



INRAE



Bioéconomie

Prospective scientifique interdisciplinaire

➤ Rapport de synthèse Juin 2020



Prospective Scientifique Interdisciplinaire

Bioéconomie

Synthèse opérationnelle et Rapport

Pour citer ce document :

M. A.V. Axelos, L. Bamière, F Colin, J.-Y. Dourmad, M Duru, S. Gillot, B. Kurek, J.-D. Mathias, J. Méry, M. O'Donohue, S. Recous, V. Requillart, J.-P. Steyer, A. Thomas, S. Thoyer, H. de Vries, J. Wohlfahrt. – Réflexion prospective interdisciplinaire bioéconomie - Rapport de synthèse INRAE 2020, 70 pp.
(<https://hal.inrae.fr/hal-02866076>)

DOI [10.15454/x30b-qd69](https://doi.org/10.15454/x30b-qd69)

SOMMAIRE

Contributeurs :	6
Coordination	6
Comité de pilotage	6
Groupe de travail :	6
Abréviations	8
SYNTHESE OPERATIONNELLE	9
Les enjeux pour la bioéconomie	10
Vision et priorités pour INRAE :	11
1. Comment produire et mobiliser plus de biomasse sous contrainte climatique tout en préservant écosystèmes et ressources ?.....	11
2. Comment optimiser la transformation des biomasses et maintenir la matière dans un cycle productif ?	13
3. Comment assurer le bouclage des cycles ?.....	14
4. Comment anticiper, organiser et gérer les flux, les échanges et les marchés dans un contexte de forte incertitude ?.....	15
La bioéconomie à l'échelle des territoires.....	16
Les sciences et technologies du numérique pour le développement de la bioéconomie.....	18
Recommandations.....	19
RAPPORT	21
1. INTRODUCTION	22
1.1. Bioéconomie : des définitions en évolution.....	22
Une bioéconomie pour l'Europe	22
La bioéconomie dans les pays européens et en France	23
1.2. Les différentes visions de la bioéconomie, les consensus, les questions qui font débat .	24
Les différentes visions de la bioéconomie.....	25
Les consensus	26
Les questions en débat	26
1.3. Réflexion prospective INRA-Irstea 2019.....	27
Mission.....	27
Méthode de travail et structure du document.....	27

2.	SCHEMAS CONCEPTUELS.....	29
2.1	Schéma conceptuel général de la bioéconomie	29
	Un système complexe adaptatif	29
2.2	Schéma conceptuel de systèmes bioéconomiques territoriaux	30
	Schéma conceptuel	31
	Les systèmes bioéconomiques et leur ancrage dans les territoires.....	32
3	DEFIS THEMATIQUES POUR UNE BIOECONOMIE DURABLE.....	33
	AXE 1 : Productions et usages des biomasses.....	34
3.1.	Production durable de biomasse	34
	Les éléments de contexte et les défis à relever	34
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	36
3.2.	Compétition d’usage et relation entre filières de production	37
	Eléments de contexte et défis à relever	37
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	37
3.3.	Qualifier les biomasses dans toute leur diversité pour un usage raisonné	38
	Eléments de contexte et défis à relever	38
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	38
	AXE 2 : Approvisionnement et transformation des biomasses.....	39
3.4.	Organisation des systèmes logistiques de biomasse	39
	Eléments de contexte et défis à relever	39
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	40
3.5.	Organisation des unités de transformation.....	40
	Eléments de contexte et défis à relever	40
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	42
3.6.	Re-conception des procédés de transformation.....	43
	Eléments de contexte et défis à relever	43
	Les enjeux scientifiques et technologiques, les priorités de recherche.....	44
	AXE 3: Vers une bioéconomie circulaire	46
3.7.	Des déchets aux ressources.....	46
	Eléments de contexte et défis à relever	46
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	48
3.8.	Bouclage des cycles.....	49
	Eléments de contexte et défis à relever	49
	Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche.....	51

AXE 4 : les acteurs d'une société « biosourcée ».....	53
3.9. Connaissances et anticipation des marchés	53
Eléments de contexte et défis à relever	53
Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche.....	53
3.10. Bioéconomie et citoyens-consommateurs	54
Eléments de contexte et défis à relever	54
Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche.....	57
3.11. Politiques et actions publiques : justification, construction, évaluation	58
Eléments de contexte et défis à relever	58
Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche.....	59
4. RECOMMANDATIONS.....	61
4.1. Quantifier les flux de matière et d'énergie	61
4.2. Développer des approches et outils pour accompagner la transition.....	61
Approches dynamiques de modélisation	61
Acquisition/traitement de données hétérogènes ; gestion des données manquantes.....	61
Développement d'outils d'aide à la décision multicritères	62
Approches multi-échelles/multi-niveaux	62
4.3. Développer des programmes de R&I internationaux en lien avec les ODD*	62
4.4. Concevoir des programmes interdisciplinaires.....	65
Glossaire	66

Contributeurs :

Coordination : Monique Axelos, Directrice scientifique alimentation et bioéconomie

Comité de pilotage :

Jacques Mery (Unité PROSE, chargé de mission bioéconomie à IRSTEA), Michael O'Donohue (chef du département Transform), Alban Thomas (chef du département EcoSocio), Sophie Thoyer (cheffe adjointe du Département EcoSocio) et Hugo de Vries (Unité IATE, Chargé de mission Europe et International auprès de la directrice scientifique Alimentation et Bioéconomie)

Groupe de travail :

Nom	Unité Compétences	email
Kurek, Bernard	Fractionnement des AgroRessources et Environnement (FARE) Biochimie et valorisation des Parois végétales – bioraffinerie, fibres et matériaux composites	bernard.kurek@inrae.fr
Requillart, Vincent	Toulouse School of Economics (TSE-R) Evaluation des politiques publiques - nutritionnelles/ environnementales modèles économiques – impact sur les marchés de la valorisation des coproduits	vincent.requillart@inrae.fr
Bamière, Laure	Economie publique Modèle d'offre de biomasse – stockage de C dans les sols	laure.bamiere@inrae.fr
Wohlfahrt, Julie	AgroSystèmes Territoires Ressources (ASTER) Modélisation des systèmes bioéconomiques territorialisés	julie.wohlfahrt@inrae.fr
Dourmad, Jean-Yves	Physiologie, Environnement et Génétique pour l'Animal et les Systèmes d'Élevage (PEGASE) Zootechnie – interaction nutrition /environnement – GIS APIVAL	jean-yves.dourmad@inrae.fr
Colin, Francis	SILVA Ressources forestières – composés extractibles – les flux dans la filière forêt - bois	francis.colin@inrae.fr
Steyer, Jean-Philippe	Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement (LBE) Valorisation des déchets – biotechnologie environnementale.	jean-philippe.steyer@inrae.fr
Duru, Michel	AGroécologies, Innovations, TeRritoires (AGIR), Agronomie gestion des prairies – systèmes de production - relation environnement / santé	michel.duru@inrae.fr
Recous Sylvie	Fractionnement des AgroRessources et Environnement (FARE), Cycle du C, N dans les sols cultivés Fertilisation et gestion des matières organiques	sylvie.recous@inrae.fr
Méry, Jacques	PRocédés biOotechnologiques au Service de l'Environnement (PROSE) Socio-économie de l'environnement	jacques.mery@inrae.fr

Thoyer, Sophie	Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier (CEE-M) Economie de l'agriculture et de l'environnement, politiques publiques, évaluation	sophie.thoyer@inrae.fr
Mathias, Jean-Denis	Laboratoire d'Ingénierie pour les Systèmes Complexes (LISC) Modélisation de systèmes complexes – bioéconomie territoriale	jean-denis.mathias@inrae.fr
Gillot, Sylvie	REduire Réutiliser Valoriser Les Ressources Des Eaux Résiduaires (REVERSAAL) Valorisation et traitement des eaux résiduaires	sylvie.gillot@inrae.fr
Thomas, Alban	Toulouse School of Economics (TSE-R) Economie agricole et de l'environnement Econométrie ; évaluation des politiques environnementales	alban.thomas@inrae.fr
O'Donohue, Michael	Toulouse Biotechnology Institute (TBI) Biotechnologie - enzymologie	michael.odonohue@inrae.fr
De Vries, Hugo	Ingénierie des Agropolymères et Technologies Emergentes (IATE) – Aliments - biomatériaux – Procédés.	hugo.de-vries@inrae.fr
Axelos, Monique	Unité Collège de direction Structure et physico-chimie des biopolymères – matériaux biosourcés - colloïdes	monique.axelos@inrae.fr

Abréviations

AB	Agriculture Biologique
ACV	Analyse du Cycle de Vie
AMAP	Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne
BBI JU	Bio-based industries joint undertaking
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège à Nitrates
CIVE	Culture Intermédiaire à Vocation Energétique
COP 21	Conference Of Parties 21
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DERU	Directive Eaux Résiduaires Urbaines
EDP	Equations aux Dérivés Partielles
EIT	Ecologie Industrielle et Territoriale
FAO	Organisation des Nations unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IA	Intelligence Artificielle
IGN	Institut national de l'information géographique et forestière
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
INRAE	Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement.
IRSTEA	Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
NIMBY	Not in my back yard (pas chez moi)
NIRS	Near Infrared Spectroscopy
ODD	Objectifs de Développement Durable
ONRB	Observatoire National des Ressources en Biomasse
p/p	poids pour poids
SHS	Sciences Humaines et Sociales
TGAP	Taxe Générale sur les Activités Polluantes
TRL	Technology Readiness Level (Niveau de maturité technologique)

SYNTHESE OPERATIONNELLE

Les enjeux pour la bioéconomie

Les défis mondiaux du 21^{ème} siècle sont nombreux et majeurs : le changement climatique, la raréfaction rapide des ressources naturelles, la dégradation des terres et des écosystèmes avec une perte majeure de biodiversité, l'insécurité alimentaire et nutritionnelle, les inégalités d'accès aux ressources, à l'éducation et à la santé, l'urbanisation. La recherche, les entreprises et les sociétés humaines doivent donc imaginer et trouver de nouveaux moyens de produire, d'utiliser et de consommer, qui respectent les limites écologiques de la planète et assurent la sécurité alimentaire, énergétique et le bien-être des populations.

C'est dans ce cadre que la bioéconomie est très souvent mise en avant comme une des solutions pour relever ces défis. En effet la bioéconomie est définie, au niveau européen, comme le développement d'une économie circulaire et durable, fondée sur la production, la transformation et le recyclage de ressources biologiques renouvelables, permettant en particulier de substituer du carbone renouvelable au carbone fossile, et contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre, tout en préservant les ressources naturelles, la biodiversité et en amplifiant les services écosystémiques¹. En cela elle répond parfaitement aux enjeux du Pacte Vert pour l'Europe². Ce passage d'une économie pétro-sourcée vers une économie biosourcée, qui est proposé au travers de la bioéconomie, apparaît comme un moyen majeur pour lutter contre le changement climatique et faire face aux questions de sécurité énergétique mais aussi de sécurité alimentaire et nutritionnelle.

L'enjeu est donc bien plus complexe qu'un changement de ressources. Pour mener à terme cette transition, il est essentiel de prendre en compte simultanément les concepts de durabilité et d'économie circulaire et d'analyser les tensions physiques et écologiques de la production et de la disponibilité réelle de la biomasse et de l'utilisation optimale et responsable des matières premières, ce qui change radicalement toutes les interactions entre les acteurs économiques. En effet le développement des produits et services biosourcés, en substitution de ceux issus de la pétrochimie, ne peut s'opérer que si les solutions qu'ils apportent sont plus compétitives, à la fois sur les dimensions coûts et prix, qualités et fonctionnalités. Dans le cas des marchés de commodités, les coûts des produits biosourcés seront fortement dépendants des coûts de la matière première et dépendront donc de la concurrence entre usages de cette matière première. Au-delà des évolutions de l'offre et de la demande, l'orientation des marchés dépendra aussi des choix politiques faits en matière de taxation des activités polluantes (taxe carbone), de réglementations sur l'exploitation des ressources naturelles, d'appui des budgets publics aux investissements verts, et d'organisation du commerce international. Ces choix sont fortement dépendants des rapports de force entre différents groupes d'intérêt, des engagements internationaux, et des exigences de la société civile. Les marchés et filières de la bioéconomie doivent donc également être analysés au prisme de tensions économiques et socio-politiques favorisant ou non leur émergence. En parallèle, la dynamique de l'offre industrielle de produits biosourcés (et son potentiel économique en matière d'emplois et de création de valeur ajoutée au niveau des territoires) constitue un facteur d'influence indirect sur les politiques publiques (réglementation, politiques d'accompagnement incitatives) et sur la construction de normes sociales. Enfin les choix politiques aux différentes échelles (locales, nationales, européennes, internationales) poseront la question des modèles de croissance que notre société souhaite privilégier dans l'avenir, comme par exemple les propositions pour des modes de consommation plus sobres, recentrés sur les ressources locales, et respectant les limites écologiques de la biosphère.

¹ A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment- Updated Bioeconomy Strategy –EC 2018 - doi:10.2777/792130.

https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/ec_bioeconomy_strategy_2018.pdf#view=fit&pagemode=none

² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN>

Vision et priorités pour INRAE :

La vision de l'institut est d'apporter des connaissances, sources d'innovations, et d'éclairer les décisions publiques pour une bioéconomie durable, circulaire, ancrée dans les territoires,

- qui contribue à une économie neutre pour le climat,
- qui restore les ressources naturelles, la biodiversité et amplifie les services écosystémiques,
- qui contribue au développement des territoires,
- qui s'adapte aux conséquences du changement climatique.

Cette vision s'articule autour de **quatre défis prioritaires** comme illustré sur la figure ci-après :

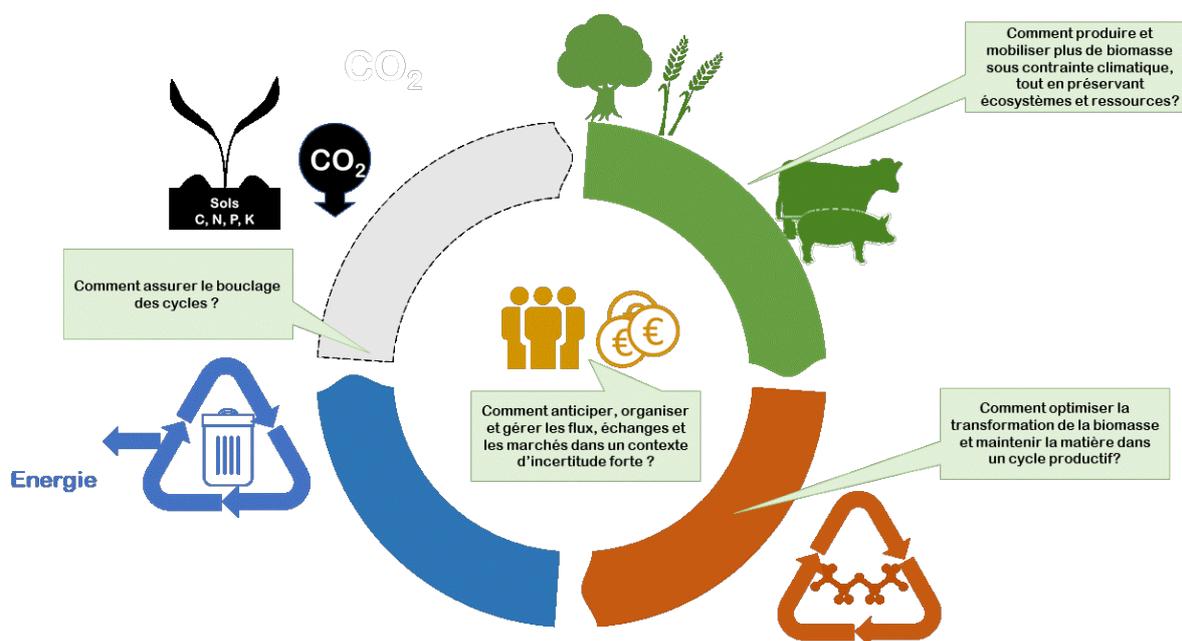


Figure 1 : les quatre défis prioritaires de la bioéconomie pour INRAE

1. Comment produire et mobiliser plus de biomasse sous contrainte climatique tout en préservant écosystèmes et ressources ?

Diminuer notre dépendance des pétro-ressources exigera, entre autres solutions, de produire et de mobiliser plus de biomasse semi-naturelle ou cultivée. L'augmentation de la production de la biomasse peut se faire sur la marge extensive – dédier plus de terre à cette production – et sur la marge intensive – en augmentant les rendements et en augmentant les prélèvements dans les territoires qui les permettent. Les enjeux associés sont ceux liés : - aux usages concurrents des terres et des biomasses entre l'approvisionnement alimentaire de l'homme et des animaux et le développement des matériaux, molécules et vecteurs énergétiques, - à la préservation des espaces et ressources naturelles (sols, eau, air) et de la biodiversité, - à l'adaptation des systèmes de production aux changements climatiques. Les questions à résoudre sont donc relatives aux modes d'amplification et de mobilisation des productions agricoles et forestières en conditions incertaines, de l'équilibre à trouver sur l'allocation des terres et du partage de la biomasse entre retour au sol direct ou via recyclage, exportation hors champ, usages alimentaires et non-alimentaires et conservation des ressources naturelles. Ces questions se déclinent du local au global, la nature des services écosystémiques, les besoins et usages ou la vulnérabilité des systèmes variant entre ces différentes échelles.

Trois priorités ont été retenues :

- Développer des systèmes agroécologiques pour intensifier la production durable de biomasse.
- Evaluer la disponibilité et la qualité des biomasses agricoles, forestières et des coproduits au travers de modèles prédictifs.
- Evaluer les effets de l'intensification des productions, mobilisations et usages de la biomasse.

Développer des systèmes agroécologiques pour intensifier la production durable de biomasse

L'allocation des terres entre usages agricoles, forestiers, urbains, récréationnels et patrimoniaux est à l'origine de tensions fortes. L'augmentation de la biomasse disponible pour la bioéconomie devra ainsi préférentiellement se faire via une augmentation des rendements et des mobilisations. Cependant, pour réduire de manière durable notre dépendance aux ressources non renouvelables, l'intensification des systèmes de production de biomasse doit s'appuyer sur l'amplification des services écosystémiques plutôt que sur l'usage accru d'intrants de synthèse. Ce principe est à la base des systèmes agroécologiques. Amplifier les services écosystémiques, supports de la production de biomasse, nécessite le plus souvent une diversification des productions en place. Cette diversification, en plus de favoriser la résilience des systèmes, crée des opportunités croisées entre bioéconomie et agroécologie. La bioéconomie peut fournir des débouchés non alimentaires aux produits diversifiés issus des systèmes agroécologiques, en retour, l'agroécologie, via la réduction des intrants de synthèse et une plus grande diversification peut permettre d'assurer une bioéconomie durable et résiliente face aux changements globaux. Il est donc nécessaire de développer des recherches visant à concevoir et évaluer des systèmes de production agroécologiques permettant de répondre aux besoins de la bioéconomie. Elles doivent permettre d'identifier les boucles de rétroaction et renforcer les liens entre agroécologie et bioéconomie, de l'échelle de la parcelle et de l'exploitation, aux échelles locales et régionales, voire nationales.

