

## **Développement durable : environnement, énergie et société**

M. Paul COLONNA, directeur de recherche à l'Institut national  
de la recherche agronomique,  
professeur invité sur chaire annuelle

### ENJEUX ET DÉFIS POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Le concept de développement durable, proposé par la Commission Brutland et qui a été au centre du sommet de la Terre à Rio en 1992 a mis au centre de la problématique de la croissance économique la question de la rareté des ressources naturelles. Même si plusieurs signes semblent indiquer un essoufflement de la dynamique internationale (avec une fragmentation des institutions, un échec de l'action collective internationale, un renforcement des actions privées...), cette question est entrée dans les agendas politiques, depuis l'usage local des ressources jusqu'à leur exploitation plus généralisée. La prise en compte des limites de la disponibilité des ressources naturelles est une caractéristique majeure des stratégies de développement durable et la recherche est mobilisée pour répondre à des questions cruciales : l'innovation technologique permet-elle toujours la substitution d'une ressource par une autre ? Peut-on restaurer les ressources naturelles ? Comment définir les seuils maximaux pour l'exploitation des ressources naturelles ?

La notion de socio-écosystème joue un rôle important dans ces dynamiques scientifiques, sans qu'il soit toujours aisé de cerner l'échelle pertinente, depuis le bassin versant, le territoire, jusqu'au biome, et enfin l'ensemble terrestre.

Ce concept de développement durable est toujours à l'ordre du jour. La prise de conscience mondiale face à l'épuisement inéluctable des ressources en carbone fossile, la nécessité de lutter contre le changement climatique, et le durcissement de la réglementation de mise sur le marché des produits chimiques (REACH) conduisent à mettre en œuvre des alternatives durables aux carbones fossiles. La stratégie française et européenne en matière énergétique doit conjuguer une limitation des impacts environnementaux exemplaire (pays développés), une maîtrise des prix pour assurer la compétitivité et une sécurité des approvisionnements, du fait de la faiblesse des ressources européennes en carbone fossile.

## **Leçon inaugurale : Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques**

15 décembre 2011

Les différentes sociétés à la surface du globe, même indépendantes et souveraines dans chacun de leurs États, sont confrontées aux mêmes défis :

- répondre aux besoins alimentaires d'une population mondiale d'environ 9 milliards d'individus en 2050, avec certaines populations régionales en situation de fort développement économique ;
- contrôler, limiter et réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère afin d'assurer un développement neutre sur le plan du carbone atmosphérique, avec l'engagement de réduire par quatre les émissions de GES à l'horizon 2050 par rapport à 1990. À long terme, si rien ne vient atténuer les changements climatiques, il est probable que la capacité d'adaptation des systèmes naturels, aménagés et humains, sera dépassée. Une stratégie limitée aux seules mesures d'adaptation pourrait entraîner des changements climatiques trop importants pour qu'une adaptation efficace soit possible, si ce n'est à un prix social, écologique et économique exorbitant ;
- élaborer des produits de substitution aux hydrocarbures fossiles (et à leurs dérivés) dont les réserves, pour un coût donné, seront de plus en plus rares ;
- adapter les ressources naturelles, sous la pression du changement climatique et des finalités socio-économiques et géopolitiques connexes ;
- favoriser l'indépendance énergétique ;
- initier un développement neutre sur le plan carbone ;
- développer une bio/agro-industrie, dans une perspective de (re)structuration, de (re)localisation et de (ré-)industrialisation.

La leçon inaugurale a été éditée sous forme imprimée (Colonna P., *Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques*, Paris, Collège de France / Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », n° 223, 2012) et électronique (Colonna P., *Le carbone renouvelable dans les systèmes alimentaires, énergétiques et chimiques*, Paris, Collège de France, coll. « Leçons inaugurales », n° 223, 2012, <http://lecons-cdf.revues.org/541>).

Le texte intégral est disponible en ligne en libre accès : <http://lecons-cdf.revues.org/549>.

