

Séminaire Transition

SYNTHÈSE DES INTERVENTIONS ET DÉBATS

Séance du 22 mars 2024

« Les bouclages de la transition, à la croisée des approches ingénieurs et économiques »

Animé par :

- **Laurent Michel**, président de l'Autorité environnementale

Intervenants :

- **Anna Creti**, professeure à l'Université Paris Dauphine – PSL et directrice de la chaire économie du climat
- **Aurélien Peffen**, expert en modélisation des systèmes énergétiques chez Enerdata
- **Sophie Szopa**, directrice de recherche au CEA en modélisation de la chimie atmosphérique ; coordinatrice et auteure principale au GIEC

« Focus sur le bouclage biomasse »

Animé par :

- **Selma Mahfouz**, directrice expertise ESG à Crédit Mutuel Alliance Fédérale

Intervenants :

- **Philippe Delacote**, Directeur de recherche à l'INRAE et responsable du pôle Agriculture, Forêts de la chaire économie du climat
- **Benoît Gabrielle**, professeur de bioclimatologie à AgroParisTech
- **Jérôme Mousset**, Directeur bioéconomie et énergies Renouvelables à l'ADEME

Cette séance inaugurale du séminaire « Transition énergétique et climatique » a été ouverte par Dorothee Rouzet, cheffe économiste de la DG Trésor. Ce séminaire a pour objectif de renforcer la pluridisciplinarité des approches, pour mieux appréhender les contraintes environnementales, climatiques, physiques, et les ajustements permis par l'économie. Dorothee Rouzet a rappelé que ce séminaire s'inscrivait dans un ensemble d'actions entreprises ces dernières années par l'Union européenne, la France et le ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, pour lutter contre le changement climatique et ses effets.

Dorothee Rouzet comme Laurent Michel ont souligné la pluridisciplinarité des questions posées par les bouclages de la transition, vus comme l'adéquation entre l'offre et la demande agrégées d'une ressource limitée, et où des questions physiques, techniques et économiques s'imbriquent.

Le séminaire était structuré autour de deux tables rondes, elles-mêmes articulées en deux à trois axes :

1. Table ronde générale : les bouclages de la transition à la croisée des approches ingénieurs et économiques

- a. Le concept de bouclage et les principaux enjeux associés
- b. La prise en compte interdisciplinaire des bouclages dans les modèles
- c. Enseignements des travaux pour la résolution des tensions de bouclage

2. Table ronde sectorielle : focus sur le bouclage biomasse

- a. La biomasse, ses gisements et ses finalités, ainsi que les enjeux et contraintes liées à son bouclage
- b. La résolution concrète des problèmes de bouclage biomasse

1. Les bouclages de la transition à la croisée des approches ingénieurs et économiques

- a. **Le concept de bouclage et les principaux enjeux associés**

Sophie Szopa a relevé que le terme de « bouclage » était peu usité au sein des sciences physiques, où on lui préfère le concept de « budget carbone ». Celui-ci cadre les négociations internationales dans le cadre des « COP », Conférence des parties, en lien avec l'Accord de Paris adopté en 2015 par lequel les pays s'engagent à réduire leurs émissions (contributions nationales déterminées ou *Nationally Determined Contributions*, NDC en anglais). Il existe une relation quasi-linéaire entre les émissions cumulées de CO₂ et l'augmentation de température moyenne de surface de la Terre. Les modèles physiques anticipent que cette quasi-linéarité resterait vérifiée à horizon 2050, même dans le scénario d'émissions le plus élevé considéré par le GIEC même si la réponse des puits de carbone au réchauffement est incertaine. La répartition juste de l'effort entre pays pour respecter ce budget est une question délicate.

