Laboratoire d'Economie de la Production et de l'Intégration Internationale
LMD	Laboratoire de Météorologie Dynamique
LOCEAN	Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques
LOICZ	Land – Ocean Interactions in the Coastal Zone
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
LTHE	Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement
LTMU	Laboratoire Théorie des Mutations Urbaines
LUCID	Lund University Centre of excellence for Integration of social and natural Dimensions of sustainability
MA	Millennium Ecosystem Assessment
MEEDDAT	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire
MESR	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOS	Matière Organique du Sol
MRI	Mountain Research Initiative
NASA	National Aeronautics and Space Agency
NRCS	Natural Resources Conservation Service

OCDE	Organisation de cooperation et de développement économiques
OGCMs	Ocean General Circulation Models
OGM	Organisme Génétiquement Modifié
ONG	Organisation Non Gouvernementale
PCRD	Programme cadre de recherche et développement (UE)
PCRDT	Programme cadre de recherche et de développement technologique (UE)
PERN	Population – Environment Research Network
PFT	Type Fonctionnel de Plantes
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research
PNUE	Programme des nations unies pour l'environnement
PRECODD	Programme de Recherche sur les Ecotechnologies et Développement Durable (ANR)
PREDITT	Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres
PURPLE	Peri Urban Regions Platform Europe
R2DS	Réseau de Recherche sur le Développement Soutenable (GIS)
R&D	Recherche et Développement
RDT	Programme Risque, Décision, Territoire (MEEDDAT)
RIOB	Réseau International des Organismes de Bassins
RSE	Responsabilité Sociale des Entreprises
SA	Service d'Aéronomie
SADC	South Africa Development Community
SAFER	Société d'Aménagement Foncier et d'Etablissement Rural
SBSTA	Subsidiary Body for Scientific and Technological Advice
SDEC	Schéma de Développement de l'Espace Communautaire (UE)
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
SOERE	Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement
SWOT	Surface Water Ocean Topography (CNES, NASA)
TGIR	Très Grande Infrastructure de Recherche
UGEC	Urbanization and Global Environmental Change
UNCLOS	United Nations Convention on the Law of the Sea
VMC	Programme de Recherche Vulnérabilité : Milieux et climat (ANR)
VMCS	Programme de Recherche Vulnérabilité: Milieux, Climat et Sociétés (ANR)
WCED	World Commission on Environment and Development (United Nations)
WCRP	World Climate Research Programme
WWF	World Wildlife Fund

ANNEXES

Annexe 1 : Bibliographie complémentaire du thème « Alternatives pour le développement économique et énergétique planétaire sous contraintes environnementales »

Axe 1 : styles de vie

Travaux d'auteurs cités dans le texte

[1] Blanc, N., 2008. Éthique et esthétique de l'environnement, EspacesTemps.net, Textuel, 31.01.2008, http://espacestemps.net/document4102.html
[2] Dobré M., Juan S., 2009. Consommation, modes de vie et environnement, L'Harmattan (à paraître)
[3] Dobré M., Haesler A., 2007 (co-éditeurs). Dictionnaire des Risques, Armand Colin (2ème édition)
[4] Dobré M., 2007. Consumption: A Field for Resistance and Moral Containment. *In* Sustainable Consumption Ecology and Fair Trade, E. Zaccaï (ed), London, Routledge, pp. 163-177
[5] Dobré M., 2002. L'écologie au quotidien – Eléments pour une théorie sociologique de la résistance ordinaire, Paris, L'Harmattan.
[6] Jackson T., Reader on sustainable consumption, Earthscan, London, 2006
[7] Jackson T. The challenge of sustainable lifestyle, Chap 4, 21p, 2008 « State of the World », Worldwatch (peut être téléchargé)
[8] Pursuing More Sustainable Consumption by Analyzing Household Metabolism in European Countries and Cities Henri C. Moll, Klaas Jan Noorman, Rixt Kok, Rebecka Engstrom, Harald Throne-Holst, and Charlotte Clark, Journal of Industrial ecology Vol. 9 Number 1-2, 2005, p 259-278, MIT Press, (peut être téléchargé)
[9] Tim Jackson, Laura Michaelis, Sustainable Consumption and Production, Economic, regeneration, 17.09.03, sustainable development Commission (UNEP) (peut être téléchargé)
[10] Darnton A. Driving Public Behaviours for Sustainable Lifestyles Report 2 of Desk Research commissioned by COI on behalf of May 2004 (peut être téléchargé)
[11] Spaargaren G., 2003. Sustainable Consumption: A Theoretical and Environmental Policy Perspective Environmental Policy and Sociology, Wageningen University, The Netherlands, Society and Natural Resources, 16:687–701. Copyright # Taylor & Francis Inc. ISSN: 0894-1920 print/1521-0723 (peut être téléchargé)
[12] Zaccai E. Changing Unsustainable Patterns of Consumption and Production. *In* E. Nierynck *et al.,* Making Globalisation Sustainable. The Johannesburg Summit on Sustainable Development and Beyond, VUB Brussels University Press, pp. 79-90 - Edwin Zaccai (ed.) Sustainable Consumption : Ecology and Fair Trade, Routledge, London, 2007 (forthcoming) (Only the introduction)