### **Bioénergies et chimie verte du carbone renouvelable**

*Des besoins énergétiques et chimiques aux structures chimiques d'origine biologique*

Cours du 10 janvier 2012

La biomasse végétale présente un certain nombre d'atouts : (a) parmi les différentes formes de stockage de l'énergie solaire, la biomasse issue des végétaux représente le potentiel le plus important, le plus ubiquiste tant au niveau planétaire qu'au niveau des différents pays et régions ; (b) son utilisation permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre ; (c) la biomasse permet d'accéder à des structures et à des propriétés nouvelles, par rapport aux produits pétro-sourcés.

Quatre familles biochimiques principales répondant à ces besoins sont discernables :

- les biopolymères constitutifs des parois végétales,
- l'amidon,
- le saccharose,
- les lipides.

Outre ces quatre familles majeures, il faut mentionner les protéines végétales de réserve en tant que biopolymères, le caoutchouc naturel et les métabolites secondaires.

### *Place des bioénergies dans la transition énergétique*

Cours du 17 janvier 2012

Le développement des bioénergies est au cœur de la transition énergétique, qui constitue également une opportunité pour revisiter les procédés chimiques et les molécules fonctionnelles qui en sont issues. En 2011, la production primaire française de l'ensemble des énergies renouvelables s'élève à 19,5 Mtep. Le bois-énergie en représente 46 %, les biocarburants, 10 %. La France s'est fixée des objectifs ambitieux de réduction des émissions de GES : réduire d'ici 2020 de plus de 23 % nos émissions par rapport à 1990. Simultanément, la France va porter à 23 % la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie d'ici 2020. La biomasse serait sollicitée à hauteur de 21,5 Mtep avant toutes les autres sources renouvelables, avec une prévision de croissance de 60 % au delà de 2020. Au niveau mondial, la biomasse, qui contribue à hauteur de 1,42 Gtep (dont 0,9 Gtep à partir de forêts), devrait être sollicitée aussi de manière intense.

Il existe deux filières de production de biocarburants commerciaux (1<sup>re</sup> génération) : la filière de l'éthanol et la filière des esters :

- Incorporé dans les supercarburants, le bioéthanol est obtenu par fermentation de sucres ou de polysaccharides à partir de betterave, de céréales, de pommes de terre ou de la biomasse, terme qui désigne ici un ensemble de déchets végétaux (paille, résidus de bois...). À partir d'une production de 13,5 t de sucre/ha, la betterave est l'une des plantes les plus performantes, avec 6,5-7,2 m<sup>3</sup> d'éthanol/ha *in fine*. Les sucres contenus dans ces matières premières sont transformés en alcool par fermentation, processus qui dégage du gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). D'autres molécules sont produites simultanément (glycérol, acide succinique, huiles de fusel), conduisant à un rendement de 48,4 g d'éthanol/kg de glucose. L'éthanol peut être incorporé dans les supercarburants sans plomb directement (Brésil) ou sous forme d'ETBE (ethyl-tertio-butyl-éther) en Europe.

- Mélangés à du gazole, les esters méthyliques d'huile végétale (EMHV) sont obtenus à l'issue d'une réaction entre une huile végétale (notamment de colza ou de soja) et du méthanol, laquelle libère du glycérol. En associant 1 tonne d'huile à 100 kg de méthanol, 1 tonne d'ester méthylique et 100 kg de glycérol sont obtenus. L'EMHV peut aussi être incorporé au fioul domestique. En Europe, il est appelé « biodiesel » ; en France, Sofiprotéol, l'établissement financier de la filière française des huiles et protéines végétales, a déposé la marque « diester », contraction de « diesel » et « ester ». Ce terme est devenu commun pour désigner l'EMHV en France.

Il est primordial de s'intéresser de manière privilégiée aux biocarburants de 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> génération, au regard de certaines incertitudes sur l'impact environnemental des biocarburants de 1<sup>re</sup> génération et de leur concurrence avec les produits alimentaires.

La deuxième génération est fondée sur la transformation de matières lignocellulosiques en sucres élémentaires fermentescibles. Des recherches sont en cours pour traiter plus efficacement la cellulose et les hémicelluloses. Cette filière a des similarités avec la filière éthanol 1G existante, mais nécessite des unités complémentaires de prétraitement et d'hydrolyse accolées aux usines 1G déjà en fonctionnement.