La transition des systèmes agricoles actuels vers des systèmes agroécologiques nécessite un accompagnement des acteurs dans les territoires. Des recherches permettant de mieux comprendre les freins et leviers, techniques mais également organisationnels, sociaux ou économiques permettant cette transition doivent être soutenues ainsi que des recherches participatives dans les territoires. De même, pour la forêt il s'agira de créer des outils innovants, basés sur des approches en Sciences Humaines et Sociales ou sur des approches participatives, pour amener à une mobilisation accrue des bois des petites forêts privées, tout en maintenant les autres services écosystémiques.

Evaluer la disponibilité et la qualité des biomasses agricoles et forestières et des coproduits au travers de modèles prédictifs

Les décideurs politiques et les différents opérateurs de la bioéconomie ont aujourd'hui besoin de connaître et de prévoir la disponibilité des biomasses agricoles et forestières adaptées aux différents usages pour planifier et investir le développement de nouvelles activités en étant assurés de la durabilité des différentes ressources. La disponibilité et la qualité des biomasses forestières et agricoles est variable dans le temps et l'espace en fonction des potentialités des territoires et des systèmes, des cycles de production et des usages existants. Evaluer de manière dynamique et spatialement explicite la disponibilité et les propriétés des biomasses nécessite le suivi fin des ressources et usages existants ainsi que la construction de modèles prédictifs de rendements et mobilisation. Cela suppose de développer les modèles économiques d'échanges et d'usages des terres existants, en incluant l'offre et la demande de biomasse primaire et secondaire issue du recyclage (effluents et biodéchets agricoles forestiers et urbains). De même, il est nécessaire d'améliorer les modèles agronomiques et forestiers et la compréhension des déterminants des choix des acteurs de la bioéconomie pour estimer et anticiper la disponibilité des biomasses. Il s'agira notamment d'intégrer les incertitudes relatives aux productions agricoles et forestières liées aux changements globaux, tels que les événements climatiques extrêmes, l'accroissement des pestes et des épidémies animales... et de mesurer l'impact de ces incertitudes sur les choix de production et de localisation. Ces travaux permettront de disposer de projections sur les besoins et disponibilités en biomasse en France sous différents scénarios d'évolution de la consommation en produits biosourcés ou d'évolutions climatiques ou sanitaires.

Evaluer les effets de l'intensification des productions, mobilisations et usages de la biomasse

Evaluer les effets de différents scénarios d'intensification des productions, de mobilisation et de recyclage des biomasses et de développement des usages de produits biosourcés est essentiel au développement d'une bioéconomie durable. Il s'agira d'approfondir les méthodes d'évaluation multicritères notamment aux échelles territoriales (Analyse de Cycle de Vie, métabolisme, impacts économiques, etc.) en incluant l'ensemble des effets à prendre en compte. De nouveaux indicateurs propres à l'évaluation des systèmes bioéconomiques seront à proposer à différentes échelles et à intégrer dans les méthodes multicritères, notamment pour assurer la neutralité de la bioéconomie en termes d'usages et d'impact sur les ressources naturelles (eau, terres, sols, air) et la biodiversité.

2. Comment optimiser la transformation des biomasses et maintenir la matière dans un cycle productif ?

En raison de sa faible densité en énergie et en carbone, sa complexité chimique et structurale, sa diversité et souvent sa saisonnalité, la biomasse est une ressource considérablement plus difficile à exploiter que le pétrole qui constitue la matière première principale sur laquelle repose toute notre économie actuelle. Par conséquent l'utilisation de la biomasse comme matière première pour une large gamme de transformations industrielles, impose de traiter les trois priorités suivantes :

- Aller vers de nouvelles technologies et organisation industrielles pour répondre aux défis de la mobilisation de la biomasse.
- Développer des systèmes catalytiques et procédés pour transformer la biomasse.
- Qualifier la biomasse pour optimiser les usages dans des approches en cascade.

Aller vers de nouvelles technologies et organisations industrielles pour répondre aux défis de la mobilisation de la biomasse.

La faible densité, la saisonnalité et la périssabilité de la biomasse représentent des défis technologiques, organisationnel et économiques considérables tant sur le plan du transport que du stockage avant transformation. Utiliser de la biomasse exige de stocker des volumes considérables sur les sites de transformation et la saisonnalité de la plupart des espèces impose de fonctionner avec plusieurs matières premières, structurellement et chimiquement différentes. Pour faire face à ces défis, il est nécessaire de concevoir des technologies à la fois flexibles en termes de matières entrantes, mais robustes en termes d'aptitudes à produire des molécules cibles à qualité constante. La notion de descripteurs de la qualité de la biomasse et du lien à sa transformation doit donc être abordée à ce niveau. Une des solutions serait de densifier la biomasse et de la stabiliser au plus près des lieux de sa production. Cela permettrait le retour au sol en circuit court de certains de ces composants (y compris l'eau), assurerait un meilleur contrôle des pertes et gaspillage, dès l'origine de la chaîne de valeur (circularité). Pour parvenir à ces objectifs, il est nécessaire d'identifier des solutions technologiques adéquates et de travailler sur le dimensionnement et la technicité de celles-ci en tenant compte des organisations sociales et la disponibilité des compétences. Une telle réorganisation des filières pourrait permettre aux producteurs de biomasses de capter une plus grande part de la nouvelle valeur produite. De même, il est nécessaire d'aborder l'organisation des filières dans des territoires en tenant compte des attentes socioéconomiques.

Développer des systèmes catalytiques et procédés pour transformer la biomasse.

Composée majoritairement de macromolécules polyhydroxylées, contenant en plus du carbone d'autres atomes (notamment N et P), la biomasse se différencie radicalement des ressources fossiles. A cela s'ajoute la complexité de la biomasse, organisée des échelles nanoscopiques aux échelles macroscopiques. En conséquence, la chimie actuelle est peu adaptée à la bioéconomie. En revanche, les systèmes biocatalytiques (enzymes, microorganismes et consortia microbiens) et la chimie verte offrent de nouvelles solutions innovantes. Toutefois, il est nécessaire de poursuivre la maturation de ces technologies tout en s'assurant de leur durabilité économique et environnementale, et de leur acceptabilité sociale. Pour cela, il est indispensable d'accélérer la modélisation de nouvelles opérations unitaires et la création de simulateurs, et le développement d'approches d'écoconception et d'intensification permettant d'optimiser les procédés

pour une opération à différentes échelles. La facilité d'insertion à différents endroits, de l'amont à l'aval des chaînes de valeur doit également être prise en compte.

Qualifier la biomasse pour optimiser les usages dans des approches en cascade.

La complexité et la diversité des biomasses offrent une multiplicité de possibilités en termes de produits. Toutefois, pour réaliser pleinement le potentiel de la bioéconomie il est indispensable d'approfondir nos connaissances des biomasses aux différentes échelles d'observation pertinentes et aux différentes étapes de transformation de façon à appréhender la structure et la réactivité des différentes ressources entrant dans les filières bioéconomiques. De même, pour transformer la biomasse en une large gamme de produits biosourcés aux propriétés d'usage attendues, il est nécessaire de développer par une approche d'ingénierie inversée des itinéraires de transformation appropriés pour les différentes molécules, macromolécules et structures méso- ou macroscopiques caractéristiques de la biomasse, focalisant l'effort sur des itinéraires en cascade, où les différents composants de la matière première sont valorisés de façon optimale et où l'entropie associée à chaque étape de la cascade est limitée au juste maximum. Ces usages en cascade doivent être anticipés afin de réduire les déchets et d'organiser la fin de vie et le recyclage des co-produits.

3. Comment assurer le bouclage des cycles ?

L'utilisation sobre et efficace des biomasses et des produits organiques, incluant les ressources d'origine résiduaire, nécessite de mieux gérer les cycles couplés du carbone et des éléments majeurs (azote, phosphore). L'objectif du bouclage de ces cycles, mais aussi d'économie de la ressource en eau et d'accroissement de l'autonomie énergétique, est primordial et va de la production des biomasses à la valorisation des résidus, en passant par le choix d'itinéraires de transformation adaptés. Cet objectif se décline autour de trois priorités :

- Positionner les systèmes de culture au cœur de la bioéconomie.
- Optimiser les procédés et filières de valorisation des ressources d'origine résiduaire.
- Optimiser les filières proposées et leur insertion dans les territoires.

Positionner les systèmes de culture au cœur de la bioéconomie.

Il s'agit d'une part de minimiser les pertes et les intrants chimiques, et d'autre part de développer des systèmes de culture et des pratiques culturales innovants, en lien avec les cycles biogéochimiques pour réduire l'ouverture de ces cycles. Les objectifs sont ici d'améliorer les pratiques de fertilisation, avec un recours éventuel à des matières fertilisantes d'origine résiduaire (dont les eaux usées traitées), de mieux connaître les processus et les interactions entre fonctions physiques, chimiques et biologiques des sols en lien avec les plantes, et enfin d'identifier à l'aide de modèles numériques les pratiques culturales les plus appropriées dans un contexte de bioéconomie, en particulier territoriale.

Optimiser les procédés et filières de valorisation des ressources d'origine résiduaire.

Tout autant que la biomasse, les ressources d'origine résiduaire (eaux, déchets...) sont amenées à varier grandement, tant en quantité qu'en qualité et hétérogénéité, dans le temps et dans l'espace. En particulier, les pas de temps associés peuvent être journaliers, hebdomadaires, mensuels ou saisonniers. Ce faisant, à l'instar des biomasses primaires, il y a une nécessité à pouvoir les caractériser rapidement, si possible en temps réel, afin d'appréhender leurs variabilités temporelles et spatiales. Leurs propriétés fonctionnelles devront aussi être caractérisées rapidement pour ensuite pouvoir optimiser une utilisation intégrée et multi-composantes de leur valorisation. De nouveaux itinéraires de transformation pourront ainsi être imaginés et devront inclure le nécessaire retour au sol des matières, y compris de l'eau, tout en garantissant l'innocuité environnementale et sanitaire des produits biosourcés obtenus et des filières proposées. L'ambition est également ici de revisiter les liens et les interactions entre villes et campagnes pour favoriser l'acceptabilité par les territoires urbains de produits issus de filières ayant recyclé les déchets de ces territoires.

Optimiser les filières proposées et leur insertion dans les territoires.

Assurément, les conflits potentiels d'usage des biomasses et de recyclage des déchets (e.g., retour au sol versus exportation sous forme d'énergie ou de matières premières secondaires) doivent être levés et les filières proposées devront explicitement les minimiser. Cela nécessitera d'accompagner les acteurs dans cette évolution grâce à des modèles économiques différents de ceux actuels, des évolutions organisationnelles dans la gestion des flux et de nouvelles formes de coopération entre les acteurs des territoires.

4. Comment anticiper, organiser et gérer les flux, les échanges et les marchés dans un contexte de forte incertitude ?

Un développement significatif de la bioéconomie conduira à une remise en cause des flux de matière et des flux financiers associés. Les ressources biosourcées, ressources primaires mais aussi résidus ou biodéchets, verront leur demande s'accroître, générant des tensions sur les marchés et donc sur leurs prix. Inversement, les ressources issues de la pétrochimie verront leur demande se réduire, remettant en cause une partie des investissements déjà réalisés, mais pouvant aussi susciter des stratégies visant à éviter une chute radicale des productions. De tels changements majeurs posent de nombreuses questions : comment s'établissent ces nouveaux marchés de ressources biosourcées, de co-produits et de déchets ? Comment émergent de nouvelles filières et de nouveaux acteurs économiques susceptibles de valoriser ces ressources et d'offrir une panoplie de services nouveaux dans un cadre institutionnel et réglementaire qui les méconnaît ou n'évolue pas assez rapidement ? Comment adapter les infrastructures à ces changements et comment les acteurs en place tentent de maintenir leurs positions ?

Aux incertitudes inhérentes au développement d'innovations telles que celles concernant le potentiel des nouvelles technologies et les controverses sociales les accompagnant, les attentes parfois contradictoires des consommateurs, les incertitudes quant à l'évolution des réglementations s'ajoutent les incertitudes liées à la variation de l'offre de biomasse et la volatilité des prix qui l'accompagne. Incertitude, renforcée par le contexte de changement climatique, qui doit s'analyser également dans la perspective de l'ensemble des utilisations de la biomasse, en particulier la satisfaction des besoins alimentaires d'une population croissante. Ces incertitudes, notamment celles liées aux tensions sur les marchés, impacteront à la fois les décisions privées, d'investissement notamment, mais aussi les politiques publiques.

Cette question s'organise autour de trois priorités :

- Analyser la dynamique de la demande par les consommateurs et les firmes pour les produits biosourcés.
- Repenser l'organisation des relations marchandes et contractuelles entre les (nouveaux) acteurs des filières et des territoires.
- Proposer et évaluer des politiques incitatives et réglementaires pour promouvoir la circularité et les produits biosourcés, gérer les risques.

Analyser la dynamique de la demande par les consommateurs et les firmes pour les produits biosourcés

Les recherches devront s'orienter vers l'analyse de la dynamique de la demande pour les produits biosourcés des consommateurs finaux, mais aussi des consommateurs intermédiaires, firmes utilisant ces produits pour la production de biens finaux. Elles devront également permettre de « qualifier » ces produits en termes d'information pour le consommateur, qui devra être informé de leurs caractéristiques. A noter, ce type de qualification des produits s'applique de façon plus générale, notamment aux produits issus de la pétrochimie. Cette démarche comporte donc des enjeux de définition des indicateurs, de traçabilité, d'information du consommateur et de labélisation. A noter que la « qualification » des produits devra en toute logique s'étendre aux produits non-biosourcés (issus par exemple du secteur pétrochimique), pour éviter un traitement asymétrique des filières devant l'information disponible au stade des décisions du consommateur final. L'appropriation, ou le rejet, par la société des projets de développement de la bioéconomie doit par ailleurs être anticipée. Une réflexion doit être co-conduite sur les moteurs de cette appropriation avec l'ensemble des acteurs.

Repenser l'organisation des relations marchandes et contractuelles entre les (nouveaux) acteurs des filières et des territoires

L'analyse des relations contractuelles et du partage de la valeur ajoutée et du risque aux différentes étapes des filières demeure un enjeu fort pour le développement de la bioéconomie qui est en compétition avec le secteur pétrochimique. Mais il faut aussi innover dans l'organisation et la coordination verticale et horizontale au niveau des territoires, penser l'application des modèles d'économie sociale et solidaire à ces filières, organiser la construction de nouveaux marchés, définir les possibilités de signalisation de nouveaux produits ou de nouvelles caractéristiques des produits.

Proposer et évaluer des politiques incitatives et réglementaires pour promouvoir la circularité et les produits biosourcés, gérer les risques

La compétitivité des produits pétrosourcés repose en partie sur l'absence de prise en compte des impacts négatifs que leur production et consommation génèrent (ce que ne font pas, ou à un moindre degré, d'autres filières). Ces impacts non désirables devraient donc être intégrés dans les indicateurs de performance des économies pour l'ensemble de leurs activités productives, y compris la bioéconomie. Si le développement de la bioéconomie doit passer par une valorisation marchande des caractéristiques de ses produits (plus faible impact sur les ressources naturelles et l'environnement), alors l'ensemble des filières (y compris la bioéconomie) devra faire l'objet d'une évaluation de performance globale (Analyse de Cycle de Vie par exemple). Le développement de la bioéconomie nécessite également la mise en place de politiques incitatives et réglementaires qu'il s'agit de justifier, définir et évaluer, politiques qui devront être basées sur l'évaluation des performances globales comparées ci-dessus, intégrant ainsi les facteurs négatifs liés à la production de produits pétrosourcés. Les politiques incitatives à mettre en place devront également être conçues en fonction des propriétés souhaitées des filières de la bioéconomie (meilleure gestion des ressources locales, par exemple) et des propriétés attendues des instruments de politique (coût-efficacité, etc.)

Au-delà des enjeux directs liés aux usages de la biomasse, il est nécessaire de considérer les relations entre filières « bioéconomiques », celles basées sur les ressources fossiles non renouvelables et celles basées sur les ressources renouvelables non-biomasse (éolien, transports électriques...) et le rôle des politiques publiques dans leur compétitivité à long terme. La compatibilité des nombreuses politiques sectorielles devant être interrogées.

De nombreuses opportunités pour développer la bioéconomie sont souvent inexploitées en raison d'une information lacunaire sur les performances et/ou la rentabilité attendue d'entreprises ou de cluster d'entreprises de produits biosourcés. Le chemin vers des filières « rentables » de bioéconomie peut être analysé à partir de succès avérés et documentés, mais des enseignements peuvent également être tirés des échecs observés de certaines entreprises ou filières, permettant la construction de typologies voire d'une analyse statistique des déterminants du succès.

La bioéconomie à l'échelle des territoires

Les questions de recherche inscrites dans les quatre grands défis précédents peuvent être déclinées sur les dimensions territoriales de la transition vers une bioéconomie circulaire et durable, à la fois dans une visée de production de connaissances répondant aux enjeux territoriaux et permettant d'instruire des questions à des échelles plus larges, et dans une visée opérationnelle pour tester la pertinence et l'impact des résultats de recherche sur des cas concrets.

Les territoires représentent une entrée particulièrement pertinente pour étudier la transition vers la bioéconomie. Les territoires sont en effet les lieux de gouvernance et de décision politique, mais aussi d'identité historique et culturelle, et d'expression citoyenne. Ce sont aussi des espaces gérés au carrefour des questions d'organisation des flux (localisation des activités, infrastructures, mobilités), de production alimentaire et non-alimentaire, d'aménagement et de préservation des écosystèmes locaux. L'échelle du territoire pour le déploiement de la bioéconomie représente donc des opportunités qu'il faut savoir créer et évaluer mais elle impose aussi des contraintes spécifiques, notamment sur les conditions de rencontre de l'offre et de la demande, l'adaptation des procédés et technologies à une biomasse en partie sourcée localement, la reconception des systèmes productifs locaux, et l'aménagement du territoire. Elle exige aussi

de travailler aux interfaces avec les autres échelles d'intervention et de décision, du très local au multi-territorial et au global. Les territoires peuvent donc être des lieux où se réorganise une économie davantage fondée sur la circularité des matières et les bio-ressources. Ils peuvent aussi être des facteurs d'inertie et de blocage, de polarisation des conflits. A ce titre, les trajectoires territoriales des transitions bioéconomiques sont porteuses d'enseignement sur les conditions de déploiement de la bioéconomie à plus grande échelle.