Pour aller plus loin, sélection de travaux non cité dans le texte

[1] Brohmann B., 2006. Sustainable Consumption as a process: the Role of Local Context, in : Charter et al. (ed.), op. cit., p 27-38
[2] Chevalier J., 2007. Défi énergétique et tournant urbanistique. Les initiatives des agglomérations aux Etats-Unis. Annales de la Recherche Urbaine, n° 103, septembre, Les villes dans la transition énergétique, pp.189-197
[3] Haesler A., 2005. Penser l'individu? Sur un nécessaire changement de paradigme, 1. Les impasses du néo-individualisme sociologique. EspacesTemps.net, Textuel, 23.11.2005, http://espacestemps.net/document2074.ht.
[4] Haesler A., 2006. Penser l'individu ? Sur un nécessaire changement de paradigme, 2. Relations et institutions », EspacesTemps.net, Textuel, 18.06.2006, http://espacestemps.net/document2042.ht

[5] From a business perspective Sustainable Consumption Facts and Trends world Business Council for Sustainable Development, 2006, (peut être téléchargé)
[6] Bonini et Clavairolle, 2005. Changer d'espace pour vivre mieux : ethnologie des « nouveaux » habitants des Cévennes, *in* : Fleuret S. (coord.). Espaces, Bien-être et Qualité de vie, Presses de l'Université d'Angers.
[7] Elgin D., 1981. Voluntary Simplicity: Toward a Way of Life that is Outwardly Simple, Inwardly Rich. Quill, New York
[8] Etzioni A., 2006. Voluntary Simplicity: Characterization, Select Psychological Implications and Societal Consequences. *In* Jackson (ed.), op. cit., p 159-177
[9] Hertwich E., 2006. Accounting for Sustainable Consumption: a Review of Studies of the Environmental Impacts of Household. *In* Jackson T. (ed.), op. cit., p 88-108.
[11] Loewe C., 2005. Re-searching towards a culture of sustainability: a transdiciplinary and cultural comparative perspective for Europe
[12] Hertwich E. *et al.* (eds), op. cit., p 308
[13] Martens S., Spaargaren G., 2006. The Politics of Sustainable Consumption:The Case of the Netherlands. *In* Jackson T. (ed.), op. cit., p 197-221
[14] Martinez-Alier J., 2002. The Environmentalism of the Poor: a Study of Ecological Conflicts and Valuation, Edward Elgar Pub., Northampton
[15] Norland I., Holden E., Lafferty W., 2005. Consumption of Energy and Transport in Urban Households: The role of urban planning *vs* green consumerism in promoting sustainable consumption. *In* Hertwich E. *et al*. (eds), op. cit., p 139-159
[16] Wann D., 2008. Simple Prosperity. Finding real wealth in a sustainable lifestyle, St Martin's Griffin, New York
[17] Hertwich E.G., 2002. Life-Cycle Approaches to Sustainable Consumption – Workshop Proceedings, 22 November 2002, Interim Report IR-02-073, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
[18] Hertwich E.G., Erlandsen K., Sørensen K., Aasness J., and Hubacek K., 2002. Pollution Embodied in Norway's Import and Export and Its Relevance for the Environmental Profile of Households, in Life-cycle Approaches to Sustainable Consumption – Workshop Proceedings, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria
[19] Hubacek K. and Hertwich E.G. (forthcoming). Emission Intensities for China Based on Input-Output Analysis, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria

Axe 2 : Environnement mondial et territorial

Bibliographie, sources internationales

[1] Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action. Ostrom Elinor, Cambridge University Press, 1990
[2] Institutional Incentives and Sustainable Development: Infrastructure Policies in Perspective. Ostrom Elinor, Schroeder Larry and Wynne Susan, Oxford: Westview Press, 1993
[3] Rules, Games, and Common Pool Resources. Ostrom, Elinor, and Gardner, Roy, and Walker, James, Editors, Ann Arbor, University of Michigan Press, 1994
[4] Agrawal, Arun. 2005. Environmentality Technologies of Government and the Making of Subjects. Duke University Press
[5] Moran Emilio and Elinor Ostrom, (eds), 2005. Seeing the Forest and the Trees: Human-Environment Interactions in Forest Ecosystems. MIT Press.
[6] Craiutu, Aurelian, and Sheldon Gellar (eds), 2009. Conversations with Tocqueville: The Global Democratic Revolution in the Twenty-First Century. Lexington Books

Travaux primés lors du Colloque "Sustainable Development : a Challenge for Europe; Brussels 26-28 mai 2009:

[7] Derk Loorbach, 2009. "A transition research perspective on governance for sustainability" (à paraître)
[8] J. David Tàbara, 2009. Integrated Climate Governance (ICG) and sustainable development (à paraître)
[9] Bruggink J., 2009. "Dealing with doom – tackling the triple challenge of energy scarcity, climate change and global inequity" (à paraître)

Bibliographie de travaux français

[10] Moser G., Navarro N., Ratiu E. and Weiss K. (in press, 1st quarter 2010). Cultural Background and Environmental Context of Water Perception and Use. *In* V. Corral-Verdugo, C.H. Garcia-Cadena and M. Frias-Armenta, Psychological Approaches to Sustainability: Current Trends in Theory, Research and Applications. Nova Science Publisher
[11] Moser G., Ratiu E. and de Vanssay B., 2005. Pensar en el agua : Representaciones sociales, ideologias y practicas : Un modelo de las relaciones con el agua en diferentes contextos societales. Trayectorias, 18, 79-91
[12] Moser G., Ratiu E. and de Vanssay B., 2004. Relationships to water use and Management in the light of sustainable development. IHDP Update, 4, 13-15
[13] Ratiu E., 2006. Logement temporaire et nouvelles mobilités urbaines. *In* K. Weiss and D. Marchand (eds.), Psychologie sociale de l'environnement. (pp. 49-61). Rennes: Presses Universitaires de Rennes
[14] Ratiu E., 1999. Modèles d'analyse psychosociologique et différenciation des rapports environnementaux à l'eau. *In* C. Aspe and P. Point (eds). L'eau en représentations. Gestion des milieux aquatiques et représentations sociales. pp. 15-26. Cemagref Éditions
[15] Letonturier E., 2007. La notion de réseau dans l'histoire des sciences sociales, *in* Sacriste (Valérie), Communication et média. Sociologie de l'espace médiatique, Paris, Foucher, p. 212-213.
[16] Letonturier E., 2006. Jeu, réseau et civilisation. Métaphores et conceptualisation chez Norbert Elias, L'Année sociologique, vol. 56, p. 67-82
[17] Guérin M., 2008, Evaluation des politiques de développement rural, quelques éléments d'analyse, Economie Rurale, n°301, pp.39-52
[18] Aznar O., Guérin M., Perrier-Cornet P., 2007. Agriculture de service, services environnementaux et politiques publiques, Revue d'économie régionale et urbaine n°4, pp. 573-588
[19] Candau J., Aznar O., Guérin M., Michelin Y., Moquay P., 2007. L'intervention publique paysagère et la production sociale de normes, L'intervention publique paysagère comme processus normatif, Cahiers d'économie et de sociologie rurales, n°84-85, pp. 168-190
[20] Aznar O., Guérin M., Jeanneaux P., 2006(a), La mise en œuvre de politiques environnementales par les acteurs locaux : Etude sur une zone d'étude située en France, Revue canadienne de sciences régionales, XXIX : 1, pp. 93-104
[21] Aznar O., Guérin M., Jeanneaux P., 2006(b). Quels indicateurs mobiliser pour les politiques environnementales locales ? Une approche à partir des services environnementaux et des conflits d'usage. Géographie-Economie-Société, n°8, pp. 369-384
[22] Torre A., Aznar O., Bonin M., Caron A., Chia E., Galman M., Guérin M., Jeanneaux P., Kirat T., Lefranc C., Melot R., Paoli J-C., Salazar M.I., Thinon P., 2006. Conflits et tensions autour des usages de l'espace, dans les territoires ruraux et périurbains : le cas de six zones géographiques françaises, Revue d'économie régionale et urbaine, n°2, pp. 415-453
[23] Vollet D., Guérin M., 2006. Effets économiques du paysage sur le développement régional, Illustration à partir d'une zone rurale française (le Pays de la Météorite), Revue canadienne de sciences régionales, XXVIII : 3, pp. 329-355
[24] Berriet-Solliec M., Guérin M., Vollet D., 2005. L'évaluation des politiques publiques agricoles en France. L'évaluation au milieu du gué ? Economie rurale, n°287, pp. 89-95
[25] Aubert F. Berriet-Solliec M., Guérin M., 2002. A intervençao das administraçoes territorias francesas no desenvolvimento rural, Estudos Sociedade e Agricultura, n°19, pp.114-145
[26] Aznar O., Berriet-Solliec M., Guérin M., 2002. Caractérisation socio-économique de l'intervention publique locale dans les services environnementaux, Économie et sociétés, cahiers de l'ISMEA, Série Économie et gestion des services, EGS, n°4, pp. 1041-1064
[27] Guérin M., Vollet D., 2001. L'appréciation d'une méthode et des enjeux politiques de l'évaluation : le cas d'un contrat de plan Etat-Région, Economie rurale, n° 263, pp. 48-61
[28] Aubert F., Guérin M., Perrier-Cornet P., 2001. Organisation et territoire : un cadre d'analyse appliqué aux espaces ruraux, Revue d'Economie Régionale et Urbaine n°3, pp. 393-414
[29] Diry J-P., Guérin M., Vollet D., 2000. Organisation et diversité de développement économique des zones rurales « périphériques », Géographie-Economie-Société, Vol 2, n°2.
[30] Guérin M., 1999. Proximité et actions publiques pour l'emploi : quelle pertinence avec l'évolution économique des territoires ruraux ? Le cas des sites de proximité en Rhône-Alpes, Economie Rurale, n°253, pp. 65-70.
[31] Guérin M, Aubert F., Perrier-Cornet P., Sylvestre J-P, 1998. Dynamiques des régions rurales : une approche localisée, Sciences de la Société, n°45, pp. 65-84.