La troisième génération exploite des algues, essentiellement les micro-algues, espèces de grande productivité cultivées en masse sur des salines ou encore en photobioréacteurs. Ces technologies auraient des rendements de 2 à 3 fois supérieurs à ceux des cultures terrestres les plus productives. Elles présentent l'avantage de ne faire aucune concurrence aux cultures agricoles, et le bilan écologique peut être très favorable, notamment parce que le gaz carbonique d'origine industrielle (centrale thermique, cimenterie, etc.) est utilisé comme intrant.

### *La diversité des solutions végétales terrestres et aquatiques*

Cours du 31 janvier 2012

Rappelons d'abord que sur les 350 000 espèces végétales recensées, 9 assurent 75 % de l'alimentation et continueront à assurer cette base. De nouvelles espèces sont explorées en parallèle. Ainsi le genre *Miscanthus* et le *switchgrass* (*Panicum virgatum*), *Jatropha curcas* L., le jojoba (*Simmondsia chinensis*), le genre *Cuphea*, le crambe (*Crambe abyssinica*), la guayule (*Parthenium argentatum* Gray) et le pissenlit russe (*Taraxacum kok-saghyz*) sont représentatifs de ces plantes qui élargiraient le spectre des plantes mobilisables.

L'expansion des surfaces productrices de biomasse nécessite de nouvelles solutions végétales. La première repose sur la phytoremédiation. Le développement des activités industrielles, de l'extraction minière, de l'agriculture moderne ou des activités militaires a entraîné une augmentation d'origine anthropogénique des pollutions organiques et inorganiques dans les sols et les eaux. Cette pollution, qui affecte directement les végétaux, met en danger tous les organismes vivants, car les végétaux sont le point d'entrée de la chaîne alimentaire. Dans la seule Europe, environ 52 millions d'hectares sont affectés par des pollutions organiques ou métalliques, à côté des 155 millions d'hectares de la surface agricole utile (SAU). Des approches de phytostabilisation relèvent principalement d'une problématique d'« aménagement écologique ». L'enjeu est alors de trouver l'espèce végétale appropriée et de déterminer les conditions dans lesquelles l'implanter.

La seconde solution envisagée repose sur les algues. Le terme *algue* n'a en fait aucune valeur taxonomique. Les algues englobent tous les eucaryotes photosynthétiques dont le cycle de vie se déroule généralement en milieu aquatique – à l'exception de certaines espèces de plantes terrestres telles les posidonies ou les zostères, qui sont retournées dans l'eau au cours de l'évolution. Les algues se situent donc dans plusieurs lignées évolutives indépendantes, y compris à la base de la lignée des plantes terrestres, qui ont pour ancêtre une algue verte. Cette diversité évolutive est le résultat de plusieurs événements endosymbiotiques à l'origine des différents types de plastes actuels. On distingue les macro-algues, les

micro-algues et les procaryotes photosynthétiques que sont les cyanobactéries, autrefois appelées « algues bleues », qui ont historiquement été classées dans les algues et sont à l'origine des plastes des eucaryotes photosynthétiques.

Les micro-algues connaissent actuellement un très grand succès, en raison de leur productivité et de leur implantation potentielle en dehors des terres arables. La grande diversité biologique qui existe chez les micro-algues répond sans doute à une exceptionnelle adaptabilité, et laisse préjuger d'une richesse proportionnelle en molécules originales (lipides, protéines, sucres, métabolites, etc.).

### *Évaluation environnementale : labellisation, réglementations et politiques publiques*

Cours du 14 février

Les filières de production dédiées à des valorisations énergétiques ou chimiques de la biomasse posent plusieurs questions à l'échelle du territoire :

- Ces filières vont-elles contribuer à étendre les territoires agricoles et forestiers, et à diversifier les mosaïques paysagères ?
- Comment organiser leur coexistence avec les filières alimentaires ?
- Quels modes de gouvernance adopter pour favoriser les coordinations territoriales ?