L'échelle des territoires permet d'articuler une recherche ancrée sur quelques cas démonstrateurs à visée opérationnelle forte avec une recherche plus générique pour lever certains verrous scientifiques transversaux spécifiques aux enjeux territoriaux de la bioéconomie. Les actions de recherche sur les territoires démonstrateurs peuvent se structurer autour de trois axes contribuant à la conception de nouvelles organisations visant à concilier productions alimentaires, non-alimentaires et préservation des ressources naturelles comme illustré ci-après :

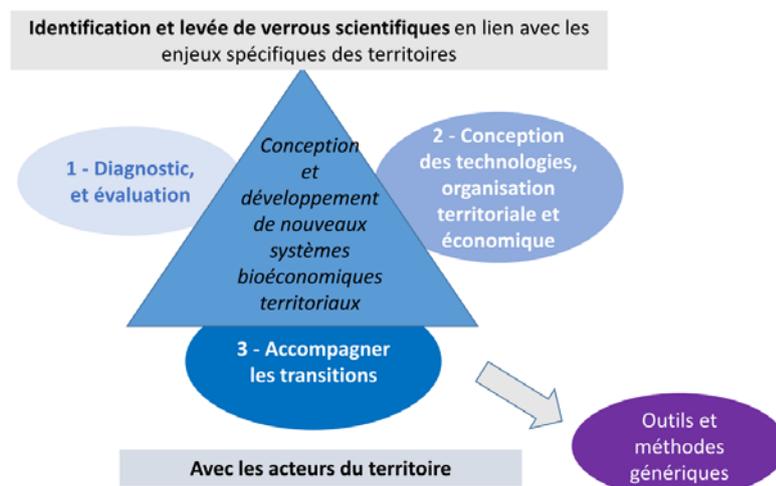


Figure 2 : Structuration des actions de recherche sur les territoires

Diagnostic et évaluation :

Il s'agit d'une part d'établir des outils de diagnostic fiables, robustes et capables de tirer parti des nouvelles données spatiales, numériques et administratives disponibles. L'établissement de métriques et de méthodologies adaptées pour mesurer le métabolisme des territoires, le potentiel des biomasses et produits résiduels organiques mobilisables, leurs usages actuels et potentiels permettront de mesurer le degré d'autonomie de projets locaux, leurs dépendances aux filières plus longues et aux pétro-ressources, et les coordinations nécessaires au sein du territoire et avec d'autres territoires. Il s'agit d'autre part de construire des méthodologies d'évaluation multicritère des performances de la bioéconomie à l'échelle des territoires vis-à-vis de la durabilité, ce qui pose des aussi questions de recherche plus générique sur la mesure de ces performances, leur éventuelle agrégation, et les changements d'échelle. Un enjeu est de trouver le bon équilibre entre des modèles sophistiqués et lourds à renseigner et des modèles moins détaillés mais plus réactifs.

Conception de systèmes de production, organisation territoriale et économique :

Il s'agit de construire des réponses innovantes pour une bioéconomie adaptée aux contraintes et répondant aux opportunités offertes par les territoires. Il existe des verrous à lever pour concevoir une réorganisation agricole et industrielle moins fondée sur la recherche d'économies d'échelle mais plutôt sur les complémentarités de localisation d'activités, dans une logique d'écologie industrielle et territoriale: systèmes agro-écologiques multiservices, downsizing et multiscaling (implantation de plusieurs petits réacteurs modulables et adaptables à la biomasse potentiellement mobilisable), méthodes flexi-robustes de transformation de la biomasse, réorganisation territoriale des flux et des transports, création de nouveaux marchés

Analyse et accompagnement des transitions :

Les territoires sont souvent vus comme des leviers de la transition bioéconomique mais ils peuvent aussi être porteurs d'inerties et de blocage. Il s'agira d'analyser les facteurs de réussite et d'échec, notamment au regard des controverses sociales, de l'expression des groupes d'intérêt, des formes d'opposition et de soutien aux projets bioéconomiques. Cette analyse éclairera les outils d'accompagnement des dynamiques territoriales qui peuvent être construits pour faciliter la co-innovation, le dialogue citoyen, et l'acceptabilité de l'action publique.

Les sciences et technologies du numérique pour le développement de la bioéconomie

Pour accompagner la transition du renforcement bioéconomique, il est nécessaire aussi de disposer de données, d'outils d'évaluation et d'aide à la décision et de formuler des scénarios testables par ces outils, de manière à évaluer la pertinence économique, les risques sanitaires, sociaux et environnementaux associés à ces nouveaux modèles productifs et proposer des indicateurs de progrès. Parmi ces outils, certains peuvent : 1) permettre d'évaluer les ressources (quantitativement et qualitativement) 2) de les coordonner ; 3) de gérer la concurrence ou les synergies entre usages.

Des données...

Un inventaire exhaustif des données disponibles et utilisables pour réaliser ces évaluations doit être mené. Il pourra conduire à de nouvelles collectes de données si nécessaire. Les différents modèles et diagnostics envisagés reposent notamment sur des données spatialisées (Lidar pour les ressources forestières) ou d'observation (zones ateliers). Les outils numériques autour de la gestion (bases de données) et l'analyse des données pour la restitution de l'information doivent être encouragés pour assurer le développement de la bioéconomie. La gestion de données importantes (en volume) et hétérogènes (en sources) pourra être traitée par des outils basés sur l'intelligence artificielle, adaptés aux caractéristiques des systèmes bioéconomiques.

... aux modèles bioéconomiques

Une partie de ces données pourront être ensuite utilisées et/ou intégrées dans des modèles statistiques, statiques ou dynamiques. Parmi les modèles non dynamiques nous pouvons citer les modèles d'analyse de cycle de vie (ACV) permettant d'évaluer les impacts environnementaux des nouveaux modèles productifs. Les ACV classiques mais aussi les ACV territoriale et sociale permettent d'évaluer les différentes dimensions de la transition des modèles productifs, en lien avec les approches d'écologie industrielle et territoriale. Ces modèles d'ACV sont basés sur des approches matricielles comportant un grand nombre de processus, amenant ainsi des problématiques en terme de modélisation.

Ces données peuvent également être intégrées à des modèles dynamiques socio-économiques de gestion des bioressources, de quantification des flux de matière mobilisés, de comportement socio-économique des acteurs, de production de l'appareil industriel afin d'évaluer la viabilité de telles transitions. Afin d'analyser de tels systèmes complexes, les approches dynamiques peuvent également permettre une compréhension des mécanismes menant à l'émergence de comportement collectifs. Parmi ces outils, nous pouvons citer les approches basées sur le métabolisme urbain, la théorie des jeux, ou encore les approches basées sur les équations différentielles – déterministes ou stochastiques - qui sont classiquement utilisées pour modéliser et caractériser les dynamiques de systèmes (équilibres d'exploitations, évolution des biomasses etc). Les modèles multi-agents, quant à eux, décrivent les comportements individuels d'agents en interaction entre eux-mêmes et avec leur environnement. Ce type d'approches, notamment lorsqu'elles sont spatialisées, sont particulièrement propices à la prise en compte de la dimension territoriale des systèmes bioéconomiques. Cependant les modèles bioéconomiques – impliquant une complexité importante - peuvent présenter un grand nombre de variables d'état rendant difficile leur analyse théorique et leur exploration. Il est alors nécessaire de développer des stratégies d'exploration et d'analyse de sensibilité de ces modèles à travers de nouvelles avancées technologiques et algorithmiques.

Des données, des modèles et des indicateurs pour l'aide à la décision

Une fois les systèmes bioéconomiques formalisés à travers l'analyse de données et/ou de modèles, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la décision prenant en compte à la fois les dimensions spatiales

et temporelles de la bioéconomie. Les méthodes classiques d'aide à la décision consistent à déterminer des politiques d'action par rapport à des objectifs de développement durable. Ces méthodes sont essentiellement basées sur des approches d'optimisation multicritères. Cependant, les solutions résultantes peuvent être fragiles lorsqu'elles sont soumises à des événements incertains. Une autre approche consiste à définir un ensemble de solutions respectant des un ensemble de contraintes sociales, économiques et environnementales. Cet ensemble de contraintes permet de définir un espace de fonctionnement sûr (« *safe operating space* ») dans lequel il est souhaitable de rester durant un temps défini. Les méthodes telles que la théorie de la viabilité ou les approches de type « *tolerable window approach* » permettent de proposer un ensemble de politiques d'actions qui satisfont l'ensemble de ces contraintes et qui peuvent être mises en balance dans un second temps par rapport à d'autres critères, qui peuvent être qualitatifs.

In fine, les modèles et outils de diagnostics et les données qui y sont utilisées doivent permettre de concevoir des indicateurs permettant de rapidement quantifier le progrès vers la bioéconomie. Ces indicateurs pourraient être du type : pourcentage de bio-ressources entrées dans les processus, nombre de producteurs de bio-ressources impliqués, nombre d'emplois régionaux créés dans la bioéconomie, niveau financier des aides de l'Etat ou des Régions, rapport entre progrès/investissements institutionnels....

Pour résumer les fronts de science du numérique pour une bioéconomie durable sont le :

- Développement des approches intégrées et systémiques prenant en compte les aspects dynamiques de la bioéconomie,
- Acquisition et traitement de données hétérogènes ; gestion des données manquantes à travers notamment l'utilisation de l'intelligence artificielle,
- Développement d'outils comme l'aide à la décision multicritères et multi-échelles,
- Développer des indicateurs agrégés pour appuyer les politiques publiques.

Recommandations

A l'issue de cette analyse prospective un certain nombre de recommandations peuvent également être faites afin d'accompagner les acteurs d'INRAE dans le déploiement des recherches en bioéconomie :

Fédérer une communauté scientifique :

- Organiser un séminaire de restitution de cette prospective,
- Conduire une analyse stratégique nationale et européenne des partenaires principaux,
- Favoriser l'animation scientifique interne autour des 4 défis,
- Favoriser l'animation scientifique sur site avec nos partenaires (séminaire- école chercheurs ...).

Soutenir des recherches interdisciplinaires :

- Porter un métaprogramme sur la « **Bioéconomie pour les territoires urbains** »,
- Favoriser les projets entre départements pour développer une approche plus systémique de la bioéconomie.

Développer nos partenariats sur le territoire national :

- Participer à la formation dans l'enseignement supérieur sur la bioéconomie,
- Participer à ou encourager le montage de chaires industrielles,
- Engager localement des actions avec les collectivités locales et territoriales et la société civile,
- Développer nos partenariats avec les autres instituts de recherche notamment dans le domaine de la chimie verte ou des biocarburants (CNRS – IFPEN – AgroParisTech, Universités).

Faire d'INRAE un leader européen et international de la bioéconomie à l'échelle de 10 ans :

Par un positionnement scientifique reconnu :

- Accroître notre visibilité en tant qu'institut : accroître le nombre de publications et mieux les identifier sous ce vocable, définir une stratégie de communication sur nos travaux dans ce domaine, travailler au transfert de nos travaux vers d'autres sphères,

- Venir en appui à la politique publique nationale et européenne (document d'orientation stratégique, notes de synthèses, expertises et études),
- Organiser des manifestations européennes et internationales dans le domaine de la bioéconomie,
- Développer des programmes de R&I internationaux en lien avec les ODD³.

Par une stratégie/politique institutionnelle proactive :

- Etre présent dans les instances internationales et européennes, au niveau national participer aux Alliances ALLENI et ANCRE,
- Développer nos accords-cadres avec les universités de l'European Bioeconomy University⁴ et avec d'autres partenaires internationaux majeurs du domaine,
- Apporter notre éclairage dans les instances de la Commission européenne.

Développer des outils, des méthodes et des infrastructures

- Développer une stratégie d'acquisition, d'accès et de partage des données en interne et coordonnée avec nos partenaires,
- Développer une plateforme spatialisée de modélisation,
- Développer la modélisation dynamique et le couplage de modèles,
- Développer des méthodes et des outils d'aide à la décision d'évaluation et multicritères, des approches de type diagnostic, bilan, analyse de flux (métabolisme), ,
- Soutenir et promouvoir nos infrastructures nationales (e.g. TWB⁵) et européennes en biotechnologie végétale et industrielle (e.g. IBISBA⁶).

³ <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/fr/>

⁴ <https://european-bioeconomy-university.eu/>

⁵ <https://www.toulouse-white-biotechnology.com/>

⁶ <https://www.ibisba.eu/>

RAPPORT

1. INTRODUCTION

1.1. Bioéconomie : des définitions en évolution

Une bioéconomie pour l'Europe

Les défis mondiaux du 21^{ème} siècle sont nombreux et majeurs : le changement climatique⁷ ; la raréfaction rapide des ressources naturelles ; la dégradation des terres⁸ et des écosystèmes avec une perte majeure de biodiversité⁹ ; une population croissante à nourrir ; une urbanisation qui s'accélère. La recherche, les entreprises et les sociétés humaines doivent donc imaginer et trouver de nouveaux moyens de produire, d'utiliser et de consommer, qui respectent les limites écologiques de la planète et assurent la sécurité alimentaire, énergétique et le bien-être des populations.

C'est pour faire face à ces défis qu'en 2012 la Commission européenne a adopté la stratégie « **Innovation pour une croissance durable : une bioéconomie pour l'Europe** ». Celle-ci vise à concilier la sécurité alimentaire et l'utilisation des ressources renouvelables à des fins de production alimentaire et industrielle tout en assurant la protection de l'environnement¹⁰¹¹. La bioéconomie y est définie comme :

La production de ressources biologiques renouvelables et la transformation de ces ressources ainsi que des déchets en produits à valeur ajoutée tels que des aliments pour les hommes et les animaux, des produits biosourcés ou de l'énergie.

Cette stratégie mettait en avant cinq objectifs prioritaires :

1. Assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle,
2. Gérer la durabilité des ressources naturelles,
3. Réduire la dépendance européenne vis à vis des ressources fossiles européennes ou de celles en provenance de l'étranger,
4. Atténuer et s'adapter au changement climatique,
5. Renforcer la compétitivité de l'Europe et créer des emplois.

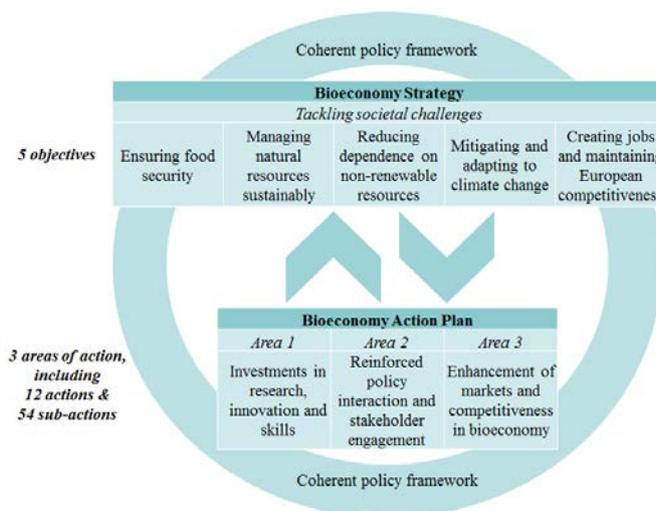


Figure 1 : Représentation schématique de la stratégie européenne Bioéconomie et du plan d'action en 2012¹²

⁷ Warming of 1.5°C

⁸ <https://www.ipcc.ch/srccl/download/> IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems

⁹ https://www.ipbes.net/sites/default/files/downloads/spm_unedited_advance_for_posting_htn.pdf

¹⁰ Innovating for sustainable growth. A Bioeconomy for Europe. <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f0d8515-8dc0-4435-ba53-9570e47dbd51>

¹¹ Patermann, C. & Aguilar, A. The origins of the bioeconomy in the European Union. *New Biotechnology* **40**, 20–2 (2018)

¹² Review of the 2012 European bioeconomy strategy - EC 2017- doi: 10.2777/8814

Cette stratégie a été révisée en 2018 pour la mettre en cohérence avec les politiques européennes en matière d'énergie propre et de développement d'une économie circulaire¹³. **Durabilité et circularité sont maintenant au cœur de la bioéconomie** dont la définition s'est enrichie et précisée :

La bioéconomie couvre tous les secteurs et les systèmes qui s'appuient sur les ressources biologiques (animaux, plantes, micro-organismes et dérivés de la biomasse dont les déchets organiques), leurs fonctions et leurs principes. Cela inclut les écosystèmes marins et terrestres et leurs interconnexions ainsi que les services qu'ils procurent, tous les secteurs de la production primaire qui utilisent et produisent des ressources biologiques (agriculture, forêt, pêche et aquaculture) et tous les secteurs économiques et industriels qui utilisent les ressources biologiques et les transforment pour produire des aliments pour les hommes et les animaux, des produits biosourcés, de l'énergie et des services. Pour assurer son succès, la durabilité et la circularité doivent être au cœur de la bioéconomie. Cela aura pour conséquence le renouvellement de l'industrie, la modernisation des systèmes de production et la protection de l'environnement et conduira au renforcement de la biodiversité.

Les cinq objectifs prioritaires précédents sont réaffirmés et pour les atteindre trois types d'actions nouvelles sont proposés qui mettent en avant :

1. **Le renforcement et le déploiement à grande échelle du secteur des produits biosourcés et la mobilisation des investissements et des marchés,**
2. **Le déploiement rapide d'une bioéconomie locale,**
3. **La prise en compte des limites écologiques de la bioéconomie.**

La bioéconomie dans les pays européens et en France

Depuis 2010, de nombreux Etats-membres ont développé leur propre stratégie pour la bioéconomie. Certains l'ont même déjà révisée depuis, comme l'Allemagne en 2018. A l'heure actuelle, 17 pays ont une stratégie dans ce domaine¹⁴. Ces stratégies nationales ou régionales se déclinent en s'appuyant sur les ressources en biomasse disponibles localement. Par exemple si la stratégie finlandaise est fondée essentiellement sur les ressources forestières¹⁵, au Royaume Uni¹⁶, elle s'appuie sur l'utilisation des déchets et des co-produits. Par contre la stratégie allemande s'appuie plutôt sur l'état de maturité des technologies et des infrastructures¹⁷. Ces stratégies interrogent et anticipent aussi le potentiel de développement du secteur des produits biosourcés au regard des capacités d'investissement, de l'intérêt qu'y portent les citoyens et du consentement à payer des consommateurs¹⁸.

En dépit des spécificités propres à chaque pays, toutes ces stratégies mettent en exergue la nécessité d'une approche systémique des défis pour relever ceux de la bioéconomie. Chaque pays doit ainsi considérer l'ensemble des chaînes de valeur, de la ressource brute jusqu'aux produits et aux consommateurs. Les enjeux de développement d'activités connexes, de la recherche et de l'innovation doivent être pris en compte simultanément. Les approches transdisciplinaires sont également essentielles pour l'innovation technique, organisationnelle et politique pour la bioéconomie, et doivent s'appuyer sur des partenariats public-privé.