Ouvrages collectifs

[32] Guérin M., 2009. Politiques de développement rural centrées sur l'agriculture et les collectivités territoriales. *In* Aubert F., Schmidt B., Piveteau V., Quae (eds), pp. 183-196
[33] Guérin M., 2006. L'évolution du développement local en France et le rôle de la participation locale. *In* Bleton-Ruguet, P. Bodineau, J-P. Sylvestre (dir.), Edition Universitaire de Dijon, pp. 105-118
[34] Guérin M., 2004. Développement durable dans les espaces ruraux, enjeux et méthodes d'évaluation. *In* Offredi C., La dynamique de l'évaluation face au développement durable, L'Harmattan, pp. 87-107
[35] Guérin M., Moquay P., 2002. Les recompositions territoriales des campagnes. *In* Perrier-Cornet P., À qui appartient l'espace rural ? DATAR, Éditions de l'Aube, pp. 105-132
[36] Daucé P., Arlot M.-P., Guérin M., 2002. Politiques rurales et finalités de l'intervention publique. *In* Perrier-Cornet P., À qui appartient l'espace rural ? DATAR, Éditions de l'Aube, pp. 81-103

Rapports officiels

[37] Guérin M., Steinlein P., 2005. Le tourisme, outils de revitalisation et de développement durable des espaces ruraux, Rapport au ministre délégué au tourisme, Conseil national du Tourisme, La Documentation française, 300 p
[38] Guérin M., (sd.), 2005. Horizon 2020 : Conflits d'usages dans les territoires, Quel nouveau rôle pour l'Etat ? Commissariat général du Plan, La Documentation française, 194 p
[39] Perrin D., Mallet J., Brun G., Guérin M., Ruas J.-F., Templé P., Teurkauff M.-C., 2003. Les politiques de développement rural – Evaluation des politiques de développement, Commissariat général du Plan, La Documentation française, 479 p