Cependant, des incertitudes subsistent quant à ces modélisations. Le calcul du budget carbone mondial pour limiter le réchauffement climatique à 1,5°C par rapport à la période préindustrielle, estimé à 500 milliards de tonnes de CO₂ à partir du 1^{er} janvier 2020, revue en 2023 à 250 milliards de tonnes à partir du 1^{er} janvier 2023, reposait sur l'hypothèse de trajectoires fortement décroissantes d'émissions d'autres gaz à effet de serre. Le non accomplissement de cette baisse met en péril la possibilité de ce budget carbone restant. Or les émissions mondiales de méthane ne suivent pas cette trajectoire actuellement. Les incertitudes concernent également l'inventaire des émissions : les émissions observées déclarées par les pays pourraient ne pas correspondre à la réalité physique, en particulier pour les puits de carbone qui sont difficiles à modéliser.

Aujourd'hui, les engagements climatiques des pays ne permettent pas d'assurer le bouclage en émissions, alors même qu'un écart important est observé entre les engagements et les émissions constatées, ou encore les politiques climatiques mises en place. Or le budget carbone doit être respecté, sous peine de graves conséquences

physiques, sur le vivant et socio-économiques bien établies par la communauté scientifique et notamment les rapports du GIEC.

Anna Creti a indiqué que, selon l'approche normative de l'économie, le terme de bouclage fait référence à la notion d'équilibre général où ressources et emplois s'égalisent grâce aux prix. Si ce problème est facile à appréhender dans le cas d'une économie simplifiée à deux secteurs, il se complexifie fortement lorsqu'on l'élargit à l'ensemble de l'économie avec l'apparition de rétroactions, par exemple via l'intrication des chaînes de valeur. La théorie économique a reconnu l'importance de plusieurs déséquilibres susceptibles de survenir, comme le chômage keynésien¹, et les a longuement étudiés.

Ces déséquilibres peuvent notamment provenir de défaillances de marché, comme un excès d'incertitude dans les projections ou une asymétrie d'information entre acteurs du marché. L'externalité négative du réchauffement causé par les émissions de gaz à effet de serre est un cas d'école de défaillance de marché : les marchés ne prennent pas spontanément en compte les coûts physiques et économiques du réchauffement.

Aurélien Peffen a décrit les évolutions du métier de modélisateur des systèmes énergétiques au cours des dernières années vers la prise en compte des enjeux climatiques. La planification énergétique se limitait auparavant à une gestion de l'offre et de la demande d'énergie assurant un prix abordable. Aujourd'hui, elle doit intégrer des préoccupations additionnelles : le bouclage en émissions de gaz à effets de serre, mais aussi en potentiels d'énergie verte et de technologies de décarbonation, en biomasse et en usage des terres et en matériaux de transition.

La pluralité des bouclages s'accompagne d'une multiplicité de tensions. Elles peuvent ainsi être :

- géographiques, avec la répartition de l'effort de baisse des émissions entre pays, la coordination des échelles, et la territorialisation ;
- temporelles, avec le souci de concilier les horizons de décision des différents acteurs, publics et privés ;
- sociales, avec notamment l'acceptabilité de la transition et la justice sociale, qui sont deux concepts liés mais distincts.

b. La prise en compte interdisciplinaire des bouclages dans les modèles

Anna Creti a commencé par l'exemple de l'incertitude sur certains phénomènes physiques, mise en avant par Sophie Szopa, et sa prise en compte par les sciences économiques. La réflexion économique fondamentale est familière des questions d'incertitude : les prises de décision des entreprises et des ménages peuvent ainsi obéir à une distribution de probabilité, paramétrée ou hypothétique.

Dans les modélisations intégrant grandeurs économiques et climatiques, par exemple les modèles intégrés DICE² où économie, émissions et changement climatique interagissent, les contraintes physiques sont intégrées à la construction des scénarios. Cependant, ces modèles atteignent leurs limites lorsque surviennent des phénomènes de crise. S'ils parviennent à identifier les conditions dans lesquelles des points de non-retour sont franchis, ils ne permettent pas d'appréhender ces situations de « non-équilibre » (qui ne sont plus de simples perturbations autour d'un état stable). Il s'agit d'un domaine de l'économie qui a encore beaucoup à apprendre des sciences du climat. L'innovation technologique, politique et sociétale partage des caractéristiques avec la

¹ Chômage issu d'une rigidité à la baisse des prix et des salaires.