Enfin, la réglementation, régulièrement mise en avant pour les nouveaux produits et services, est un facteur déterminant pour installer la confiance nécessaire pour la réussite de la transition vers la bioéconomie dans la société. Par ailleurs, il y a consensus sur la nécessité construire des bases de données pertinentes et de les

¹³ A sustainable bioeconomy for Europe: strengthening the connection between economy, society and the environment- Updated Bioeconomy Strategy –EC 2018 - doi:10.2777/792130. https://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/ec_bioeconomy_strategy_2018.pdf#view=fit&pagemode=none

¹⁴ https://bioekonomierat.de/fileadmin/Publikationen/berichte/GBS_2018_Bioeconomy-Strategies-around-the-World_Part-III.pdf - Pages 73 et 74

¹⁵ <https://www.bioeconomy.fi/facts-and-contacts/finnish-bioeconomy-strategy/>

¹⁶ https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/408940/BIS-15-146_Bioeconomy_report_-_opportunities_from_waste.pdf

¹⁷ https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Biooekonomie_in_Deutschland_Eng.pdf

¹⁸ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1573521416300070> (Sijtsema et al., 2016) et <http://www.bioways.eu/download.php?f=243&l=en&key=faf3e6f477c8183036b6eb591863b6e8>

partager pour développer des scénarios dynamiques d'évolution des bioéconomies, à moyen et long terme, et qui tiendront compte simultanément des spécificités territoriales et des marchés mondiaux.

Au niveau français, la feuille de route « Une stratégie bioéconomie pour la France », publiée début 2017¹⁹ propose la définition suivante :

« La bioéconomie englobe l'ensemble des activités liées à la production, à l'utilisation et à la transformation des bioressources. Elles sont destinées à répondre de façon durable aux besoins alimentaires et à une partie des besoins matériels et énergétiques de la société, et à lui fournir des services écosystémiques ».

En cohérence avec la stratégie européenne, la France met l'accent sur le développement d'une bioéconomie durable au service des territoires et qui contribue à l'atténuation des effets du changement climatique. Cette stratégie est mise en œuvre au travers d'un plan d'actions de très court terme²⁰, publié en 2018, qui s'articule autour de cinq axes :

1. améliorer la connaissance,
2. promouvoir la bioéconomie et ses produits auprès du grand public,
3. créer les conditions d'une rencontre de l'offre et de la demande,
4. produire, mobiliser et transformer durablement des bioressources,
5. lever les freins et mobiliser les financements.

Pour chaque axe, une série d'actions, de complexité et de portée différentes, est déclinée pour une mise œuvre d'ici 2020. Pour l'axe « amélioration des connaissances », le plan d'actions propose : i/ d'améliorer la qualité et l'accès aux données sur la mobilisation de la biomasse en s'appuyant sur l'ONRB²¹; ii/ de lancer une réflexion prospective sur le potentiel et les impacts environnementaux de la valorisation des bioressources issues des milieux aquatiques, marins et d'eau douce (pêche, aquaculture durable, macro et microalgues...); iii/ de renforcer les méthodes d'analyse multicritère (notamment l'ACV) pour les produits des filières de la bioéconomie en prenant en compte les services environnementaux rendus, et iv/ d'évaluer le potentiel de bioressources en outre-mer ainsi que la capacité à créer de la valeur ajoutée dans le secteur agricole.

Le plan d'action se focalise sur le cadre et les outils nationaux, susceptibles de favoriser le déploiement de la bioéconomie dans les territoires. Il se nourrit des réflexions issues des États généraux de l'alimentation, en particulier de l'atelier 3 « Développer la bioéconomie et l'économie circulaire »²² dans lequel l'INRA et IRSTEA ont été très impliqués. Le plan d'actions insiste également sur la nécessité de comprendre et de gérer la complexité des systèmes, et de développer la coopération entre les instituts de recherche et de formation pour prendre en compte toutes les dimensions sociales, environnementales et économiques de la bioéconomie au travers des croisements disciplinaires. Toutefois, les questions spécifiques pour la recherche que pose le développement d'une bioéconomie qui doit être durable dans un contexte de territoires confrontés à la mondialisation ne sont pas abordées, ce qui justifie pleinement notre réflexion prospective.

1.2. Les différentes visions de la bioéconomie, les consensus, les questions qui font débat

La bioéconomie est présente dans tous les rapports, les discours et dans tous les cénacles dès qu'il s'agit d'aborder la lutte contre le changement climatique et la dégradation de l'environnement tout en assurant la sécurité alimentaire. Si la bioéconomie génère beaucoup d'espoirs pour sortir d'une société « thermo-industrielle » qui ne tient pas compte des limites écologiques de la planète²³, elle reste l'objet de controverses autour de différentes visions et interprétations possibles.

¹⁹ Une stratégie bioéconomie pour la France, enjeux et vision 2017

<http://agriculture.gouv.fr/telecharger/83595?token=4b2095fafa14f075309cc193dda53d70>

²⁰ Une stratégie bioéconomie pour la France - Plan d'action 2018-2020. <https://agriculture.gouv.fr/une-strategie-bioeconomie-pour-la-france-plan-daction-2018-2020>

²¹ <https://observatoire-biomasse.franceagrimer.fr/app.php/accueil-onrb>

²² <http://www2.assemblee-nationale.fr/static/15/commissions/CAffEco/egalim-atelier3.pdf>

²³ https://blogs.alternatives-economiques.fr/reseauinnovation/2019/04/09/en-quete-d-un-nouveau-modele-socio-economique-la-bioeconomie#_ftn2

Les différentes visions de la bioéconomie

L'analyse de la littérature réalisée par Markus M. Bugge, Teis Hansen et Antje Klitkou²⁴ montre qu'il est possible de distinguer trois visions de la bioéconomie:

1. **La vision biotechnologique.** Elle met l'accent sur l'importance du progrès en biologie et particulièrement en biotechnologie et en biologie de synthèse et la commercialisation des produits des recherches dans différents secteurs économiques. La durabilité n'est pas une préoccupation première et le modèle d'innovation reste linéaire, de la science au marché. Elle ne s'ancre pas dans un territoire mais a besoin du triptyque : universités/instituts de recherche – grandes firmes - startups/investisseurs. Avec la chimie verte, les avancées en biotechnologies industrielles, supportent cette vision, en constituant des solutions alternatives à la pétrochimie, par exemple pour la production du propane-1,3-diol.
2. **La vision biosourcée.** Elle met en avant le potentiel de valorisation des matières premières biologiques issues de l'agriculture, de la forêt ou de la mer (bioéconomie bleue). Leur transformation conduit à des produits nouveaux (alimentaires et non-alimentaires) qui se substituent à des produits existants pétro-sourcés ainsi qu'à des produits d'importance stratégique pour les Etats, comme les biocarburants ou les biogaz. Le concept d'approche en cascade est au cœur de cette vision afin de maximiser l'usage de la biomasse. La gestion des déchets organiques et leur utilisation y occupe également une place importante. Dans cette vision, les terres, leurs usages, leurs disponibilités et surtout leurs productivités, sont les éléments centraux. La variété et la complexité de la biomasse et les possibilités d'utilisation implique des interactions avec de nombreux acteurs au sein d'un système d'innovation beaucoup plus complexe pouvant relier plusieurs filières traditionnelles. Dans une certaine mesure, cette vision repose sur la notion de durabilité faible²⁵, dans laquelle la technologie rend possible la substitution d'un produit « pétro-sourcés» par un produit biosourcés, entre capital naturel, et capital technologique et industriel.
3. **La vision bioécologique.** Elle met en avant l'importance des processus écologiques et des procédés éco-conçus qui optimisent l'usage de l'énergie et des nutriments, promeuvent la biodiversité en évitant les pratiques agricoles nuisant à cette biodiversité (par exemple, les monocultures et la dégradation des sols). Cette vision est donc clairement tournée vers une notion de durabilité forte (le capital naturel ne peut pas être remplacé par davantage de capital humain ou technologique), qui réinterroge les choix de croissance économique. Cette vision propose de transformer radicalement nos modes de consommation et de production, de façon à soumettre les lois économiques aux principes du vivant et aux lois de la thermodynamique prenant en compte les flux de matières et d'énergie. Cette vision réintroduit la notion des impacts de long terme en lien avec les cycles du vivant. De par sa conception, elle induit aussi une prise en compte des spécificités pédoclimatiques des territoires. Cette vision est reliée à celle de l'économie écologique²⁶ dont Nicolas Georgescu-Roegen²⁷ est un des pères fondateurs. Contrairement aux deux précédentes visions, la bioéconomie bioécologique n'est pas techno-centrée mais bio-centrée. Elle soulève des questions de recherche sur des sujets plus transdisciplinaires qui prennent en compte simultanément plusieurs échelles spatiales et temporelles et s'intéressent particulièrement aux dynamiques de transition et aux processus de rupture.

²⁴ Bugge, M., T. Hansen and A. Klitkou (2016). "What Is the Bioeconomy? A Review of the Literature." *Sustainability* **8**(7): 691

²⁵ Duru, M., O. Therond, G. Martin, R. Martin-Clouaire, M.-A. Magne, E. Justes, E.-P. Journet, J.-N. Aubertot, S. Savary, J.-E. Bergez and J. P. Sarthou (2015). "How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: a review." *Agronomy for Sustainable Development* **35**(4): 1259-1281; Horlings, L. G. and T. K. Marsden (2011). "Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'." *Global Environmental Change* **21**(2) : 441-452

²⁶ <https://www.cairn.info/revue-l-economie-politique-2016-1-page-8.htm>

²⁷ Roegen, N.G. *The Entropy Law and the Economic Process*, Harvard University Press (1971)

Les consensus

Au-delà de ces trois visions théoriques de la bioéconomie, il est possible d'identifier des déclinaisons concrètes du concept et une certaine hybridation des différentes positions en fonction des spécificités pédoclimatiques, économiques et culturelles propres à chaque pays et territoires.

Trois points font consensus :

Premièrement, tous les pays européens envisagent de faire évoluer graduellement leur économie pétrosourcée vers une économie biosourcée. Ils s'accordent aussi sur le fait que cette transition est un moyen majeur pour lutter contre le changement climatique et faire face aux questions de sécurité énergétique. L'enjeu est donc bien plus important qu'un changement de ressources. Pour mener à terme cette transition, il est essentiel de prendre en compte simultanément les concepts de durabilité et d'économie circulaire, la disponibilité réelle de la biomasse, l'utilisation optimale et responsable des matières premières, ce qui change radicalement toutes les interactions entre les acteurs économiques. Il y a également consensus sur le fait que la bioéconomie doit être abordée dans une perspective globale et éviter la séparation entre l'alimentation d'un côté, les produits biosourcés et l'énergie de l'autre.

Deuxièmement, il est unanimement reconnu que le succès du développement de la bioéconomie impliquera une expertise fondée sur la connaissance scientifique, existante ou à venir. Toutefois la bioéconomie n'est ni une science, y compris économique, ni une technologie ou une combinaison de solutions technologiques, ni un nouveau secteur industriel. **La bioéconomie est un concept sociopolitique, qui se décline en plusieurs visions alternatives. Quelle que soit la vision que l'on prône, il est possible de s'accorder sur le fait que la bioéconomie induira de profondes transformations de nos organisations économiques et sociales, favorisant un usage accru, durable et circulaire des produits biosourcés.**

Troisièmement, il y a consensus sur le fait que ce processus doit mobiliser et concerner tous les acteurs de la société : sélectionneurs et producteurs de biomasse ; transformateurs, transporteurs, distributeurs et consommateurs de biens et services, bénéficiaires directs et indirects des services écosystémiques; décideurs et politiques, chercheurs et enseignants. La nécessité d'une co-construction et d'une co-évolution des systèmes bioéconomiques est souvent mise en avant, mais les modalités peuvent différer d'une vision à l'autre. Cette mobilisation doit aussi être à différentes échelles spatiales, régionale, nationale, transnationale ou internationale.

Les questions en débat

Un premier débat porte sur l'opposition apparente entre les visions biotechnologique et biosourcée d'une part et la vision bioécologique d'autre part. Cette opposition est illustrée par des approches souvent différentes et peu conciliables qui interrogent au-delà de la recherche sur des choix de sociétés : innovation et croissance, versus sobriété, voire décroissance. Les deux premières visions promeuvent des solutions techniques aux problèmes environnementaux dans un cadre qui reste le plus souvent gouverné par les lois classiques du marché. A l'opposé, la vision bioécologique considère que, sur le long terme, les technologies seules, même les innovations environnementales et l'écoconception, ne peuvent pas conduire à une résolution des problèmes écologiques. En mettant au premier plan l'équilibre de la biosphère ainsi que la nécessité d'amener les systèmes socio-économiques sur des trajectoires de soutenabilité forte, elle propose une transformation profonde de l'organisation des activités économiques et sociales et de l'analyse des valeurs et des bénéfices²⁸. Cette vision est au fond assez proche de la proposition agroécologique forte²⁹, dans l'importance donnée aux processus écologiques, la recherche de leur complémentarité et la nécessité d'arbitrage entre des usages ou des impacts. La vision bioécologique peut être considérée comme « augmentée » par rapport à la proposition agroécologique du fait de l'extension de ses principes aux activités de transformation et aux usages des produits biosourcés.

Un deuxième débat porte sur le périmètre de la durabilité pris en compte dans les visions biosourcée et biotechnologique de la bioéconomie. La vision biosourcée se focalise sur la productivité de la biomasse ainsi qu'à l'efficacité de la transformation de la ressource. Même si la durabilité est en général mise en avant, elle est essentiellement centrée sur la réduction des émissions de gaz à effets de serre, la séquestration du carbone

²⁸ Qu'est-ce que l'économie écologique ? <https://www.cairn.info/revue-l-economie-politique-2016-1-page-8.htm>

²⁹ Towards the real green revolution? Exploring the conceptual dimensions of a new ecological modernisation of agriculture that could 'feed the world'. *Global Environmental Change* 21(2): 441-452 (2011).

ou l'optimisation du recyclage, l'ensemble étant évalué en lien avec les enjeux de changement climatique. Une approche globale de la durabilité du développement des filières biosourcées, incluant les questions de l'impact sur la biodiversité, les changements d'usage des sols ou encore la qualité des sols, de l'eau et de l'air est plus rarement proposée. La vision biotechnologique ne met pas en perspective les enjeux de la durabilité. Ce n'est qu'au travers du développement de nouvelles technologies de transformation de la biomasse plus efficaces, plus économes ou moins polluantes que la durabilité est indirectement présente. Les acteurs de la biotechnologie sont essentiellement tournés vers l'optimisation de la conversion biologique sur le court terme. Ils doivent toutefois inclure d'emblée les notions de durabilité selon une approche globale (filiale ou territoire). En effet, s'il est possible d'améliorer l'efficacité de conversion d'un procédé unitaire, optimiser une filière ou un processus de production en cascade avec des boucles de circularité à l'échelle territoriale nécessite d'optimiser l'ensemble de la chaîne et les interactions entre les acteurs. La digestion anaérobie, et tous les procédés biotechnologiques de valorisation des déchets et résidus agricoles, industriels ou issus des activités humaines, sont donc des processus majeurs à développer pour la bioéconomie

Enfin, la notion d'économie circulaire prône l'utilisation plus sobre et efficace des ressources. En bioéconomie, cela se traduit d'abord par l'optimisation de l'utilisation des ressources lors de leur première transformation et en veillant à ce que les coproduits soient à leur tour utilisés. L'application des principes de l'économie circulaire exige que la valeur des produits biosourcés soit maximisée sur plusieurs cycles de vie en appliquant une logique de cascade pour optimiser la séquestration du carbone, la transformation en énergie étant l'ultime usage. Actuellement, la bioéconomie circulaire se heurte à l'absence de chaînes d'approvisionnement organisées pour faciliter la réutilisation des coproduits et à des cadres réglementaires qui ont tendance à favoriser l'usage énergétique³⁰. Enfin, la vision biosourcée, au travers d'une biomasse considérée souvent comme illimitée, prend peu en compte la question cruciale de la compétition avec les usages alimentaires au travers de l'usage des terres cultivées, des forêts et le devenir des terres non encore cultivées.

Toutes ces visions - et ce qu'elles impliquent - ont nourri notre réflexion pour répondre à la lettre de mission de cette prospective.

1.3. Réflexion prospective INRA-Irstea 2019

Mission

L'ambition de cette prospective est d'identifier les futurs fronts de science et de technologies et d'enrichir le choix de nos orientations en proposant des actions qui favorisent le développement et le rayonnement international de nos recherches en bioéconomie et contribuent à répondre à de grands défis sociétaux. Il est attendu également une réflexion sur l'analyse des enjeux territoriaux, plus spécifiquement mobilisés dans une approche de bioéconomie circulaire. Une déclinaison opérationnelle est attendue.

Méthode de travail et structure du document

Pour mener à bien cette réflexion un groupe de travail pluridisciplinaire de 16 scientifiques a été constitué représentant six départements de l'INRA et deux départements d'Irstea. Le groupe de travail s'est réuni cinq fois en présentiel entre mai 2018 et mai 2019 et de nombreux échanges ont eu lieu au travers d'un site partagé qui avait été mis en place.

Etant donné l'ampleur de la thématique, la diversité dans la compréhension du terme bioéconomie lui-même et la diversité des approches en fonction du domaine scientifique d'appartenance, nous avons décidé ensemble d'aborder cette prospective en deux temps.

Un premier temps a été consacré à la **construction de schémas conceptuels**, au niveau global et au niveau territorial, qui nous ont permis une appropriation partagée du concept de systèmes bioéconomiques afin de préciser les enjeux, les différentes échelles pertinentes, les composantes du système et leurs interactions.

³⁰ Cascading use: a systematic approach to biomass beyond the energy sector *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 7:193–206 (2013)

Ces schémas conceptuels font l'objet du chapitre 2.

Un second temps a été consacré à définir **les défis thématiques** qui découlent de ces schémas conceptuels. Deux approches complémentaires ont été suivies. Une première approche nous a permis d'identifier collectivement les défis thématiques sur lesquels INRAE devra se positionner dans les années à venir, puis en groupe plus restreint, pour chaque défi thématique ont été précisés :

1. Les éléments de contexte et les défis à relever,
2. Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche,

11 défis thématiques ont été identifiés qui peuvent être regroupés en quatre axes et font l'objet du chapitre 3 :

Axe 1 : Productions et usages des biomasses

- Production durable de biomasse
- Compétition d'usage et relation entre filières de production
- Qualifier les biomasses dans toute leur diversité pour un usage raisonné

Axe 2 : Approvisionnement et transformation des biomasses

- Organisation des systèmes logistiques de biomasse
- Organisation des unités de transformation
- Re-conception des procédés de transformation

Axe 3 : Vers une bioéconomie circulaire

- Des déchets aux ressources
- Bouclages des cycles

Axe 4 : Les acteurs d'une société « biosourcée »

- Connaissances et anticipation des marchés
- Bioéconomie et citoyens-consommateurs
- Politiques et actions publiques : justification, construction, évaluation.