Le changement majeur de paradigme pour les systèmes de production est le croisement des lois de l'écologie avec la conduite des systèmes cultureux, au bénéfice de la durabilité. L'agro-écologie offre des perspectives, par le besoin explicite d'une diversité des solutions agricoles, par le pilotage des processus écologiques nécessaires au maintien des services écosystémiques. L'agroforesterie, qui tend à maximiser les interactions écologiques positives, représente le modèle même d'optimisation écologique. Une conséquence attendue en agroforesterie et en agro-écologie est la diversification des espèces et des variétés, renforçant le besoin de disposer de bioraffineries aptes à traiter différentes matières premières.

Comme pour tous les systèmes innovants, une solide évaluation *ex ante* est nécessaire afin d'anticiper les conséquences et les impacts de leur éventuelle mise en place. Cette évaluation, qui est multi-acteurs, multi-échelles par nature, doit prévoir un suivi *ex post* (réseaux, observatoires). Cette évaluation intégrera aussi les évolutions du contexte international.

Ces trois leviers représentent des changements de paradigme : les deux premiers font passer les biotechnologies d'un stade de cueillette à une étape de démarche raisonnée ; le dernier conduit à moduler les efforts de recherche, et ensuite de développement, sur chacun des constituants des trois systèmes alimentaire, chimique et énergétique, en fonction de la durabilité totale attendue de l'ensemble.

En conséquence, l'éco-conception glisse d'une focalisation sur chaque produit à l'éco-conception des systèmes : comment créer et organiser des filières nouvelles, c'est-à-dire des produits et des procédés nouveaux tirant avantage des spécificités de la biomasse, des ressources (co-produits, sous-produits, déchets, biomasse, « minéral ») ?

*Conception et mise en perspective des systèmes de production durables.  
L'éco-conception et les bio-raffineries*

Cours du 21 février 2012

La bioraffinerie est en fait une technologie ancienne. Après la première génération (papeterie, moulin, huilerie), elle a évolué grâce à l'incorporation d'outils chimiques vers la bioraffinerie de deuxième génération (acides gras, glycérol, polysaccharides, isolats de protéines). L'arrivée d'outils biotechnologiques a permis l'approfondissement du fractionnement vers les oses et les peptides, en troisième génération. La gazéification conduisant au gaz de synthèse (syngaz) est le stade ultime de la quatrième génération, avec un éclatement des molécules constitutives, en CO et H<sub>2</sub>.

Cette évolution peut être relue depuis un fractionnement donnant d'abord des molécules ou des assemblages (fibres, grains d'amidon, gluten) eux-mêmes porteurs de propriétés d'usage directement valorisables, vers des molécules ou synthons porteurs de réactivité. La bioraffinerie peut être définie comme une succession de procédés physiques, chimiques et/ou biologiques de déconstruction, de séparation et de fonctionnalisation visant à transformer de façon durable la biomasse en produits commerciaux intermédiaires ou finis.

Un des principes des bioraffineries est d'appréhender de façon similaire le produit principal et les co-produits, et de minimiser le nombre de sous-produits. Les questions de recherche que soulève la transformation des matières premières d'origine végétale dans les bioraffineries sont structurées selon trois catégories :

- adaptation des différents végétaux aux procédés ;
- opérations préliminaires de récolte / transport / stockage ;
- gestion de la complexité des combinaisons disponibles, à la croisée des aspects techniques, bibliographiques, économiques, de stratégie industrielle, etc.

*Évaluations économiques, environnementales et sociales  
du carbone renouvelable*

Cours du 28 février 2012

Ces différents leviers biotechnologiques sont à l'origine de nombreuses controverses sociétales. Trois d'entre elles méritent une attention particulière :

- la sûreté de ces procédés biotechnologiques, tant au niveau des accidents industriels que de la sécurité des produits finaux. Il est clair que le règlement européen REACH (règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques) s'appliquera pour ces nouveaux produits, avec la mise en route d'investigations (éco)toxicologiques ;
- la propriété intellectuelle, en raison de la puissance générique des phases *in silico* fondées sur des outils logiciels à large spectre ;
- l'éthique, avec l'artificialisation du vivant, en particulier en biologie de synthèse, qui peut heurter certaines cultures.