² Le modèle dynamique intégré climat-économie, appelé aussi modèle DICE (pour Dynamic Integrated model of

Climate and the Economy en anglais), est un modèle pluridisciplinaire informatique développé par le lauréat 2018 du prix de la Banque de Suède en sciences économiques en mémoire d'Alfred Nobel William Nordhaus.

transition écologique du point de vue de la modélisation économique. Il s'agit en effet d'un phénomène non-linéaire, incertain, avec des changements de paradigme. L'innovation est ainsi ardue à intégrer aux modélisations économiques.

Aurélien Peffen a poursuivi avec une description du modèle technico-économique POLES-Enerdata³ qui permet de bien comprendre les relations du système énergétique. Ce modèle intègre plusieurs bouclages. Il permet ainsi de décrire un équilibre offre-demande d'énergie au niveau mondial, avec des déclinaisons nationales et territoriales, tout en prenant en compte une contrainte en émissions de gaz à effet de serre, qui est exogène au modèle et où le changement climatique ne rétroagit pas sur l'économie.

Le modèle POLES-Enerdata n'intègre pas les rétroactions macroéconomiques ou le bouclage biomasse, mais des collaborations avec des experts de ces disciplines peuvent compenser ces limites. Ainsi, un couplage du modèle **POLES-Enerdata** avec un modèle macroéconomique a déjà été réalisé lors d'études à l'échelle de l'Union européenne, afin d'intégrer les impacts sur les investissements et sur la croissance des scénarios énergétiques. Chaque modèle alimente alors ses paramètres exogènes grâce aux sorties endogènes de l'autre, jusqu'à convergence. Cependant, de telles collaborations n'ont pas été réalisées entre **POLES-Enerdata** et des experts climatiques.

Sophie Szopa a détaillé la forte interdisciplinarité des travaux de modélisation du GIEC. Les différents scénarios de réchauffement sont déterminés par des modèles d'évaluation intégrée, qui permettent de passer de narratifs sociaux et économiques à des projections d'émissions. Pour les besoins physiques elles s'étendent jusqu'en 2100, voire 2300 mais sans prétendre conserver du sens du point de vue socio-économique. Ces modèles intègrent les processus macro-économiques

mais rarement les coûts du changement climatique. Une spatialisation régionale des émissions est nécessaire pour prévoir les changements locaux du climat (liées aux particules fines ou à l'usage des terres). Les interactions entre la physique et le vivant sont également modélisées pour rendre compte du cycle du carbone, mais dans une représentation simplifiée des écosystèmes.

Ce travail interdisciplinaire n'est toutefois pas sans limites : une surface de terre nécessaire à la production de bioénergies qui correspond à près de la moitié des terres utilisées pour l'agriculture, indispensable au bouclage de certains scénarios où le réchauffement est contenu à +1,5°C, interpelle. Par ailleurs, les modèles économiques, qui analysent les moyens d'atténuation du changement climatique, doivent faire des hypothèses sur les vitesses de diffusion des technologies bas-carbone. Or l'adoption par les utilisateurs peut dépendre de facteurs socio-culturels ou idéologiques difficiles à modéliser. Par exemple, aux États-Unis, l'adoption des véhicules électriques est freinée par la vision politique clivée sur les enjeux de transition. De multiples barrières à l'adoption de technologies bas-carbone non liées aux coûts ne peuvent donc pas être modélisées.

Les physiciens du climat ont mis à disposition des autres disciplines des métriques comme le pouvoir réchauffant global qui permet d'exprimer les émissions de tout gaz à effet de serre en CO₂ équivalent, classiquement à horizon de 100 ans. Cependant, les limites inhérentes à la simplicité de ces métriques doivent être régulièrement rappelées : le méthane concentre ainsi son pouvoir réchauffant sur les 10 premières années après son émission. Un contrôle dédié de ses émissions est nécessaire pour limiter le pic de réchauffement à court terme.

c. Enseignements de ces travaux pour la résolution des tensions de bouclage

³ Le modèle POLES a été initialement développé par l'IEPE (Institute for Economics and Energy Policy), devenu

aujourd'hui le laboratoire GAEL (Grenoble Applied Economics Lab).