Le quatrième chapitre propose un certain nombre de recommandations

2. SCHEMAS CONCEPTUELS

2.1 Schéma conceptuel général de la bioéconomie

Un système complexe adaptatif

Une analyse critique des très nombreux schémas conceptuels³¹ a été effectuée par le groupe de travail. En se basant sur celui de la stratégie nationale bioéconomie³², des modifications ont été apportées pour y inclure de façon explicite les ressources animales³³, les citoyens, l'ensemble des acteurs et le rôle des territoires.

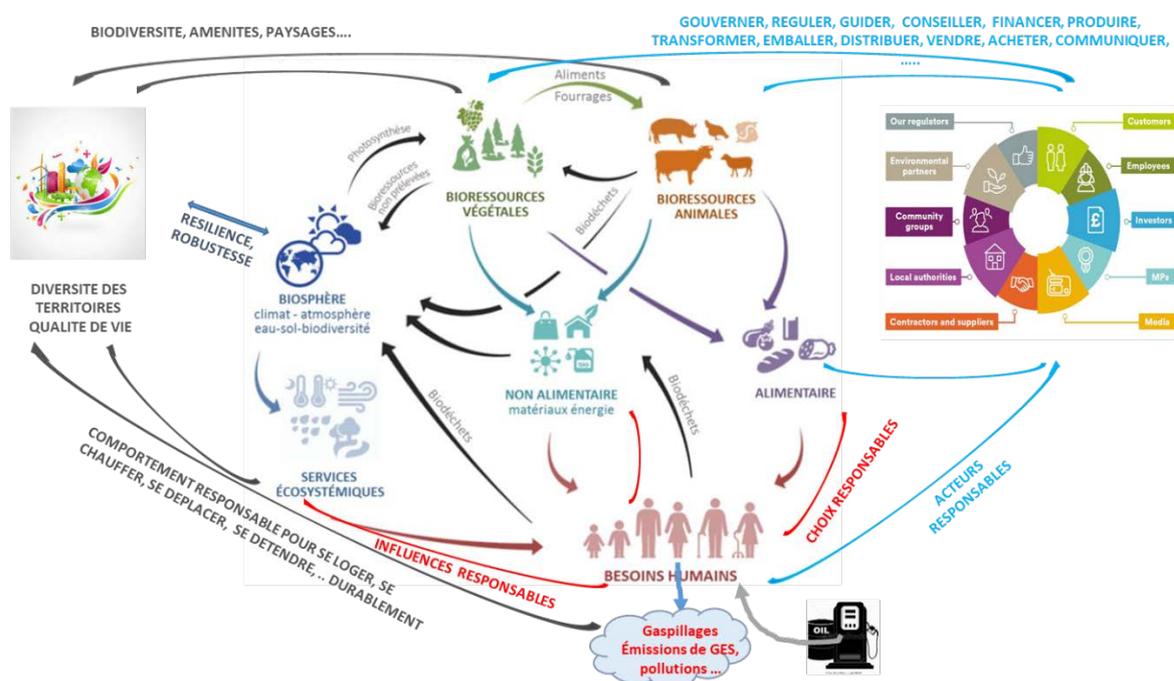


Figure 2 : schéma conceptuel de la bioéconomie

Au centre de ce schéma sont mis en évidence les flux de matière entre les ressources (végétales, animales et déchets) et les produits (alimentaires et non-alimentaires) en réponse aux besoins humains. A ce schéma de base a été ajouté le rôle des citoyens non pas uniquement vis-à-vis de leurs besoins mais aussi en tant qu'acteurs responsable au travers de leurs choix concernant leur régime alimentaire, l'adoption de produits biosourcés, leur comportement vis-à-vis des écosystèmes (flèches en rouge). A cela s'ajoute l'ensemble des acteurs dont les actions très diverses impactent les modes de vie des consommateurs, les choix des ressources et des produits en fonction des territoires (flèches bleu turquoise). Les ressources fossiles ont été également ajoutées pour leur

³¹ The circular economy and the bioeconomy, EEA Report No 8/2018, ISSN 1977-8449 –

Mc Arthur Foundation (2017). Towards the Circular Economy Vol. 3: Accelerating the scale-up across global supply chains. Geneva Prepared in collaboration with the Ellen MacArthur Foundation and McKinsey and Company. World Economic Forum, Switzerland. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/towards-the-circular-economy-vol-3-accelerating-the-scale-up-across-global-supply-chains> (Last accessed: November, 7, 2017)

Priefer C., Jörissen J., Frör O. (2017) Pathways to Shape the Bioeconomy, Resources, 6, 10; P; 2 – 23; doi:10.3390/resources6010010

³² <https://agriculture.gouv.fr/une-strategie-bioeconomie-pour-la-france-plan-daction-2018-2020>

³³ Dourmad J.Y., Joao Pedro Domingues, Laurence Puillet, Magali Jouven, Thomas Poméon, Thomas Guilbaud, Muriel Tichit, Thierry Bonaud (2019) Les productions animales dans la bioéconomie circulaire. Inra Production Animales, p 1 – 25

rôle majeur sur les choix effectués par les acteurs. L'ensemble de ce système bioéconomique est lui-même impacté par les évolutions de la biosphère (changement climatique, diminution des ressources en eau, etc...).

Ce schéma conceptuel met en relief toute la complexité de la bioéconomie et le défi de concevoir des approches systémiques des enjeux pour pouvoir la développer. Il montre que tous les domaines majeurs sont en interaction avec des boucles de rétroactions, positives ou négatives, comme par exemple i) les interdépendances multiples entre les flux de biomasse d'origine végétale et animale pour des usages alimentaires et non alimentaires, ii) les interactions entre les services écosystémiques, les territoires, les besoins humains et l'ensemble de la biosphère, iii) les interactions entre les citoyens, comme consommateurs ou comme acteurs responsables, et l'impact de leurs choix et de leurs comportements sur l'ensemble des flux.

Ce schéma général illustre le fait que les systèmes bioéconomiques sont des **systèmes complexes adaptatifs**³⁴. Comprendre l'évolution de ces systèmes requiert de comprendre les capacités d'apprentissages des différents composants du système, comme par exemple l'évolution des comportements des acteurs, les capacités d'auto-organisation entre les composants et l'émergence des nouvelles organisations qui en sont issues.

Actuellement, l'organisation des chaînes de valeurs est le plus souvent linéaire au sein de filières. Pour progresser vers une bioéconomie durable et circulaire il est nécessaire d'analyser les conséquences et les risques du passage de chaînes de valeurs linéaires vers des chaînes de valeurs interconnectées et construites en boucle. Dans cette nouvelle optique, la figure 2 montre qu'il sera nécessaire i/ d'atteindre un usage optimal des sols et des ressources agricoles et forestières ; ii/ de mettre en avant la notion de fonctionnalité, plutôt que celle de la qualité ; iii/ d'imaginer des procédés de transformation adaptés à de nouvelles logiques économiques; iv/ de développer le concept de chaînes logistiques intégrées, qui inclue le recyclage et/ou la réutilisation des matières et des produits ; v/ de comprendre et revoir les interdépendances entre les marchés alimentaires et non-alimentaires. Par ailleurs, aux échelles des territoires, la figure 2 montre aussi que les flux entre les villes et les campagnes changent, que les interactions entre acteurs de l'économie évoluent d'un point de vue sociétal. Les agriculteurs, gestionnaires forestiers, les citoyens/consommateurs, les politiques, etc... deviennent co-constructeurs et co-responsables au sein d'un même système.

2.2 Schéma conceptuel de systèmes bioéconomiques territoriaux

L'étude des systèmes bioéconomiques à l'échelle globale est essentielle pour comprendre les grands flux et les évolutions des marchés aujourd'hui mondialisés. Toutefois, l'analyse de la durabilité des systèmes bioéconomiques et le développement de systèmes bioéconomiques durables nécessitent aussi une approche à une échelle mésoscopique, représentée par le territoire. C'est en effet à ce niveau que la durabilité des systèmes bioéconomiques peut se révéler, du fait de l'adéquation nécessaire entre le développement des activités de valorisation des biomasses et les processus biophysiques, écologiques, sociaux, culturels ou politiques à l'œuvre dans les territoires. Il faut mesurer les équilibres entre prélèvements et disponibilité des biomasses à long terme en tenant compte de leurs taux de renouvellement, des potentiels de recyclage, de la capacité logistique à rapprocher l'offre et la demande³⁵. Le territoire intègre ces différentes dimensions et permet une appréhension spatiale explicite des processus, entités et interactions du système bioéconomique. On parle alors d'approches « place-based »³⁶. L'étude des systèmes bioéconomiques à l'échelle territoriale permet également l'identification concrète des freins et leviers concrets à leur développement et à leur durabilité, l'évaluation de leur résilience, de leur adaptabilité et de leur capacité d'auto-organisation. En parallèle, privilégier l'échelle territoriale pour le développement des systèmes bioéconomiques permet aux différents acteurs du système de participer et de se saisir directement des enjeux de la durabilité.

³⁴ de Vries, H. (2017). Some Thoughts About the Bio-economy as Intelligently Navigated Complex Adaptive Systems (INCAS). In Dabbert S., I. Lewandowski, J. Weiss & Pyka A. (Eds.), *Knowledge-Driven Developments in Bioeconomy: Technological and Economic Perspectives* (pp. 33-53): Springer Verlag. ISBN 978-3-319-58373-0

³⁵ Wohlfahrt et al., 2019. Characteristics of bioeconomy systems and sustainability issues at the territorial scale. A review. *Journal of Cleaner Production* (in press)

³⁶ Wu, 2013. Landscape sustainability science : ecosystem services and human well-being in changing landscapes. *Landscape Ecology*: 28. 999-1023.

Schéma conceptuel

La Figure 3 montre le système bioéconomique territorial considéré comme un ensemble de sous-systèmes en interactions à cette échelle. Cette représentation, proposée par le groupe de travail, met en avant le caractère circulaire et intégré du système bioéconomique territorial. Nous considérons qu'un système bioéconomique territorial se compose de 4 sous-systèmes imbriqués qui sont au sein du système socio-institutionnel. Ces sous-systèmes concernent la production des biomasses, leur transformation, le système de consommation des produits biosourcés, et le système de recyclage des biomasses résiduelles permettant une économie circulaire de la biomasse. Ces sous-systèmes interagissent avec d'autres modalités que celles des filières et chaînes de valeurs linéaires dans une organisation agricole, forestière et agro-industrielle classique. Chaque sous-système a des dynamiques qui lui sont propres et les interactions entre ces sous-systèmes forment le système bioéconomique territorial.

Le système bioéconomique territorial est en relation avec d'autres systèmes, notamment les systèmes humains, énergétiques et naturels qui se déclinent eux aussi de l'échelle globale à l'échelle territoriale. A l'échelle territoriale, les activités comprises dans ces différents systèmes peuvent se recouper mais ne se superposent que partiellement.

Figure 3 : schéma conceptuel d'un système bioéconomique territorial

Le système bioéconomique territorial est inscrit dans un territoire qui lui confère des caractéristiques environnementale, biophysiques, techniques, sociales ou institutionnelles propres. Chaque système bioéconomique territorial est composé d'un bouquet d'activités relevant des différents sous-systèmes. Ce bouquet peut différer d'un système bioéconomique territorial à un autre et l'ensemble des sous-systèmes peut ne pas être représenté dans tous les territoires. Par exemple, un territoire doté de ressources forestières pourrait se spécialiser dans l'usage et la transformation du bois, alors qu'un territoire principalement urbain pourrait développer des activités de recyclage des biomasses résiduelles. **Il existe donc des échanges entre les systèmes bioéconomiques à différentes échelles.** Par exemple, un système bioéconomique fondé sur l'exploitation du bois devra importer des produits agricoles d'un territoire voisin et s'inscrira dans des dynamiques globales comme la production d'énergie.

Chaque territoire reste donc dépendant des autres, il faut comprendre les interactions entre les territoires afin de définir les flux de matières, d'énergie, de compétences et les flux monétaires entre territoires et avec le reste du monde pour redéfinir des politiques publiques et des réglementations adéquates.

Les systèmes bioéconomiques et leur ancrage dans les territoires

Les limites des systèmes bioéconomiques, alimentaires ou énergétiques ne font pas l'objet d'un consensus actuellement. La définition des limites est nécessaire pour pouvoir analyser la complexité de la bioéconomie territoriale et notamment les interactions entre les systèmes bioéconomiques, qui regroupent des activités complémentaires de valorisation des biomasses, et les territoires au sein desquels sont gouvernés à différentes échelles spatiales ces activités et leur environnement.

La Figure 4 représente et questionne le concept de bioéconomie territoriale du point de vue de ces limites et interactions. **En effet, il est possible d'avoir une approche bioéconomie-centrée et/ou territoire-centrée en fonction des spécificités du système considéré.** La fonction choisie pour définir le territoire (unité administrative, unité biophysique, unité de projet citoyen, etc.) dessinera des limites qui peuvent ne pas correspondre à celles du système bioéconomique. Par exemple, le territoire pourra être défini comme un massif forestier et être associé à deux systèmes bioéconomiques : le bois-énergie et le bois construction (Figure 4-A). De la même manière, dans une approche bioéconomie-centrée (Figure 4-B), un système bioéconomique peut interagir avec différents territoires. L'enjeu est donc de développer une approche systémique et intégrée de la bioéconomie à travers toutes les composantes de soutenabilité (Figure 4-C). En effet, dans le cas général, plusieurs systèmes bioéconomiques et territoires interagissent. Il est alors nécessaire de se focaliser sur les interactions à l'intersection entre territoires et systèmes bioéconomiques (zone rouge sur la figure 4) pour mieux appréhender, d'une part les enjeux bioéconomiques au sein des territoires, et d'autre part les enjeux territoriaux de la bioéconomie.

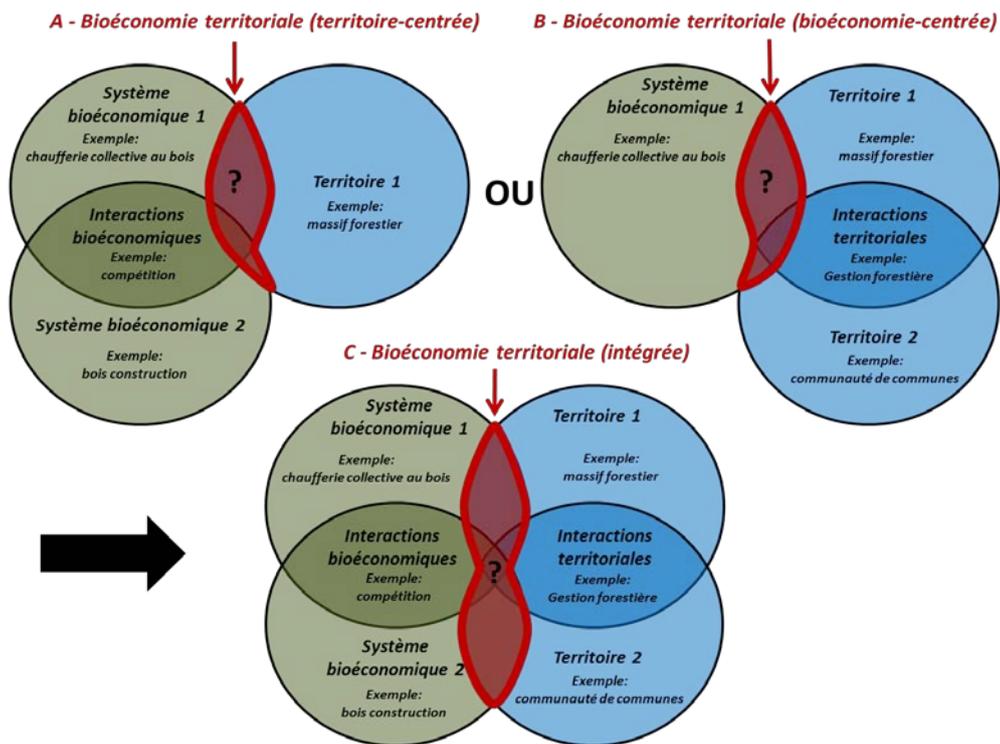


Figure 4: interactions entre systèmes bioéconomiques et territoires

3 DEFIS THEMATIQUES POUR UNE BIOECONOMIE DURABLE

La transition de la société actuelle, dépendante de l'utilisation de ressources fossiles pour satisfaire ses besoins, vers une société qui exploite durablement des bioressources, implique de nombreux changements. Elle oblige de revisiter les systèmes de production, transformation, distribution et usage d'aliments, d'énergie et de matériaux, ainsi que les systèmes de recyclage, transformation et gestion des déchets. **Dans ce cadre, le groupe de travail a choisi d'orienter sa réflexion vers la bioéconomie durable qui intègre les changements des pratiques agricoles liés à l'agroécologie, qui promeut l'écoconception, qui utilise au mieux l'ensemble des ressources biologiques pour réduire les déchets à tous les stades de la production jusqu'à la consommation, et qui assure le bouclage des cycles du carbone, de l'azote et du phosphore.**

A partir du concept de la figure 3, le groupe de travail a identifié **11 défis thématiques pour la recherche**, répondant aux enjeux de durabilité et de circularité de la bioéconomie, que nous avons identifiés comme les deux priorités majeures. Ces 11 défis thématiques sont regroupés en quatre axes :

Axe 1: Productions et usages des biomasses

- *Production durable de biomasse*
- *Compétition d'usage et relation entre filières de production*
- *Qualifier les biomasses dans toute leur diversité pour un usage raisonné*

Axe 2: Approvisionnement et transformation des biomasses

- *Organisation des systèmes logistiques de biomasse*
- *Organisation des unités de transformation*
- *Re-conception des procédés de transformation*

Axe 3: Vers une bioéconomie circulaire

- *Des déchets aux ressources*
- *Bouclages des cycles*

Axe 4: Les acteurs d'une société « biosourcée »

- *Connaissances et anticipation des marchés*
- *Bioéconomie et citoyens-consommateurs*
- *Politiques et actions publiques : justification, construction, évaluation.*

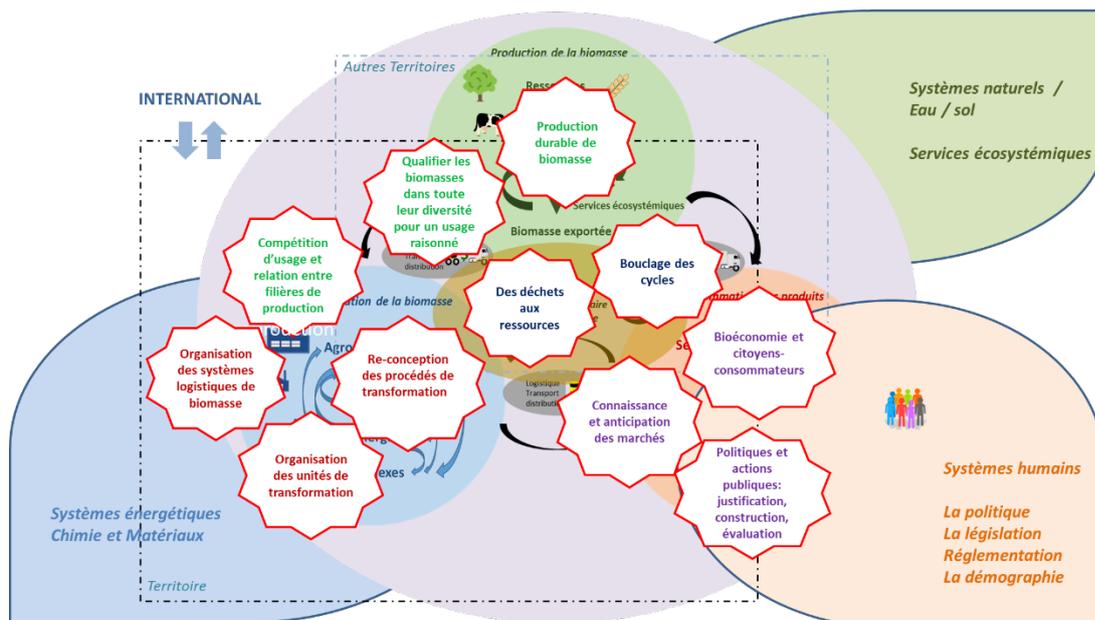


Figure 5 : les 11 défis thématiques replacés sur la figure 3

AXE 1 : Productions et usages des biomasses

3.1. Production durable de biomasse

Les éléments de contexte et les défis à relever

Une dimension importante de la bioéconomie concerne la capacité des systèmes agricoles et forestiers à produire : i) des biens agricoles (biomasses alimentaire et non-alimentaire) pour approvisionner les industries de transformation ; ii) tout un ensemble de services écosystémiques de régulation pour les producteurs (ex. fertilité des sols, régulations biologiques) et la société (séquestration du carbone par la végétation et les sols, préservation de la qualité de l'eau, régulation des risques naturels) ; iii) des services culturels (accueil du public dans les forêts, maintien de la qualité des paysages). Des synergies et des antagonismes entre ces différents services existent³⁷ notamment entre services d'approvisionnement et de régulation (voir encadré 4/1000). **On peut alors caractériser les systèmes de production de biomasse en fonction du bouquet de services qu'ils proposent, c'est-à-dire de l'ensemble des services, de leurs synergies et de leurs antagonismes.**

L'initiative 4/1000³⁸ a pour objectif de stocker du carbone dans le sol (si possible sous forme de C stable définitivement) pour atténuer le changement climatique.