Yves Shaeffer

Articles publiés ou en révision

[40] La légitimité de la politique rurale à l'aune des théories de la justice, avec F. Aubert, en révision pour la Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement
[41] Diagnostic des espaces ruraux français : proposition de méthode sur données communales et résultats à l'échelle nationale, avec F. Aubert et D. Lépicier, déc. 2006. Notes et Etudes Economiques N°26, pp. 7-34

Communications récentes

[42] Social Segregation and Suburbanization : a discrete choice approach, avec F. Goffette-Nagot: présentée en 2009 à la conférence du North American Regional Science Council (NARSC) ; aux Journées de microéconomie appliqués ; aux Journées économie et espace GDR ASPE, INRA, Le Creuset
[43] Redistribution as a local public good, avec S. Charlot: présentée en 2008 à la conférence annuelle du NARSC et aux Journées économie & espace

Eric Canal-Forgues

[44] Le droit à l'environnement en droit français et devant la Cour Européenne des droits de l'homme, Conférence de Shanghai, 2008
[45] Droit de la mer : Présentation générale », Revue Océanis, 2008, Vol. 32, no 1, pp. 1-138 (en collaboration avec J. Beer-Gabel, L. Lucchini et A. Saliot)
[46] L'aide alimentaire doit-elle tomber dans l'escarcelle de l'OMC ? », www.telos-eu.com, 2006
[47] Le Traité international sur les ressources phytogénétiques pour l'alimentation et l'agriculture : Présentation générale », FAO (Nations Unies), Rome 2005, 50 p
[48] Les ressources génétiques des grands fonds marins ne relevant d'aucune juridiction nationale. Annuaire du Droit de la mer 2003, Pedone, 2004, pp. 99-110

Bernard Guillaume

[49] Guillaume B. Avoiding a 4+°C World: A Challenge for Democracy. 4 degrees and beyond, 28-30 September 2009, University of Oxford (UK)
[50] Guillaume B. Procrastination in Climate Policy: Metaphysics vs. Decisions in the Wild. International IARU Conference on Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions, 10-12 March 2009, University of Copenhagen (Denmark). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2009, vol.6, p. xx-xx.
[51] Lamarre D., Besancenot J.-P., Bourg D., Dubreuil V., Dupont N., Guilmlaume B., Nussaum R., Planchon O., Steinle-Feuerbach M.-F., et Tabeaud M., 2008. Risques climatiques et développement durable. *In*: Lamarre D. Climat et risques : changements d'approches. Lavoisier, Paris, p. 109-117
[52] Bourg D. et Guillaume B., 2005. Prévention et précaution : deux stratégies de gestion des risques liés au climat. *In*: Lamarre D. Regards croisés sur les risques climatiques. Paris, Belin, p. 51-61