Selon Sophie Szopa, le manque criant d'échanges entre les sphères scientifiques et décisionnelles a trois principales conséquences :

- (1) la méconnaissance des implications des hypothèses adoptées ou limites de connaissances;
- (2) la considération en silo de l'atténuation et de l'adaptation, qui devraient plutôt être abordées de concert ;
- (3) le budget carbone est aujourd'hui négocié comme un budget financier, où il est possible de s'endetter. Or tout dépassement de l'objectif de l'accord de Paris aura des conséquences majeures.

Anna Creti a souligné l'importante marge de progrès dans la réalisation et l'exploitation des analyses d'impact économique des mesures environnementales. Celles-ci doivent davantage combiner microéconomie et macroéconomie, tout en sortant de l'actuelle logique de silo où chaque politique est évaluée séparément. Des outils de modélisation manquent également, par exemple sur la résistance et le manque d'équilibre des systèmes. Anna Creti note par exemple que les impacts du Diagnostic de Performance Energétique et des interdictions de location de passoires thermiques récemment mises en place en France pour le marché immobilier n'ont pas été évalués. Cela affecte l'acceptation sociale des mesures contraignantes.

Les travaux d'Aurélien Peffen mettent en évidence l'importance d'une stratégie de politique publique de long terme transparente et crédible, qui permet selon les modélisations aux agents d'investir, d'adapter leurs comportements, et répond à leur aversion aux risques et aux incertitudes. Cette stratégie de long terme a d'autres avantages qui ne sont pas captés par les modèles : la construction d'un projet commun améliore ainsi l'acceptation sociale de la transition.

Enfin, les travaux du NGFS⁴ montrent l'importance de la coopération internationale : la transition serait bien moins coûteuse lorsqu'elle est ordonnée et coordonnée.

d. Questions de la salle

Les questions se sont concentrées sur la traduction concrète des travaux académiques sur les bouclages, qui nourrissent les COP et la décision publique, ainsi que sur la modélisation de la sortie des énergies fossiles pour les pays producteurs. Sur ce second point, les importantes ressources financières de ces pays et leur utilisation pour diversifier l'économie ont été soulignées.

2. Focus sur le bouclage biomasse

a. La biomasse, ses gisements et ses finalités, ainsi que les enjeux liés à son bouclage

Jérôme Mousset a défini la biomasse comme tout ce qui provient du vivant. La biomasse peut ainsi être agricole (les cultures et leurs résidus), forestière, maritime (algues), ou des co-produits de l'industrie (agro-alimentaire notamment). À chaque type de biomasse est associé une série d'usages possibles : alimentation, matériaux de construction, énergie et biocarburants...

Le bouclage biomasse consiste ainsi à concilier les objectifs d'usage de la biomasse avec la ressource disponible. Les objectifs adossés à la biomasse, partiellement en concurrence, sont :

- La satisfaction des besoins alimentaires ;
- La préservation de la biodiversité et des écosystèmes, qui est une condition d'existence à long terme de la biomasse ;
- Le stockage du carbone émis : il y a aujourd'hui davantage de carbone dans les sols et dans les parties aériennes des arbres que dans l'atmosphère ;
- La réduction des émissions brutes, en substituant les énergies fossiles par des bioénergies.

⁴ Réseau de banques centrales pour le verdissement du système financier

D'après les exercices de projection menés par l'ADEME, les besoins en biomasse non alimentaire devraient doubler d'ici 2050, ce qui soulève un enjeu d'accroissement de l'offre. L'estimation actuelle du gisement mobilisable en 2050 repose sur des hypothèses d'évolutions structurantes et indissociables du résultat, comme le passage vers des pratiques agroécologiques ou des régimes alimentaires plus sains.