La bioéconomie suppose de dédier une plus grande partie du carbone capturé par les végétaux pour la production de produits biosourcés.

Il est nécessaire d'évaluer les antagonismes et synergies entre ces deux approches pour arbitrer les usages de la biomasse et trouver des compromis cf 3.8.

Les biomasses agricoles et forestières étant issues d'écosystèmes gérés ou aménagés selon des intensités très variables (ex. des cultures de céréales fortement contrôlées d'un côté et des prairies peu gérées de l'autre ; des forêts sans document de gestion pour 58% de la superficie de la forêt française...), le bouquet des services rendus par les systèmes de production de biomasse est ainsi très hétérogène d'un type de système de production à l'autre ou d'un territoire à l'autre. **La durabilité des systèmes bioéconomiques dépend donc largement des bouquets de services écosystémiques fournis par les systèmes de production de biomasse.**

³⁷ Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. <http://doi.org/10.1007/s13593-017>

³⁸ <http://4p1000.org/>

L'agroécologie dans sa vision « forte » propose de repenser les systèmes de production de biomasse pour favoriser les synergies entre services écosystémiques, notamment en maximisant ceux qui permettent de réduire l'utilisation d'intrants de synthèse pour la production de biomasse; **elle apparaît ainsi comme un concept clé pour le développement de systèmes bioéconomiques durables**³⁹.

Cette re-conception des systèmes de production de biomasse doit être envisagée à différentes échelles temporelles et spatiales, les complémentarités entre services pouvant émerger grâce à la combinaison de systèmes fonctionnant à des échelles variées (du système de culture au territoire)⁴⁰. A l'échelle de la parcelle et du système de culture, la biodiversité des espèces cultivées peut permettre une diminution des intrants chimiques (ex. : systèmes de culture incluant des légumineuses, succession de cultures permettant de limiter la pression de pathogènes, d'insectes ou d'adventices). La diversité des cultures au sein d'une parcelle, comme par exemple dans le cas de l'agroforesterie ou d'un peuplement forestier avec des espèces variées, peut permettre de maximiser l'usage de l'eau, d'augmenter le niveau de production moyen de biomasse à l'hectare et de produire une diversité de biomasse permettant de répondre à différents besoins bioéconomiques (alimentaire et non-alimentaire). Au-delà de la parcelle, l'utilisation de coproduits entre ateliers de production; par exemple entre cultures et élevages⁴¹, permet d'améliorer le niveau de services écosystémiques « intrants » et donc les capacités globales de production agricole. Enfin, l'intégration spatio-temporelle d'activités, l'aménagement des paysages, notamment entre éléments productifs et non-productifs, pour développer des synergies par échanges de produits, de matière et de services, doit se faire à l'échelle territoriale. Par exemple, une synergie entre éleveurs et agriculteurs au sein d'un territoire ^{42 43}, peut permettre l'implantation d'un méthaniseur alimenté localement tout en favorisant le recyclage des digestats comme fertilisant.

La re-conception des systèmes de production de biomasse primaire implique également de prendre en compte les évolutions possibles dans son utilisation, intentionnellement priorisée ou au contraire non contrôlée. Par exemple, à l'échelle française, l'élevage "occupe" 55% de la surface agricole utile (70% à l'échelle mondiale) dont environ 85% pour les ruminants et 15% par les porcs et les volailles⁴⁴. L'alimentation des animaux constitue l'un des plus importants flux de bioressources (113 Mt à l'échelle nationale dont environ 70% de fourrages) et la majorité du carbone de ces aliments (entre 60 et 70% selon les espèces) retourne dans l'atmosphère principalement sous la forme de CO₂ (entre 10 et 20% se retrouve dans les effluents et entre 5 et 20% sont retenus par les animaux). Un autre exemple, la superficie forestière ne fait qu'augmenter : elle est passée de 14,1 millions d'ha en 1985 à 16,9 millions d'hectares en 2017, soit une augmentation de 0,7 % par an avec des accroissements de plus de 2% constatés en Corse, Bretagne et sur le pourtour méditerranéen (Mémento Inventaire forestier, IGN, 2017). Ces deux exemples illustrent la question de l'équilibre et des complémentarités entre systèmes de production au regard des besoins pour l'alimentation versus les autres usages de la biomasse, et à nouveau la question des compromis entre productions de biomasse et production de services écosystémiques. **La re-conception des systèmes de production de biomasse pour le développement d'une bioéconomie territoriale se fera ainsi en rapport avec les choix politiques et les modèles de consommation.**

La re-conception des systèmes de production de biomasse passe également par le **développement de techniques adaptées aux spécificités des systèmes bioéconomiques**. Il s'agit notamment de trouver des solutions techniques permettant d'améliorer la mobilisation des bioressources d'intérêt tout en préservant les niveaux de services écosystémiques des systèmes de production. La méthanisation qui permet l'extraction de gaz tout en restituant une grande partie des éléments minéraux aux sols, la densification intermédiaire de la

³⁹ Abel J.D., Blanc M., 2017. Vers une bioéconomie durable. Conseil Économique, Social et Environnemental. Les éditions du Journal Officiel de la République Française, 133p

. http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2017/2017_08_bioeconomie_durable.pdf

⁴⁰ Duru, M.*, Therond, O.*, Martin, G., Martin-Clouaire, R., Magne, M.A., Justes, E., Journet, E.P., Aubertot, J.N., Savary, S., Bergez, J.E., Sarthou, J.P. (2015). How to implement biodiversity-based agriculture. *Agronomy for Sustainable Development*, DOI 10.1007/s13593-015-0306-1.

⁴¹ Moraine, M., Duru, M., Nicholas, P., Leterme, P., & Therond, O. (2014). Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *Animal: An International Journal of Animal Bioscience*, (2014), 1–14.

⁴² Martin, G., Moraine, M., Ryschawy, J., Magne, M.-A., Asai, M., Sarthou, J.-P., ... Therond, O. (2016). Crop–livestock integration beyond the farm level: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(3), 53. <http://doi.org/10.1007/s13593-016-0390-x>

⁴³ Bugge, M., Hansen, T., & Klitkou, A. (2016). What Is the Bioeconomy? A Review of the Literature. *Sustainability*, 8(7), 691. <http://doi.org/10.3390/su8070691>

⁴⁴ Dourmad J.Y., Guilbaud T., Tichit M., Bonaudo T., 2019. Les productions animales dans la bioéconomie. Inra Productions Animales (sous presse).

biomasse, l'extraction de molécules « au champ » par des bioprocédés, sont des exemples de techniques qui améliorent la durabilité des systèmes bioéconomiques en optimisant l'exportation des bioressources.

Les défis importants sont donc d'être en mesure de :

1. Augmenter la biodiversité des systèmes de culture pour intensifier la production durable de biomasse, en favorisant les complémentarités entre les services fournis par les différentes espèces
2. Favoriser les co-usages des biomasses entre différents systèmes de production, de la parcelle au territoire, pour tendre vers un bouclage des cycles des éléments et atteindre les objectifs d'approvisionnement alimentaire et non-alimentaire de la bioéconomie.
3. Organiser l'usage raisonné des terres agricoles et forestières.

Les leviers susceptibles d'optimiser les compromis entre services écosystémiques dans le cadre d'une bioéconomie territoriale durable sont :

1. Reconcevoir des systèmes de production et d'usages des biomasses agricoles et forestières, selon une logique d'agroécologie forte, en tenant compte des synergies et antagonismes entre services écosystémiques aux différentes échelles du territoire.
2. Accompagner les acteurs pour la re-conception des systèmes de production et d'usage des biomasses.
3. Caractériser les besoins techniques pour cibler et augmenter la production et les exportations de bioressources d'intérêt tout en préservant les services écosystémiques « intrants » et de régulation globale des systèmes de production.

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

- Evaluer les bouquets de services écosystémiques et les performances des systèmes de production de biomasses afin d'atteindre les objectifs, locaux et globaux, de production alimentaire et non alimentaires et de conservation/restauration des ressources naturelles, en y incluant les services écosystémiques et de biodiversité⁴⁵ :
 - Établir l'état des lieux quantifié des services écosystémiques et des bouquets de services déjà rendus par les territoires,
 - Identifier et quantifier les antagonismes et synergies entre services et quels niveaux de biodiversité aux différentes échelles infra-territoriales permettront d'atteindre les objectifs d'une bioéconomie territoriale durable,
 - Étudier les effets, sur la production des services écosystémiques, des leviers tels que les préférences sociétales, les besoins en approvisionnements industriels, les crises climatiques et sanitaires, l'environnement socio-économique,
 - Développer les innovations dans l'évaluation économique des services écosystémiques, notamment l'évaluation de bouquets de services écosystémiques.
- Proposer des innovations techniques et organisationnelles pour la re-conception des systèmes de production de biomasse et d'usages de biomasses à différentes échelles permettant de produire mieux voire plus :
 - Identifier et concevoir des systèmes agroécologiques permettant de répondre aux objectifs de la bioéconomie territoriale durable,
 - Proposer des solutions technologiques pour optimiser les exportations durables des bioressources des différents systèmes de production de biomasse et des différents territoires tout en assurant le bouclage des cycles des éléments.
- Identifier les trajectoires des exploitations agricoles / propriétés et domaines forestiers et des territoires vers une bioéconomie durable et accompagner les acteurs dans cette transition :
 - Quelles trajectoires des exploitations, des systèmes et des territoires faut-il privilégier pour réussir la transition vers une bioéconomie durable ? Quelle est la vulnérabilité de ces systèmes ?

Enjeux méthodologiques :

⁴⁵ Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., & Richard, G. (2017). A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities: a review. *Agronomy for Sustainable Development*. <http://doi.org/10.1007/s13593-017>

- Développer des méthodes d'évaluation de la durabilité des systèmes de production de biomasse multicritères, multi-échelles spatio-temporelles, permettant de comparer différents types de systèmes (notamment agricoles et forestiers) :
 - Préciser les indicateurs, faire l'inventaire, évaluer la pertinence des jeux de données statistiques à différentes échelles et proposer des protocoles de collecte des données manquantes.
- Développer des méthodes et outils participatifs adaptés pour accompagner la transition des systèmes de production vers une bioéconomie durable.

3.2. Compétition d'usage et relation entre filières de production

Eléments de contexte et défis à relever

La finitude des ressources et plus particulièrement de la biomasse disponible pour satisfaire les besoins alimentaires et non-alimentaires impose de réfléchir et d'avancer des propositions concernant tout d'abord la hiérarchie des usages de la biomasse (p.e. : alimentaire / non-alimentaire en ce qui concerne les bioressources agricoles, bois d'œuvre / bois d'industrie / bois chimie/ bois-énergie en ce qui concerne les bioressources forestières). Par extension, la compétition pour les surfaces agricoles, forestières et semi-naturelles entre les différents usages de la biomasse doit être considérée (par ex. : controverse sur les changements de sols indirects liés au développement des biocarburants), ainsi que la compétition entre la production de biomasse et d'autres usages des sols (par ex. : récréation, conservation d'espace naturel, agro-photovoltaïsme), pour anticiper notamment des déplacements directs et indirects des usages des sols déstabilisant les territoires et les marchés. Anticiper les compétitions entre usages des biomasses et des sols est également nécessaire pour évaluer *ex-ante* les bouquets de services issus des systèmes bioéconomiques en développement.

Au-delà des enjeux directs liés aux usages de la biomasse, il est nécessaire de considérer les relations entre filières « bioéconomiques », les filières basées sur les ressources fossiles non renouvelables et les filières basées sur les ressources renouvelables non-biomasse (éolien, transports électriques...). Ainsi dans le secteur énergétique, l'utilisation accrue de biomasse couplée aux développements de nouvelles technologies pour la bioénergie impacte les usages des ressources fossiles (par ex. : gaz fossile vs gaz issu de la méthanisation, chauffage bois vs chauffage gaz) et change la composition du bouquet énergétique ; de même la production d'électricité à base de biomasse pouvant être complémentaire de la production d'énergie éolienne et solaire dans le cadre de la transition énergétique. Ces changements d'équilibre et les nouvelles possibilités offertes par la bioéconomie doivent être étudiés pour assurer un développement durable global des territoires.

Le défi majeur est ici de pouvoir anticiper les impacts du développement de la bioéconomie sur les équilibres existants notamment en termes d'usage des sols, d'usages de la biomasse et des ressources non renouvelables.

Les leviers identifiés sont :

1. Avoir une meilleure connaissance des usages actuels et potentiels des biomasses, des terres ainsi que de la diversité des relations possibles entre filières,
2. Disposer des outils pour aider les acteurs à anticiper les impacts du développement de la bioéconomie notamment sur l'usage des sols et les dynamiques des autres filières.

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

- Identifier les flux de biomasse et les compromis trans-filières, trans-bioressources, et entre ressources non-renouvelables, ressources renouvelables non biomasses et ressources en biomasses entre usages, à différentes échelles, pour la période actuelle et pour le futur.
- Proposer des scénarios d'usages optimisés des biomasses tenant compte des évolutions de contexte et des relations entre filières.

Enjeux méthodologiques :

- Développer le monitoring et améliorer l'accessibilité aux données existantes pour aborder ces enjeux spécifiques de la bioéconomie (multi-usages, multi-filières, multi-acteurs, multi-échelles),
- Développer des plateformes de modélisation et d'évaluation intégrée, dynamiques et spatialement explicites pour évaluer les co-évolutions entre filières et entre usages,

- Développer et améliorer des méthodes de prospectives quantifiées, holistiques et utiles à la décision des acteurs.

3.3. Qualifier les biomasses dans toute leur diversité pour un usage raisonné

Eléments de contexte et défis à relever

La biomasse est une ressource carbonée solide, diverse par nature et très structurée à différentes échelles (du nano au macro), complexe sur le plan biochimique et chimique, très riche en oxygène et en eau (jusqu'à 60% p/p pour des arbres fraîchement coupés, par exemple, et même à l'état sec leur taux résiduel est généralement supérieur à 15% p/p). Ces particularités chimiques et structurales de la biomasse et de ses fractions rendent difficile d'évaluer simplement de nouveaux usages. **La combinaison entre composition et structure confère à chaque type de biomasse des propriétés fonctionnelles qui lui sont spécifiques et qui conditionnent son utilisation.** Etablir ce lien entre composition-structure-propriétés fonctionnelles est de la première importance pour optimiser les usages de la biomasse primaire puis de ses fractions⁴⁶ dans une logique d'utilisation en cascade du carbone.

Ces propriétés fonctionnelles dépendent de l'espèce, organe, tissus, cellule ou molécule considérés (diversité intrinsèque), mais pour une espèce donnée, elles dépendent aussi de nombreux autres facteurs comme les conditions pédoclimatiques, la conduite de culture ou d'élevage dans le cadre de l'agroécologie qui maximise la diversité, les conditions de récolte, de transport, de stockage (diversité provoquée). Tous ces facteurs contribuent à la variabilité dans le temps et dans l'espace. Cette variabilité de la biomasse primaire, pas ou peu maîtrisée, vient impacter les procédés de transformation, dont l'objectif est avant tout de garantir un produit biosourcé final avec des propriétés fonctionnelles standardisées. En conséquence, la variabilité de la biomasse est souvent source de pertes, en raison de la disqualification de certaines matières premières non-conformes au regard du cahier de charges du procédé de transformation. Enfin, en plus du produit recherché, la transformation génère des coproduits, sous-produits et déchets qui sont aussi caractérisés par des propriétés qui leur sont propres et qui sont à leur tour sujet à une grande variabilité⁴⁷.

Si la variabilité de la biomasse est le plus souvent considérée comme un inconvénient, elle pourrait devenir un atout pour le déploiement d'une bioéconomie circulaire à condition d'être en capacité de la qualifier rapidement en relation avec les propriétés recherchées et de suivre son évolution du champ jusqu'à l'entrée de l'usine. Il en est de même pour les sous-produits et les déchets qui doivent être requalifiés comme une nouvelle ressource sur la base de leurs propriétés fonctionnelles potentielles.

Cinq défis principaux doivent être relevés pour qualifier les biomasses dans toute leur diversité et variabilité pour une valorisation en cascade et pour assurer la circularité des molécules qu'elles renferment⁴⁸.