Cependant, le discours science-société gagnera en profondeur et en finesse par l'application de démarches holistiques aux systèmes du carbone renouvelable.

Une approche globale est donc nécessaire, en synergie avec l'approche réductionniste : « quel végétal pour un usage défini ? ». Un grand nombre d'itinéraires technologiques parallèles permettent de produire de la biomasse à des fins alimentaires, énergétiques ou chimiques : ils reposent sur l'optimisation des cultures existantes,

l'exploration de la diversité naturelle et l'acclimatation d'espèces jusqu'ici non cultivées, la transformation des espèces, l'optimisation des usages de la biomasse, dans un concept de bioraffinerie flexible.

Différentes méthodes permettent d'évaluer le bilan environnemental des systèmes de production ou du cycle de vie de produits ou de services : toute comparaison nécessite de s'assurer non seulement de la définition du système étudié (ses composantes et son environnement, ses bornes et son horizon temporel, les fonctions prises en compte) mais aussi des critères et des indicateurs utilisés (efficacité énergétique, bilan des émissions de gaz à effet de serre, biodiversité, consommation d'intrants et impacts associés à l'échelle locale et globale, valeur paysagère, etc.). Parmi ces méthodes, les analyses du cycle de vie (ACV) ont été amenées à évoluer depuis des approches orientées « site », qui évaluent les impacts aux bornes d'une installation, vers une méthodologie d'évaluation des impacts sur des filières complètes. Actuellement, l'élargissement aux ACV conséquentielles aborde l'évaluation des conséquences d'une nouvelle activité, y compris avec les substitutions, les déplacements de production agricole ou forestière.

Toutefois, le bilan environnemental doit être complété par trois autres critères :

- les modifications des équilibres écologiques – le rapport Chevassus-Salles illustre le besoin de recherche(s) sur cet axe ;
- la concurrence et la complémentarité avec les usages des sols, au delà de l'approche comptable de l'ACV conséquentielle ;
- la concurrence et la complémentarité avec les différents usages de la biomasse.

### *Complémentarité et concurrence avec les finalités alimentaires*

Cours du 6 mars 2012

La démarche holistique appliquée aux systèmes du carbone renouvelable conduit à accorder une attention particulière aux systèmes cultureux et forestiers. L'optimisation ou l'adaptation de systèmes cultureux existants et la création de nouveaux systèmes, qu'il s'agisse de cultures de plein champ, de plantations forestières ou de production d'algues, posent des questions multiples à plusieurs échelles d'espace (la parcelle, le paysage, le bassin de production, le transport à longue distance des produits) et de temps (itinéraires techniques au cours d'une année, succession des cultures annuelles, durée des rotations, stockage des produits, renouvellement des cultures pérennes, entretien des installations confinées).

Les filières de production dédiées à des valorisations énergétiques ou chimiques de la biomasse posent plusieurs questions à l'échelle du territoire :

- Ces filières vont-elles contribuer à étendre les territoires agricoles et forestiers, et à diversifier les mosaïques paysagères ?
- Comment organiser leur coexistence avec les filières alimentaires ?
- Quels modes de gouvernance adopter pour favoriser les coordinations territoriales ?

*Les perspectives mondiales et régionales. Place du carbone renouvelable pour répondre aux besoins de l'humanité*

Cours du 13 mars 2012

Dans le cadre de l'étude prospective menée au cours de l'Atelier de réflexion prospective VegA, quatre scénarios contrastés des futurs usages non alimentaires de la biomasse ont été construits, en intégrant les scénarios de demande énergétique mondiale élaborés par l'Agence internationale de l'énergie (AIE). Ils décrivent la place que pourrait occuper la biomasse au sein de paysages énergétiques, et les trajectoires d'innovation différentes à l'horizon 2050 – en lien avec les transformations de la société et les orientations des politiques publiques et de la gouvernance mondiale. Dans ces différents scénarios, les usages de la biomasse varient selon qu'elle est mobilisée pour le transport, pour la production d'électricité et de chaleur, pour la chimie, ou selon que ces nouveaux usages se substituent aux usages traditionnels de la biomasse en les rendant plus efficaces.