Benoît Gabrielle a décrit l'évolution du rôle de la biomasse dans les rapports du GIEC. Dans le rapport de 2011⁵, elle était considérée comme la première forme d'énergie renouvelable. Aujourd'hui les avis sont plus nuancés et complexes, notamment avec les découvertes sur le stockage de carbone dans les sols agricoles ou sur la bioénergie avec captage et stockage de carbone (BECCS en anglais), une technologie à émissions négatives.

L'offre de biomasse dans le monde a augmenté de 20 % depuis les années 2000 : 60 exajoules (EJ) [~17 000 TWh] de biomasses sont actuellement produits chaque année, soit 15 % de la consommation d'énergie primaire mondiale. Les résidus de culture, sous-exploités, pourraient représenter 20 à 30 EJ annuels supplémentaires. Ils permettraient ainsi un recours accru aux bioénergies sans empiéter sur les usages alimentaires de la biomasse.

Philippe Delacote a souligné l'importance de la hiérarchisation des usages pour l'atteinte de la neutralité carbone. Ainsi, dans le cas du bois, dont les usages ont des durées de vie variables, le consensus est de prioriser la séquestration carbone dans les écosystèmes, puis dans les usages longs comme dans la construction, où la biomasse peut remplacer des produits fortement émissifs. En troisième position arrivent les usages en cascade, où les produits en usage long qui arrivent en fin de vie sont valorisés en bois énergie, ainsi que les

résidus issus de la transformation du bois et une partie des rémanents d'exploitation.

Un dernier enjeu clé est l'effet du changement climatique sur les écosystèmes, et donc sur les puits de carbone et l'offre de biomasse : les tempêtes, sécheresses et pathogènes menacent particulièrement les forêts, dont les cycles de vie sont plus longs que les cultures agricoles. La capacité d'absorption des puits de carbone forestiers français a été divisée par deux sur les dix dernières années. Ainsi, l'adaptation au changement climatique est clé pour que la biomasse contribue à l'atténuation du changement climatique. Dans ce contexte, Philippe Delacote recommande de privilégier la résilience des écosystèmes forestiers et agricoles et d'adopter une approche conservatrice du recours aux puits de carbone dans les stratégies nationales bas-carbone, ce qui induit des efforts accrus sur les baisses d'émissions de gaz à effet de serre.

b. La résolution concrète des problèmes de bouclage biomasse

Selon Philippe Delacote, les économistes privilégient usuellement les incitations par les prix pour faciliter les actions de séquestration, les investissements dans la production de biomasse et la hiérarchisation de ses usages. Une tarification carbone, qui pénaliserait les produits émissifs (ex : pétrole, ciment), accroîtrait les incitations à la production et à l'usage de biomasse (bois construction, biocarburants), favorisant ainsi l'effet de substitution. Cependant, si une taxe carbone permettrait de privilégier les usages longs, ses effets régressifs et la proportion d'émissions contraintes compliqueraient l'acceptation sociale de cette mesure. Ainsi la tarification du carbone semble nécessaire, mais non suffisante ; elle doit être couplé à des efforts de protection des plus vulnérables et des investissements dans les options et infrastructures bas carbone. Les systèmes de compensation carbone, comme le [label bas-carbone](#) ou le [carbon farming](#)

⁵ Rapport spécial sur les sources d'énergie renouvelable et l'atténuation du changement climatique.

[européen](#), permettent d'encourager les bonnes pratiques plutôt que de pénaliser les pratiques non durables. Son degré d'acceptation sociale est bien plus élevé, par exemple dans le secteur agricole. Cependant, ces mécanismes volontaires reposent sur un équilibre précaire entre rigueur de l'évaluation (pour garantir l'intégrité environnementale) et facilité de participation pour les acteurs privés.