1. Analyser rapidement la variabilité de la biomasse primaire dès le champ
2. Développer des outils prédictifs permettant de mieux anticiper les propriétés de la biomasse en fonction à la fois du génotype, des conditions pédoclimatiques et de la conduite de la culture
3. Réguler les systèmes logistiques de collecte, tri, stockage, prétraitement des biomasses sur la base de leurs fonctionnalités et être en capacité de les tracer pour permettre un approvisionnement standardisé et constant en début de chaîne de transformation.
4. Réussir à raisonner les usages des biomasses primaires sur la base de leurs fonctionnalités réelles pour contribuer à améliorer les sources de données disponibles sur la qualité de la biomasse versus l'usage.
5. Développer de nouveaux usages sur la base de la fonctionnalité

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

Les enjeux scientifiques et les priorités de recherche identifiées portent sur la :

- Connaissance fine des relations entre la biosynthèse, sous conditions de culture contrôlées ou au champ, et la variabilité compositionnelle et structurale,
 - Détermination, des échelles nanoscopiques aux échelles macroscopiques, de la mise en place des structures, végétales ou animales, lors de la morphogénèse.

⁴⁶ https://www.franceagrimer.fr/content/download/15926/119849/file/doc_final_obs_biomasse_12-12.pdf

⁴⁷ <https://www.ademe.fr/expertises/dechets/chiffres-cles-observation/dossier/caracterisation-dechets/resultats>

⁴⁸ <http://www2.assemblee-nationale.fr/static/15/commissions/CAffEco/egalim-atelier3.pdf>

- Caractérisation de la variabilité des biomasses primaires sur des bases structurales et/ou compositionnelles qui pourront être ensuite standardisées et facilement implémentées,
 - Fouille de la littérature, construction de bases de données composition-structure-fonction pour les espèces les plus courantes à partir de méthodes spectroscopiques (NIRS) et d'imagerie, déploiement des méthodes après miniaturisation, alimentation et enrichissement des inventaires existants (en lien avec les organismes existants comme l'ONRB).
- Caractérisation du potentiel des sous-produits et des déchets comme nouveaux gisements de fonctionnalité sur la base des connaissances des relations composition-structure-fonction,
 - Exploration de nouvelles fonctionnalités pour ces nouvelles ressources.
- Développement de modèles et d'outils d'aide à la décision multicritères pour orienter les biomasses vers différentes chaînes de valorisations potentielles, l'arbitrage se faisant in fine sur des critères économiques.

Les enjeux méthodologiques portent sur la :

- Standardisation de méthodes rapides d'analyse pour caractériser la variabilité et mise au point d'indicateurs de variabilité
- Standardisation de méthode d'échantillonnage et de tri des sous-produits et des déchets sur base de leurs propriétés physiques
- Mise au point de capteurs de contrôle de la variabilité avant, pendant et après la récolte

AXE 2 : Approvisionnement et transformation des biomasses

3.4. Organisation des systèmes logistiques de biomasse

Eléments de contexte et défis à relever

Par rapport aux ressources fossiles, les bioressources sont caractérisées par leur faible teneur en matière d'intérêt (fort taux d'humidité et/ou faible densité), leur périssabilité ou encore leur dispersion spatiale. L'organisation de leur collecte, de leur transport, de leur stockage et de leur conditionnement est donc un point clé pour le développement des systèmes bioéconomiques durables⁴⁹. En effet, la rentabilité économique ainsi que les bilans environnementaux des filières bioéconomiques peuvent être impactés fortement par les propriétés et la distribution géographique des bioressources⁵⁰, ainsi que par les caractéristiques des réseaux, moyens de transport, proximité d'industries de valorisation des résidus et des industries connexes et de recyclage (chaufferies, papeteries, méthaniseurs ...). Par exemple, pour les systèmes forestiers, s'intéresser aux rémanents plutôt qu'au bois d'œuvre permet difficilement de rentabiliser la création et l'utilisation d'infrastructures lourdes (machines, tracteurs, pistes). La rentabilité logistique reste donc très faible, et cela d'autant plus si le coût du travail est pris en compte.

Face au modèle de transformation à grande échelle d'un type de biomasse, **le défi pour développer une bioéconomie territoriale durable consiste à prendre en compte la diversité des productions de biomasses d'un territoire et donc la relative faible quantité de chaque sous-produit d'intérêt pour la bioéconomie et également les échanges de biomasses et de technologies entre territoires**. Il s'agit aussi de pouvoir mesurer et anticiper les quantités de biomasse disponibles et leur accessibilité, en termes de logistique et de coût. Les données spatiales peuvent être utilisées pour ce type d'évaluation. Les leviers pour y arriver sont :

⁴⁹ Kaut, M., Egging, R., Flatberg, T., Uggen, K.T., 2015. BLOMST—An Optimization Model for the Bioenergy Supply Chain, in: Eksioglu, D.S., Rebennack, S., Pardalos, M.P. (Eds.), Handbook of Bioenergy: Bioenergy Supply Chain - Models and Applications. Springer International Publishing, Cham, pp. 37-66.

⁵⁰ Perrin, A., J. Wohlfahrt, F. Morandi, H. Østergård, T. Flatberg, C. De La Rua, T. Bjørkvoll and B. Gabrielle (2017). "Integrated design and sustainable assessment of innovative biomass supply chains: A case-study on miscanthus in France." *Applied Energy* **204**: 66-77.

1. Une meilleure connaissance des propriétés et des localisations actuelles et potentielles des fractions de biomasse les plus intéressantes selon les valorisations envisagées (forêt et biomasse agricole, mais aussi flux des déchets) ;
2. Une réflexion sur les- et des propositions de- distributions spatiales des ressources et des unités de transformation dans les territoires (par exemple des unités de transformation mobiles et de taille modulable) ;
3. Une optimisation de l'organisation spatio-temporelle des collectes notamment grâce à des outils d'aide à la décision basés sur la modélisation spatio-temporelle des contraintes logistiques ;
4. Des innovations permettant d'optimiser le transport, la collecte et le conditionnement et tenant compte notamment de manière intégrée de la problématique multi-produits, multi-conditionnements (par exemple : densification intermédiaire de la biomasse, pré-extraction des molécules au plus près des lieux de production).

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

- Développer des méthodes de monitoring et d'analyse intégrée à l'échelle du territoire propres aux systèmes bioéconomiques (par ex. : vision intégrée des acteurs de la bioéconomie, informations multi-échelles, usages alimentaires ou non-alimentaires des produits, spatialisation fine), d'où les questions suivantes
 - Quelles démarches génériques pour décrire les systèmes bioéconomiques ?
 - Comment développer des bases de données spatialement explicites multi-échelles, multi-domaines, des observatoires de la bioéconomie ?
 - Quels apports des nouvelles technologies (ex. télédétection, capteurs) pour l'étude des systèmes bioéconomiques ?
 - Quelles attentes des acteurs du territoire vis-à-vis des systèmes bioéconomiques ?
- Modéliser, évaluer et optimiser spatialement et temporellement de façon explicite des filières de biomasses
- Développer des technologies permettant d'optimiser la logistique de la biomasse (densification intermédiaire, transformation au champ), notamment suivant la logique de *downscaling* des processus de transformation

3.5. Organisation des unités de transformation

Eléments de contexte et défis à relever

Aujourd'hui les territoires ont besoin de connaissances et d'outils pour organiser et anticiper le développement de systèmes bioéconomiques durables tenant compte de l'usage accru des bioressources, du développement de nouvelles activités et des potentielles innovations adaptées au contexte territorial qui leur permettraient d'atteindre leurs objectifs comme la souveraineté alimentaire, énergétique ou technologique et plus généralement le bien-être des populations. Concevoir et évaluer la durabilité des systèmes bioéconomiques demandent le développement d'approches spécifiques, notamment du fait de la diversité des acteurs, des secteurs, des échelles et des enjeux caractéristiques des systèmes bioéconomiques. L'étude, à l'échelle territoriale et régionale des systèmes bioéconomiques fait appel à différents cadres conceptuels et les interroge spécifiquement.

1. Organisation industrielle des systèmes bioéconomiques

L'organisation industrielle des 'systèmes' bioéconomiques peut s'approcher en analysant leur organisation verticale, et notamment les relations entre les agriculteurs (producteurs, coopératives d'approvisionnement...) et les entreprises de transformation. L'organisation des relations marchandes entre ces deux secteurs impacte directement le partage de la valeur entre secteur amont et secteur de la transformation. Ces relations marchandes sont souvent régies par des contrats liant l'amont et l'aval, contrats qui peuvent prendre des formes variées (voir par exemple⁵¹) qui influent notamment sur le partage des risques entre secteurs amont et aval très différents. Au-delà de la question du partage des risques, les contrats ont également des impacts importants sur les incitations données à l'amont pour produire les quantités et la qualité requises. Les contrats jouent donc un

⁵¹ Bouamra-Mechemache Z., Duvalaix-Treguer S., Ridier A. (2015). Contrats et modes de coordination en agriculture. *Economie Rurale*, (345) :7-28.

rôle important du point de vue des incitations à la performance. L'étude de l'organisation verticale des systèmes bioéconomiques est compatible avec une spatialisation explicite des activités (localisation des filières de production et des centres de transformation, de valorisation des coproduits, etc.), qui permet d'évaluer la distribution « optimale » des différentes activités sur un territoire (intégration verticale ou agglomération, etc.). Dans le cas des systèmes bioéconomiques, l'objectif d'une valorisation poussée des co-produits complexifie l'analyse des relations entre entreprises. Le partage de la valeur au sein des systèmes bioéconomiques dépendra également du niveau de concentration horizontale de chacun des principaux groupes d'acteurs. Schématiquement, plus la concentration horizontale est élevée, plus les acteurs concernés ont la capacité d'exercer un pouvoir de marché et donc de fixer des prix à leur avantage.

Un défi important sera d'utiliser le cadre et les concepts existant de l'organisation industrielle et de les adapter aux cas plus spécifiques des systèmes bioéconomiques, une des spécificités pouvant être liée aux multiples usages des produits et aux possibilités de valorisation des ressources en cascade.

2. Ecologie industrielle et territoriale

Les exigences de durabilité, notamment la combinaison de services d'approvisionnement, de régulation ou culturel (cf 3.1), pèsent ainsi conjointement sur les choix et les développements des pratiques agricoles et forestières et des procédés technologiques afin de permettre l'installation de systèmes bioéconomiques territoriaux durables. Les activités, technologies, procédés et organisations de production et de transformation de biomasse, existants ou en développement, sont au cœur de cet enjeu de durabilité.

Concernant les activités de transformation, l'écologie industrielle propose une analogie entre système industriel et écosystème et pense l'organisation des activités de manière à boucler les flux de matière et d'énergie et à limiter leur impact environnement global⁵². Elle s'inscrit naturellement dans le concept d'économie circulaire. **L'objectif de l'écologie industrielle est de proposer des organisations de différentes activités industrielles complémentaires afin d'obtenir un complexe durable, limitant les apports externes, notamment énergétiques et les émissions vers l'environnement.** Les particularités de la biomasse, notamment sa périssabilité, sa saisonnalité, sa dispersion spatiale ainsi que la substituabilité partielle des ressources et des produits interrogent les organisations industrielles existantes. Ainsi l'écologie industrielle permet de travailler l'organisation des différentes activités de transformation des bioressources et de production des bioproduits sous la forme d'un complexe industriel durable, l'innovation étant au cœur du lien produits/procédés.

L'écologie industrielle peut s'étendre pour raisonner l'organisation des activités bioéconomiques dans les territoires. En France, on parle d'Ecologie Industrielle et Territoriale (EIT). L'EIT vise à découpler la croissance économique de celle de l'utilisation des ressources naturelles en favorisant au niveau territorial le bouclage des flux de matière et d'énergie. Les leviers actionnés peuvent consister en une réorganisation des activités humaines et l'émergence de nouvelles formes de coopération entre acteurs sur les territoires ; ils renvoient également à une optimisation des processus et à la mobilisation de technologies, afin d'économiser les ressources et de diminuer les pollutions par exemple dans les systèmes d'élevage ayant un faible lien au sol^{53, 54}. Ce concept, appliqué à l'agriculture, mobilise à la fois des processus industriels (via les technologies) et des processus biologiques, marquant ainsi sa spécificité. **Le défi pour l'EIT est de mieux comprendre et piloter les interactions entre société et environnement en étudiant les flux de matières et d'énergie mobilisés par les systèmes anthropiques comme les villes, les industries ou les territoires, et les modes de gouvernance de ces flux^{55, 56, 57}.**

3. Gestion intégrée des ressources et conception de territoires durables

52 Ehrenfeld J.R. Perspectives on Industrial Ecology in Ecological Economics, Volume 49, Issue 1, 10 May 2004, Pages 107-109 - <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.10.008>

53 Dumont B et al, Prospects from agroecology and industrial ecology for animal production in the 21st century - *Animal*(2013),7:6, pp 1028-104

54 Moraine M. et al, Co-design and assessment of cropping systems for developing crop-livestock integration at the territory level, *Agricultural Systems* Volume 147, September 2016, Pages 87-97 - <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.06.002>

55 Barles S. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues, *Journal of Environmental Planning and Management* Volume 53, 2010 - pages 439-455

56 S. Madelrieux et al., Écologie et économie des interactions entre filières agricoles et territoire: quels concepts et cadre d'analyse ? - *Cah. Agric.* 2017, 26, 24001 DOI:10.1051/cagri/2017013

57 Bonaudo T. et al - Analyser une transition agro-alimentaire par les flux d'azote : Aussois un cas d'étude du découplage progressif de la production et de la consommation, *Revue d'Économie Régionale & Urbaine* 2017/5 , pages 967 à 991

Concevoir une gestion intégrée des ressources à l'échelle territoriale conduit à considérer les systèmes bioéconomiques comme des systèmes socio-écologiques, complexes et hiérarchisés, émergeant des interactions entre des processus humains et naturels⁵⁸. Considérant le potentiel de la modélisation intégrée, le développement durable de systèmes bioéconomiques durables peut donc s'appuyer sur des méthodes de modélisation et d'évaluation intégrées (*Integrated assessment and modelling*^{59,60}). L'échelle territoriale permet d'approcher ces systèmes complexes en tenant compte de leurs spécificités et ainsi de proposer des solutions adaptées à chaque contexte⁶¹. Pour concevoir des systèmes bioéconomiques durables, adaptés à un territoire donné, il est nécessaire de bien connaître les bioressources propres, les modes de production, de transformations et de recyclage des biomasses correspondantes, les échanges de biomasses avec les territoires voisins, les zones d'approvisionnement des industries qui y sont installées et l'étendue géographique des marchés de leurs productions, les échanges entre filières ou entre produits biosourcés et non biosourcés (ex. : complémentarité et substituabilité entre type d'énergie), l'organisation socio-économique et la gouvernance des secteurs de la bioéconomie locale et globale et les enjeux de conservation/restauration des ressources naturelles (eau, sol, services écosystémiques, biodiversité...). Il est également nécessaire d'anticiper les innovations agronomiques, organisationnelles ou encore liées aux procédés de transformation et recyclage qui permettront de nouvelles organisations des systèmes bioéconomiques durables. La modélisation spatialement explicite, la co-conception de systèmes territoriaux, et l'accompagnement des acteurs sont les méthodes préconisées pour la conception de systèmes bioéconomiques territoriaux durables⁶². Ces méthodes permettent notamment de simuler et d'évaluer des scénarios prospectifs d'organisation territoriale.

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

Les enjeux pour la science sont :

- La représentation et l'analyse intégrées des bioéconomies territoriales et de leurs spécificités comprenant notamment les modes et contraintes de production des bioressources, les unités industrielles de transformation présentes et le niveau de valorisation des co-produits, les recyclages, les aspects logistiques, les flux de matières intra et inter-territoires, les innovations mises en œuvre, les enjeux de conservation des ressources naturelles,
- La co-construction de scénarios prospectifs réalistes dans les territoires pour anticiper les développements futurs de la bioéconomie.

Les priorités de recherche sont de :

- Développer des méthodes de monitoring et d'analyse intégrée à l'échelle du territoire propres aux systèmes bioéconomiques (par ex. : vision intégrée des acteurs de la bioéconomie, informations multi-échelles, usages alimentaires ou non-alimentaires des produits, spatialisation fine). Les questions posées sont les suivantes :
 - Quelles démarches génériques pour décrire les systèmes bioéconomiques ?
 - Comment développer des bases de données spatialement explicites multi-échelles, multi-domaines, des observatoires de la bioéconomie ?
 - Quels apports des nouvelles technologies (ex. télédétection, capteurs) pour l'étude des systèmes bioéconomiques ?
 - Quelles attentes des acteurs du territoire vis-à-vis des systèmes bioéconomiques ?
- Développer la modélisation et l'évaluation intégrées multi-échelles et multicritères prenant en compte explicitement les caractéristiques propres des systèmes bioéconomiques (par ex. : les multiples usages

⁵⁸ McGinnis, M. D. and E. Ostrom (2014). "Social-ecological system framework: initial changes and continuing challenges." *Ecology and Society* 19(2).

⁵⁹ Hamilton T.L. Journal of Environmental Economics and Management- Volume 74, November 2015, Pages 71-93 , <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2015.08.001>

⁶⁰ Ewert F. et al, Environmental Science & Policy, Volume 12, Issue 5, August 2009, Pages 546-561, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.02.005>

⁶¹ Wu, J. (2013). "Landscape sustainability science: ecosystem services and human well-being in changing landscapes." *Landscape Ecology* 28: 999-1023.

⁶² Kline, K. L., S. Msangi, V. H. Dale, J. Woods, Glauca M. Souza, P. Osseweijer, J. S. Clancy, J. A. Hilbert, F. X. Johnson, P. C. McDonnell and H. K. Mugeru (2017). "Reconciling food security and bioenergy: priorities for action." *GCB Bioenergy* 9(3): 557-576.
Voinov, A., N. Kolagani, M. K. McCall, P. D. Glynn, M. E. Kragt, F. O. Ostermann, S. A. Pierce and P. Ramu (2016). "Modelling with stakeholders – Next generation." *Environmental Modelling & Software* 77: 196-220.

actuels et potentiels et la circularité des matières et de l'énergie, la multiplicité et l'hétérogénéité des acteurs et des secteurs de la bioéconomie, la diversité des échelles spatiales et temporelles en jeu dans les systèmes bioéconomiques, les influences des facteurs externes comme le changement climatique ou les marchés) et incluant les acteurs des territoires. Les questions posées sont les suivantes :

- Quelles représentations (modélisation) des systèmes bioéconomiques pour appréhender leurs dynamiques spatiales et temporelles ? (modélisations multi-agents, couplage des modèles de flux et d'activités) ?
 - Quelles méthodes d'évaluation intégrée permettant de prendre en compte les différents critères aux différentes échelles spatiales et temporelles ? Il s'agira ici de prendre en compte les critères relatifs à la production alimentaire, non alimentaire et la conservation des ressources naturelles (y compris les services écosystémiques) de l'échelle locale (par ex. maintien de la souveraineté alimentaire) à l'échelle globale (ex. régulation du climat, impacts exportés) et ceux relatifs à la résilience de ces systèmes face aux changements globaux (sociétaux et environnementaux).
 - Quelles méthodes pour accompagner les acteurs dans la conception de systèmes bioéconomiques durables considérant leurs différentes attentes et les spécificités de leur territoire ?
 - Quelle approche temporelle pour intégrer la conception optimale de la chaîne d'approvisionnement de la biomasse et en prendre en compte la « flexibilité » ?
 - Comment développer de l'innovation conjointe dans les domaines des procédés de transformation et de production pour permettre une plus grande flexibilité du lien produits/procédés ?
- D'optimiser les organisations socio-techniques en fonction des flux de biomasse dans les territoires, et donc quelles approches EIT sont adaptées aux systèmes bioéconomiques
 - D'étudier la structuration horizontale et verticale des systèmes bioéconomiques.