Deux facteurs sont particulièrement importants pour le développement des bioénergies : d'une part, l'évolution des politiques publiques en lien avec les dynamiques des controverses, les évolutions des attentes sociétales et des enjeux géostratégiques ; d'autre part, le prix des énergies fossiles, qui conditionne la rentabilité économique de ces filières.

D'où les quatre scénarios évoqués :

- Scénario 1 : « Fuite en avant – Le fossile perdure, la biomasse vient en complément ». Problématique : quel modèle de marché pour les filières biomasse dans un contexte libéral et de forte demande alimentaire ?

- Scénario 2 : « La biomasse dans la néo-modernisation verte ». Problématique : quelle place maximale peut occuper la biomasse dans un mouvement de sortie des ressources fossiles, de limitation des émissions de GES et de modernisation écologique des secteurs d'activité ?

- Scénario 3 : « Course à la biomasse, dans un contexte de crise énergétique ». Problématique : quel rôle pour la biomasse dans un contexte d'insécurité énergétique et de dynamique de substitution massive aux énergies fossiles ?

- Scénario 4 : « Des territoires métropolitains et ruraux qui mobilisent la biomasse pour une diversité d'usages ». Problématique : quel mouvement de re-territorialisation des systèmes énergétiques et alimentaires, et d'innovation inter-sectorielle « intégrée » au niveau territorial (durabilité, efficacité, robustesse) ?

Si, avec les moyens actuels de production et de transformation, l'offre en biomasse devait répondre à une demande comprise entre 720 et 1 150 Mtep pour les seuls « nouveaux » usages – c'est-à-dire pour les transports (biocarburants liquides), la production d'électricité et de chaleur (hors usages en combustion directe, dits « traditionnels ») et la production de biomolécules –, les surfaces à mobiliser seraient comprises entre 275 et 925.10<sup>6</sup> ha, sachant que les terres émergées représentent 13.10<sup>9</sup> ha dont 3,9.10<sup>9</sup> ha de forêts et 4,9-5,0.10<sup>9</sup> de terres agricoles.

Ces ordres de grandeur écartent la possibilité de répondre à des demandes exclusives en biomasse dans une perspective de développement durable, car ils ne se fondent que sur des cultures dédiées (qu'elles soient de 1<sup>re</sup> ou de 2<sup>e</sup> génération) ; ils invitent à la prudence quant aux projections de long terme réalisées sur l'utilisation de la biomasse pour l'énergie et la chimie. L'inefficacité d'un recours massif à la biomasse en l'absence de politique de réduction de la consommation

énergétique est apparue très nettement. Enfin, ces résultats appellent à considérer les tensions possibles avec les usages alimentaires, mais aussi entre les usages non alimentaires de la biomasse déjà existants.

### **Séminaire : Les biotechnologies vertes et blanches. Enjeux environnementaux et défis technologiques**

Sous forme d'un colloque, les 8 et 9 février 2012

Les biotechnologies sont l'application de la science et de la technologie à des organismes vivants, de même qu'à leurs composantes, produits et modélisations, pour modifier des matériaux vivants ou non-vivants aux fins de production de connaissances, de biens et de services. Leurs progrès ouvrent des opportunités considérables pour réorienter les systèmes techniques et socio-économiques de nos sociétés vers la bio-économie dans une perspective de développement durable. Les biotechnologies apportent un changement de paradigme dans ce contexte de durabilité, en permettant d'adapter les biomasses à leurs usages, depuis la production jusqu'à l'élimination des déchets.