Axe 3 : La gouvernance du système terre

[1] Bache I. et Flinders M. (éd.), 2004. Multi-Level Governance. Oxford, Oxford University Press
[2] Barry J. and Eckersley R., eds, (2005) The State and the Global Ecological Crisis. Cambridge, MA, MIT Press
[3] Beck U., 1999.The Cosmopolitan Manifesto. *In* Beck U. (ed), World Risk Society, Cambridge, Polity Press, p. 1-18
[4] Beck U., 2001. La société du risque. Sur la voie d'une autre modernité, Paris, Éditions Aubier.
[5] de Vries G., 2007). What is Political in Sub-politics? How Aristotle Might Help STS ? Social Studies of Science, vol. 37, nº 5, p. 781-809
[6] Goffman E., 1974. Frame Analysis. An Essay on the Organisation of Experience, Cambridge, MA, Cambridge University Press
[7] Gupta J. and Grubb M. (eds), 2000. Climate change and European leadership: A sustainable role for Europe? Dordrecht, the Netherlands, Kluwer Academic
[8] Harvey D.,1989. The Condition of Postmodernity. An Enquiry into the origins of cultural change, Oxford, Oxford University Press
[9] Hourcade J.-C., 2001. Le climat au risque de la négociation internationale? Le Débat, vol. 113, p. 137-145
[10] Jasanoff S., 1997. Science at the Bar. Law, Science and Technology in America, Harvard University Press
[11] Jasanoff S. and Long-Martello M. (eds), 2004. Earthly Politics. Local and Global in Environmental Governance, Cambridge, MA and London, MIT Press
[12] Keohane R.O., Haas P.M. and Levy M.A., 1995. The effectiveness of international environmental institutions. *In* Haas P.M., Keohane R.O. and Levy M.A. (eds). Institutions for the Earth. Sources of Effective International Environmental Protection, Cambridge, MA and London, MIT Press, p. 3-24
[13] Oreskes N., 2004. Science and public policy. What's the proof got to do with it? Environmental Science and Policy, vol. 7, p. 369-383
[14] Pielke Jr. R., 2004. When scientists politicize science. Making sense of controversy over The Sceptical Environmentalist. Environmental Science and Policy, vol. 7, p. 405-417
[15] Sarewitz D., 2004. How Science makes environmental controversies worse. Environmental Science and Policy, vol. 7, p. 385-403
[16] Seguin B., 2007. Changement Climatique : Les conséquences pour l'agriculture. Responsabilité et environnement, n°47
[17] Siebenhuener B., 2003. The changing role of national states in international environmental assessments: the case of the IPCC. Global Environmental Change, vol. 13, p. 113-123
[18] Sluijs J.Y.D., Eijndhoven J.Y., Shackley S. and Wynne B., 1998. Anchoring Devices in Science for Policy. The Case of Consensus around Climate Sensitivity. Social Studies of Science, vol. 28, nº 2/April, p. 291-323
[19] Swyngedouw E., 1997. Neither Global nor Local. Glocalisation and the Politics of Scale. *In* Cox K. (ed). Spaces of Globalisation. Reasserting the Power of the Local, New York/London, Guilford Press, p. 137-166

Annexe 2 : Liste des participants au colloque de restitution finale de l'ARP CEP – 2 et 3 février 2010

Hélène Agogué
Sophie Allain
Pierre Alphandéry
Lisa Amram
Olivier Aumont
Virginie Baldy
Nathalie Blanc
Anne Blanchard
Philippe Bosse
Nathalie Breda
Bernard Brillet
Julien Calas
François Carlotti
Laurent Carozza
Hugues Chenet
Pierre Chevallier
Catherine Courtet
Denis Couvet
Laurent Crespin
Amy Dahan
Ghislain de Marsily
Chantal Delacotte
Pascale Delecluse
Robert Delmas
Jean Dercourt
Hervé Domenach
Jean D'Yvoire
Christophe Emblanch
Richard Escadafal
Catherine Fernandez
Agnès Fortier
Estelle Fournel
Philippe Freyssinet
Pierre Friedlingstein
Soraya Garcia
Emmanuel Garnier
Gérard Gau
François Gemenne
Leah Goldfarb
Michel Griffon
Philippe Gros
Stéphane Guéneau
Hélène Guillemot
Minh Ha-Duong
Alain Hénaff
Denis Hilton
Jean-Charles Hourcade
John Ingram
Pierre-Alain Jayet
Sylvie Joussaume
Régis Juvanon du Vachat
Florence Kadri
Jean-Paul Karsenty
Christine King
Anne-Elisabeth Laques
Eric Lateltin
Jean Laterrasse
Xavier Lazzaro
Hervé Le Treut
Sophie Lebonvallet
Rik Leemans
Patrick Lehodey
Evelyne Lemercier
Daniel Martin
Pierre Matarasso
Marie-Antoinette Mélières
Laurent Memery
Claude Millier
Patrick Monfray
Olivier Mora
Alain Nadai
Catherine Ottle
Chantal Pacteau
Hélène Pauwels
Hélène Pérennou
Céline Perrier
Thierry Perez
Dominique Pestre
Thierry Phulpin
Philippe Rogel
Dominique Rollin
Marie Roué
Denis Salles
Bernard Seguin
Jean-François Soussana
Sabrina Speich
Anne-Sophie Tabau
Antoine Tabourdeau
Gabrielle Thiebaut
Jean Tournadre
Sébastien Treyer
Moïse Tsayem
Michel Vauclin
Jérôme Viers
Marissa Yates-Michelin