Plus généralement, les politiques publiques consacrées à la biomasse doivent être décloisonnées, à la fois horizontalement et verticalement. Le décloisonnement horizontal vise à mettre en cohérence les politiques consacrées aux différents usages (atténuation, adaptation, agricole, énergétique, etc.), qui peuvent parfois être contradictoires aujourd'hui. La décroissance de certains secteurs est absolument nécessaire au bouclage biomasse, ce qui devra être assumé et accompagné par les pouvoirs publics. Quant au décloisonnement vertical, il consiste à appréhender l'ensemble de la chaîne de valeur. Ainsi, dans l'alimentation, la question des exigences environnementales croissantes sont indissociables des difficultés financières observées aux deux extrémités de la chaîne de valeur : certains agriculteurs et les consommateurs modestes sont très vulnérables aux variations de prix.

Benoît Gabrielle a insisté sur l'importance du pilotage des usages de la biomasse par la puissance publique, qui doit être régionalisé et s'appuyer sur des évaluations en cycle de vie qui incluent les externalités y compris non climatiques. Par exemple, remplacer des carburants fossiles par des biocarburants peut limiter (i) certains autres usages de la biomasse au bilan carbone en cycle de vie supérieur, (ii) encourager la conversion de terres riches en biodiversité en cultures. Compléter la tarification par des réglementations telles que la directive RED II⁶, qui impose des seuils de performance aux bioénergies, peut être nécessaire.

Par ailleurs, une simple tarification du carbone ne tiendrait pas compte des différences de rythme de développement des filières. Dans une telle situation, le stock actuel de résidus de biomasse serait rapidement exploité par les filières de valorisation déjà existantes, alors que d'autres filières, potentiellement plus avantageuses et compétitives à long terme, ne sont pas encore matures.

Pour Jérôme Mousset, la hiérarchie des usages ne doit pas les opposer mais en assurer la complémentarité. Ainsi, un même arbre donnera à la fois du bois d'œuvre et du bois énergie. La valorisation de ce dernier contribue ainsi à l'équilibre économique du bois d'œuvre. La porosité croissante entre usages de la biomasse a par ailleurs fait l'objet de la création d'un [groupe d'intérêt scientifique \(GIS\) lors du dernier salon de l'agriculture](#). Son objectif est de définir un cap partagé sur les recours à la biomasse, que les citoyens pourront s'approprier. En effet, les enjeux liés à la biomasse sont aujourd'hui méconnus car complexes et présentés comme des contraintes. En particulier, les retombées locales positives des filières biomasse pourraient être davantage mises en lumière.

c. Questions de la salle

La première question a porté sur la gestion des aléas climatiques dans la quantification de la biomasse disponible. Les intervenants ont expliqué que la meilleure méthode est de réitérer régulièrement les simulations pour s'adapter aux évolutions du climat et des connaissances. En effet, les incertitudes s'accumulent et se combinent, ce qui les rend difficiles à intégrer. Des travaux sur cette thématique sont en cours, avec par exemple une modélisation des incertitudes menée à l'INRAE dans le secteur forestier grâce à des techniques de Monte Carlo.

⁶ Directive (UE) 2018/2001 du 11 décembre 2018 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de

sources renouvelables, dite « RED II » (Renewable Energy Directive)

La seconde question a concerné la mise en place pratique de la hiérarchisation des usages de biocarburants entre les différents types de transport. Les intervenants ont souligné la complexité de la mise en place d'une filière de production pour les biocarburants de deuxième génération, qui peine à émerger malgré des mesures fiscales avantageuses. Par ailleurs, les modes de transport ne peuvent pas utiliser tous les biocarburants : une certaine complémentarité s'observe en pratique.

*

La conclusion du séminaire par Diane Simiu, directrice du climat, de l'efficacité énergétique et de l'air à la DGEC, a porté sur l'exploitation des échanges du séminaire pour la planification écologique en développement dans les administrations (SGPE, DGEC, DG Trésor, CGDD, etc.) et plus particulièrement pour la stratégie nationale bas carbone (SNBC), le plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC) et la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), pilotés par la DGEC. Du fait des nombreux enjeux de bouclage évoqués, aboutir à un scénario d'atteinte de la neutralité carbone respectant tous les bouclages est une mission particulièrement complexe.

Pour toute information complémentaire,
consultez le site de la DG Trésor.