Les interventions au cours ce séminaire ont été :

- L'exploitation des données de séquençage, pour la prédiction de gènes et de leurs fonctions, par Jean-François Gibrat (INRA, Jouy-en-Josas).
- Les biotechnologies végétales et l'amélioration des plantes, par Loïc Lepiniec (INRA et Labex Saclay Plant Science).
- L'adaptation de la biomasse lignocellulosique à ses usages, par Herman Hofte (INRA, Versailles).
- La manipulation de la structure de l'amidon à partir de la connaissance des voies de biosynthèse de différents organismes, par Steven Ball (CNRS et université de Lille)
- La photosynthèse. Efficacité et potentialités des micro-algues pour la conversion de l'énergie solaire, par Gilles Peltier (CEA CNRS Cadarache).
- La conception de nouvelles enzymes et le renforcement de leurs performances par génie moléculaire, par Magali Remaud (INSA-Toulouse).
- Au delà de l'ingénierie métabolique, la biologie de synthèse, par François Kepes (Programme d'Épigénomique & institut de Biologie des systèmes et de synthèse, Genopole®, UEVE, CNRS-Évry).
- La maîtrise de la structure des lipides à partir de la connaissance des voies de biosynthèse de différents organismes, par Jean-Marc Nicaud (CNRS).
- L'apport de la métabolomique dans la biologie intégrative, par Dominique Rolin (université de Bordeaux) et Annick Moing (INRA, Bordeaux).
- Quelles formes de propriété intellectuelle dans le domaine des biotechnologies: certificats d'obtention végétale, brevets ?, par Agnès Ricroch (AgroParisTech, université Paris Sud et Penn State University, États-Unis).
- Les controverses sociétales, par Pierre Benoit Joly (Labex Sciences, innovations et techniques en société).
- L'éducation à la biologie moderne et aux biotechnologies dans le secondaire : comment l'éducation secondaire prépare-t-elle les futurs citoyens à l'arrivée des innovations ? Par Gérard Bonhoure, Inspecteur général de sciences de la vie et de la Terre.

- Table ronde : la recherche publique apporte elle les connaissances suffisantes dans le domaine des biotechnologies pour éclairer les choix des citoyens et les décisions des politiques ? Avec la participation de : Pascaline Minet, *La Recherche* ; Marie-Odile Monchicourt, Radio-France ; Jean-François Launay, INRA ; Sylvestre Huet, *Libération*.

*L'ensemble de ce séminaire est en cours de publication en langue anglaise.*

## Conclusion

La « bio-économie » est devenue au cours des années récentes un concept clé de l'OCDE et de la Commission européenne (repris par plusieurs gouvernements) pour tracer les axes d'une nouvelle stratégie de croissance durable. À Rio + 20, l'accent a été mis sur l'économie verte pour améliorer le niveau de vie dans les pays en développement sans augmenter leur empreinte écologique, et en même temps maintenir le niveau de vie dans les pays développés tout en réduisant leur empreinte.

L'économie verte marque ainsi une avancée par rapport au développement durable en considérant les besoins spécifiques et légitimes des pays en développement, à qui on doit accorder la plus grande priorité.

Début 2012, la Commission européenne a présenté sa « *Strategy for a sustainable bio-economy to ensure smart green growth in Europe* » ; elle propose d'innover pour une croissance durable en développant une bio-économie pour l'Europe. Le concept de bio-économie n'est pas un simple élément de langage dans le discours européen ; il est un support pour penser la « concrétisation » et la mise en œuvre d'une stratégie de développement durable. De ce point de vue, la bio-économie est un prolongement de l'idée de développement durable, mais elle y ajoute une dimension particulière en faisant reposer, explicitement et fortement, la dynamique de ce développement sur une économie de la connaissance : la bio-économie est une « *Knowledge Based Bio Economy* » ; la science, la recherche et l'innovation en sont les moteurs principaux.

La bio-économie :

- désigne une stratégie scientifique et économique pour créer les conditions d'un passage d'une économie fondée sur les ressources fossiles à une économie fondée sur les matières premières biologiques (croissance économique efficace, en harmonie avec l'environnement et adoptée par la société). Le développement de compétences nationales associé à une protection accrue à travers la propriété intellectuelle et industrielle (licences, brevets) doit précéder et accompagner la mise en place rapide d'une phase d'exploitation industrielle. Les échanges de compétences croisées entre le monde de la chimie classique et les agro-industriels ou forestiers devront se poursuivre et s'intensifier. La structuration de la filière passe par un partage équitable des revenus entre l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur : producteurs de biomasse, transformateurs, distributeurs, etc. ;

- fixe pour objectif de promouvoir, soutenir voire déclencher une croissance durable grâce à des progrès dans le domaine des biotechnologies visant à l'écologisation des procédés et produits industriels, la réduction des déchets... Les sauts cognitifs et techniques dans le domaine des sciences de la vie cette dernière décennie conduisent à élargir les possibilités des biotechnologies, permettant ainsi de revisiter les limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale imposent sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir. La prise de conscience mondiale face à l'épuisement inéluctable des

ressources en carbone fossile, la nécessité de lutter contre le changement climatique, et le durcissement de la réglementation de mise sur le marché des produits chimiques (REACH) conduisent à mettre en œuvre des alternatives durables. Les modèles de croissance économiques, sociaux et industriels sont à réinventer pour maîtriser et déployer la place des biotechnologies ;

- donne un rôle de premier plan à la transformation de la biomasse, avec pour la biotechnologie industrielle pour une gamme de produits (produits alimentaires, biocarburants, produits chimiques, bioplastiques) ;

- met au centre de la stratégie socio-économique le secteur agro-industriel et ses acteurs, à différentes échelles spatiales (locale, régionale, mondiale). Afin de se positionner correctement par rapport à des filières concurrentes, un fil conducteur fondamental pour le développement de la bio-économie est la double « sobriétés matière et énergie » de l'ensemble de la chaîne de valeur : de l'approvisionnement en biomasse (production, transport...) à sa transformation en produit, puis à sa distribution en biens commercialisables et, enfin, à sa gestion en fin de vie. Le respect du cycle de l'eau est un enjeu environnemental primordial. Les impacts sur la santé et sur l'environnement des produits bio-sourcés (toxicité et écotoxicité respectivement) devront par ailleurs être évalués sur l'ensemble du cycle de vie du produit. La comparaison avec les bilans de leurs homologues fossiles (molécules identiques ou produits à isofonctionnalités) permettra de mettre en évidence le gain environnemental.

Le passage à la bio-économie n'est pas un toilettage du développement durable. Il dépasse ce concept avec quatre caractéristiques :

- la place des biotechnologies pour modifier les procédés aux dépens des procédés physiques et chimiques ;

- le management des informations tant par les consommateurs que par les décideurs en charge des politiques publiques. Des systèmes fiables de traçabilité, de labellisation ou de certification devront être développés, harmonisés et rendus compréhensibles pour les consommateurs. Ils devront attester de la durabilité des produits et procédés de production, pour des acteurs dont le comportement a une visée à long terme, bien au delà de leur seule existence ;

- la conception et l'évaluation des systèmes de production végétale dédiés à des finalités énergétiques, chimiques et alimentaires de la biomasse, qui constituent un enjeu considérable, avec des approches qui sont par essence systémiques ;

- l'extension des territoires agricoles et forestiers et la diversification des mosaïques paysagères.

Ces deux dernières questions constituent un changement de paradigme majeur : cette vision holistique amène à revoir toutes les interconnexions entre les systèmes satisfaisant les besoins humains (alimentation, habitat, habillement, transports, hygiène, etc.). Comme pour tous les systèmes innovants, une solide évaluation *ex ante* doit être mise en place afin d'anticiper les conséquences et les impacts de leur éventuelle mise en place. Cette évaluation doit être multi-acteurs, multi-échelles et multi-acteurs et doit prévoir un suivi *ex-post* (réseaux, observatoires).

Le couplage de l'économie verte et des biotechnologies ne saurait faire négliger que l'approche par les besoins ne doit pas conduire à oublier les valeurs propres à chaque société, donnant ainsi la mesure des évolutions des systèmes de production et de transformation. La bio-économie disposera alors d'une compréhension et d'une appropriation par les parties prenantes.