3.6. Re-conception des procédés de transformation

Eléments de contexte et défis à relever

La transition de la pétroéconomie vers une bioéconomie basée sur l'utilisation de la biomasse nécessite un accompagnement technologique important. En effet, les technologies de la pétrochimie ne sont pas directement transposables à la biomasse en raison des particularités structurales et physico-chimiques (cf 3.3) de celle-ci. Tout d'abord, comparée aux ressources pétrolières, la biomasse est variable, peu dense et périssable. Selon le paradigme actuel (inspiré de la pétrochimie) entre 1800 et 4500 tonnes par jour de biomasse doivent être livrés aux bioraffineries. Lorsqu'il s'agit d'une bioraffinerie centralisée, la collecte et le stockage de telles quantités constitue un défi majeur, surtout lorsque la bioraffinerie ne transforme qu'une seule bioressource. Ensuite, la plupart des systèmes catalytiques actuels, développés par la pétrochimie pour transformer des hydrocarbures de structures chimiques relativement simples et homogènes, peu oxygénées et issus d'une distillation préalable, sont inappropriés pour transformer les composants macromoléculaires de la biomasse, chimiquement et structurellement complexes et poly-oxygénée. L'organisation spatio-temporelle des opérations unitaires doit donc être repensée pour limiter la distance à parcourir avant la réalisation de la première transformation et pour réduire les besoins de stockage de matières périssables. Ensuite, les étapes de fractionnement (c'est-à-dire le raffinage ou le craquage) et de transformation (à la place de la distillation dans la pétrochimie) de la biomasse doivent être réinventées ou *a minima* revisités pour s'insérer soit dans les logiques industrielles existantes, soit pour permettre le développement de nouveaux schémas industriels et en tout de état de cause, pour permettre à l'avenir la banalisation des solutions biosourcées^{63, 64}.

Dans la bioéconomie, l'efficacité des ressources, donc du carbone renouvelable, est capitale. De cette exigence découle trois concepts qui sont la transformation en cascade (c'est-à-dire la transformation de la biomasse par palier où à chaque palier l'on cherche à valoriser la biomasse de façon à maximiser sa valeur commerciale, la production d'énergie étant l'ultime recours), **le zéro déchet et la circularité des usages** (un

⁶³ Abecassis, J. et al. 2014, New perspective for biorefining cereals. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 8, 462-474. DOI : 10.1002/bbb.1455 - Eranki et al. DOI: 10.1002/bbb.318; *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 5:621–630 2011

⁶⁴ De Jong (2015) : <https://pdfs.semanticscholar.org/e40e/366c2c6a2fed2985113bf17afccbf44dc7b6.pdf> - Yaoping Zhang et al *GCB Bioenergy* 10(11), 2018 doi.org/10.1111/gcbb.12533

concept qui exige le maintien des bioressources dans une boucle productive), **qui amènent à raisonner la production, le fractionnement et la transformation comme des opérations interdépendantes**. L'optimisation des flux de carbone renouvelable et l'écoconception de procédés et de produits doivent donc être au cœur des nouvelles solutions industrielles adaptées à la bioéconomie ^{65,66}.

Les défis à relever au niveau « macroscopique » pour innover sur le fractionnement et la transformation de la biomasse.

En tant que matière première, la biomasse ne peut pas être mobilisée de la même manière que le pétrole. Par conséquent, il est nécessaire de repenser l'organisation et la nature des opérations unitaires de façon à optimiser les étapes de sa transformation. Au début de la chaîne de valeur, les défis du stockage et du transport de biomasses couplés à la périssabilité de la matière sont majeurs. Si cette problématique est d'abord une question de logistique, c'est aussi une question technologique, car elle implique la conduite de certaines opérations à échelle réduite et de façon intensifiée sur place, dans des systèmes fortement territorialisés où production et transformation sont géographiquement proches.

La valorisation de ressources (quelles qu'elles soient) repose sur deux étapes clés qui sont le **fractionnement** et la **transformation**. Au sein de chacune de ces deux étapes, des **opérations unitaires** spécifiques sont **assemblées** de façon plus ou moins complexe, pour aboutir aux produits finaux visés (ex. aliments, matériaux, commodités chimiques ou vecteurs énergétiques). Bénéficiant d'au moins un siècle d'optimisation et de rationalisation, la pétrochimie maîtrise parfaitement cet enchaînement d'opérations et constitue une industrie mature et robuste. À l'inverse, les filières bioéconomiques émergentes sont nécessairement moins matures et donc pénalisées à la fois par la maturité de l'industrie pétrochimique et le coût toujours relativement faible du pétrole. Par conséquent, pour réussir la transition vers la bioéconomie, il est nécessaire de relever plusieurs défis, d'abord par l'optimisation du fractionnement et ensuite par le développement d'itinéraires de transformation adaptés aux biomolécules. Enfin, pour la bioéconomie il est à la fois indispensable de produire des biens commerciaux dont les propriétés d'usages sont en adéquation avec des attentes, les cahiers de charges étant imposés par les produits issus de la pétrochimie, et satisfaire de nouvelles exigences **environnementales** de façon à assurer la durabilité du système.

Les enjeux scientifiques et technologiques, les priorités de recherche

Les enjeux scientifiques et technologiques sont :

- L'utilisation de bioressources peu denses, périssables et très diverses comme matières premières. Ces facteurs exigent de repenser les schémas industriels existants et de concevoir des technologies à la fois flexibles en termes de matières entrantes, mais robustes en termes de capacités de production.
- Le cracking de bioressources ou comment déstructurer la biomasse de façon à conserver et/ou faire émerger des propriétés d'intérêt tout en respectant des principes d'efficacité des ressources et en maîtrisant des apports d'énergie et de réactifs.
- Les itinéraires de transformation des composants de la biomasse en produits finalisés. Pour transformer la biomasse en une large gamme de produits biosourcés aux propriétés d'usage attendues, il s'agit de développer pour les différentes molécules, macromolécules et structures méso- ou macroscopiques des itinéraires de transformation appropriés.
- Des approches de conception de procédés multi-performants pour les filières bioéconomiques.

L'approche bioéconomique de ces processus nécessite d'**innover** dans les opérations unitaires et leurs assemblages (procédés) à l'aune de l'**écoconception** en intégrant les **contraintes** de l'**amont** (production, qualité, variabilité et disponibilité de la biomasse) et de l'**aval** (les usages, les cycles de vie des produits et leur acceptabilité sociale).

Comme indiqué précédemment, la complexité structurale et les propriétés physico-chimiques des biomasses végétales nécessitent des approches et des développements spécifiques pour arriver à obtenir à partir des biomasses des fractions et produits aussi performants que les produits pétrosourcés.

Les priorités de recherche au niveau des opérations unitaires (fractionnement et transformation) sont de :

⁶⁵ Visser and van Ree, 2016; <http://www.acres.nl/wp-content/uploads/2018/03/Small-scale-Biorefining.pdf>

⁶⁶ Bruins and Sanders, 2012 Small-scale processing of biomass for biorefinery. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*6:135–145

- Approfondir les connaissances des biomasses aux différentes échelles d'observation pertinentes et aux différentes étapes de transformation de façon à appréhender simultanément la structure et la réactivité des différentes ressources entrant dans les filières bioéconomiques. Développer des méthodes analytiques rapides pour inventorier et cartographier les caractéristiques clés des biomasses et appuyer la prise de décision,
- Appréhender et modéliser les flux de C renouvelable dans des systèmes interactifs en cascade, circulaires et linéaires,
- Développer une révision critique des opérations unitaires par rétro-ingénierie en raisonnant à partir des fonctionnalités recherchées au niveau des produits pour remonter à celles de la biomasse,
- Développer de nouvelles voies de fractionnement et de transformation de la biomasse conduisant à de réelles approches en cascade (> deux étapes) pour la valoriser au mieux en raisonnant à partir de la palette des fonctionnalités pour une biomasse donnée,
- Développer les opérations unitaires *ab initio* dans une logique d'écoconception et d'intensification
- Rechercher et développer de nouveaux catalyseurs chimiques et biologiques (enzymes, usines cellulaires, consortiums microbiens...) et concevoir de nouveaux bioprocédés répondant aux exigences d'efficacité multicritères,
- Imaginer et développer des opérations innovantes sobres en eau, énergie et effluents, en puisant dans la palette d'opportunités offertes par les biotechnologies, la chimie verte et les nanotechnologies.

Les priorités de recherche identifiées au niveau des procédés sont de :

- Reconcevoir des procédés de façon à les adapter aux spécificités physiques et chimiques des bioressources. Cela passe par l'assemblage de nouvelles opérations unitaires et/ou par de nouvelles manières d'assembler des opérations unitaires existantes, en s'appuyant sur des approches multicritères qui optimisent la matière première, l'eau et l'énergie nécessaire,
- Etudier des stratégies d'intensification des procédés de façon à concevoir des procédés nécessitant des investissements moins élevés et permettant leur déploiement à l'échelle d'un territoire et donc selon des schémas industriels distribués,
- Etablir et Qualifier, sur la base des relations structure-fonction, les matières premières et les co-produits issus de chaque étape pour proposer des arbitrages intelligents sur les différentes voies de transformation successives possibles,
- Modéliser les opérations unitaires nouvelles spécifiques aux bioraffineries et simuler les opérations unitaires et les procédés pour développer des outils d'aide à la décision,
- Améliorer les approches de type ACV avec prise en compte de la multiplicité des filières possible pour les différentes fractions de biomasse,
- Dimensionner et organiser au mieux les procédés dans des unités de transformation adaptées aux spécificités du territoire et de ses habitants.

AXE 3: Vers une bioéconomie circulaire

3.7. Des déchets aux ressources

Eléments de contexte et défis à relever

Que ce soit en phase de production, transformation ou consommation des bioressources, il y a des résidus solides ou liquides (dits aussi productions jointes) plus ou moins désirés selon leur utilité pour le producteur, le transformateur ou le consommateur. Si la production jointe à une utilité (c'est-à-dire valorisable par le marché), il s'agit d'un coproduit : il existe une demande solvable où « les déchets des uns sont les ressources des autres », idéalement en cascade sous forme réemployée, sinon recyclée (valorisation matière), sinon incinérée (valorisation énergétique). Il peut même arriver qu'un coproduit soit ponctuellement davantage recherché que le produit lui-même, suite à des conjonctures économiques particulières. Mais bien souvent, la production jointe conduit à des flux de matière ne faisant pas l'objet de demande solvable dans les conditions techniques et économiques du moment, et dont le détenteur « cherche à se défaire » ou « a l'obligation de se défaire » : il s'agit alors d'un déchet ultime, un bien à valeur négative : il faut payer pour s'en défaire, à l'inverse des relations d'échange usuelles.

Le statut de déchet ultime implique en effet des coûts de traitement plus ou moins internalisés suivant les réglementations environnementales (en France, les déchets stockés et incinérés sont ainsi soumis à une TGAP⁶⁷ censée inciter à la réduction des déchets ultimes ; le traitement des eaux résiduaires est lui soumis aux directives européennes DERU⁶⁸ et DCE⁶⁹). Une gestion efficace des ressources implique donc la minimisation de la production de déchets ultimes (définis par les conditions techniques et économiques du moment) d'où le principe des 3R retenu par la directive européenne sur les déchets : Réduire, sinon Réutiliser, sinon Recycler (et sinon, incinérer en récupérant l'éventuel potentiel de combustion). Les impacts financiers et environnementaux de la réutilisation et du recyclage des déchets doivent toutefois faire l'objet d'évaluations comparatives au cas par cas avec leur élimination car les réutilisations ou recyclages peuvent être plus ou moins locaux et donc induire des transports pondéreux (teneur en eau parfois élevée des matières organiques).

Une partie de la recherche en économie circulaire va donc consister à chercher à réduire la production finale de déchets ultimes, donc à rendre valorisables par le marché les résidus qui ne l'étaient pas⁷⁰. Cela dépend donc de la capacité à identifier de nouvelles fonctionnalités aux matières résiduelles, ou à pouvoir les transformer de façon à leur donner des fonctionnalités désirées et demandées par le marché.

En particulier, le concept de bioraffinerie⁷¹ se définit comme une "industrie bio-intégrée, produisant à partir de la biomasse et au moyen d'une variété de technologies, à la fois des produits chimiques, des biocarburants, de l'énergie, des agromatériaux (incluant les fibres végétales) et des aliments et ingrédients alimentaires" (source : *Consortium Biorefiner Euroviev*), et lorsque la biomasse considérée est un résidu de l'activité humaine, ce concept se décline sous sa forme dite de "bioraffinerie environnementale"^{72,73} (voir la figure 6).

⁶⁷ TGAP : taxe générale sur les activités polluantes

⁶⁸ DERU : directive eaux résiduaires urbaines

⁶⁹ DCE: directive européenne sur l'eau

⁷⁰ Puyol D. et al, 2017, "Resource recovery from wastewater by biological technologies : opportunities, challenges, and prospects", *Frontiers in microbiology*, 7, article 2106

⁷¹ Nhu Quynh Diep et al, BIOREFINERY : CONCEPTS, CURRENT STATUS, AND DEVELOPMENT TRENDS *International Journal of biomass & renewables* – review janvier 2012.

⁷² Bernet N., 2010, Preface, *Review of Environmental Science and Technology*, 9, 1-2

⁷³ Venkata Mohan S. et al, 2016, "Waste biorefinery models towards sustainable circular bioeconomy : critical review and future perspectives", *Bioresource Technology*, 215, 2-12

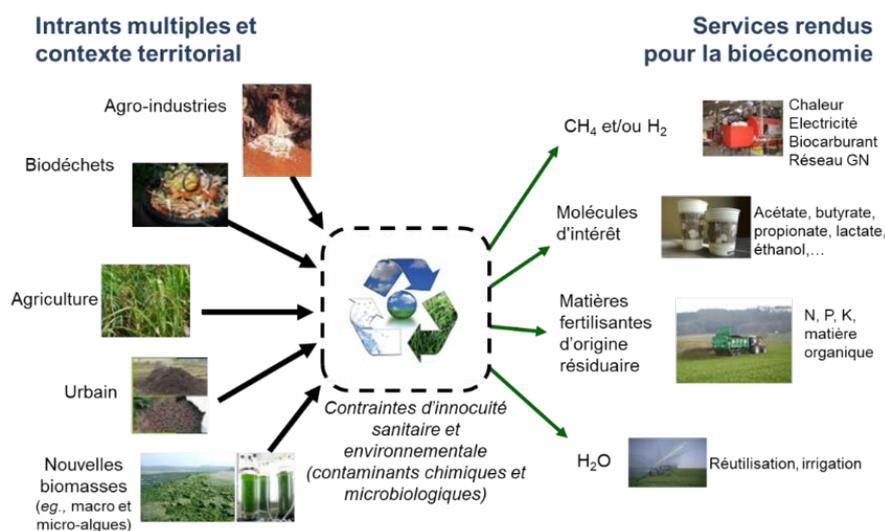


Figure 6 : La bioraffinerie environnementale

Dans ce cadre, les **objectifs sont de concevoir, de mettre en œuvre et d'optimiser des procédés biologiques sobres, performants, fiables et évolutifs autour de filières durables de valorisation et/ou traitement** de différents résidus. Cela conduit à élargir les potentialités des procédés de dépollution car, en plus de réaliser un traitement de la pollution, ces procédés – et les écosystèmes associés – recèlent des fonctionnalités très riches en termes de valorisation des sous-produits et de services rendus pour le développement d'une bioéconomie durable. A titre d'exemple, s'il est clair qu'aujourd'hui la digestion anaérobie est perçue comme pouvant produire un biogaz source de bioénergie, via le méthane, et un digestat valorisable en agronomie, bien d'autres applications sont possibles comme la production de biohydrogène et de molécules plateformes pour la conception de produits biosourcés. De même les stations d'épuration n'ont plus comme unique objectif de traiter les effluents mais aussi de valoriser les ressources contenues dans les eaux résiduaires (carbone, mais aussi nutriments et eau usée traitée).

Dans un souci d'optimisation de ces filières, les bioprocédés font appel à des écosystèmes de grande diversité, mis en œuvre dans des procédés complexes et souvent interconnectés, et se doivent d'intégrer des sources multiples d'approvisionnement selon un contexte territorial généralement contraint et subi. La nature des substrats impose également de garantir une innocuité environnementale et sanitaire des sous-produits (*i.e.* contaminants chimiques et microbiologiques) et l'ensemble de ces aspects doit être pleinement intégré selon une approche éminemment interdisciplinaire.

De manière générique, les actions à mener ont pour objet d'étudier les processus de transformation et de valorisation des éléments polluants majeurs ou à l'état de traces. Elles se positionnent à l'interface des activités humaines (production, transformation et usage) et des milieux récepteurs (naturels ou cultivés) dans une optique de recyclage.

Les processus de valorisation /traitement des polluants sont réalisés par des communautés microbiennes complexes en termes de composition, de diversité et de dynamique fonctionnelle. La complexité des substrats à traiter, les caractéristiques intrinsèques et encore mal connues des communautés microbiennes impliquées et leur mise en œuvre en milieu "ouvert" à d'autres microorganismes conduisent à rechercher une action en orientant les réactions de transformation par des prétraitements ciblés et optimisés de la matière entrante (chimiques, thermiques, mécaniques, enzymatiques,...), par une intervention sur les bioprocédés (par exemple imposer des pressions de sélection via l'optimisation des conditions opératoires, le couplage de réacteurs, l'intégration de systèmes innovants de type bio-électrochimiques, ...) ou directement par une modification des interactions biotiques au sein des écosystèmes.

Les « conditions techniques et économiques du moment » dépendent parfois de **considérations organisationnelles et de gouvernance** : bien des déchets « ultimes » des ménages (envoyés en incinération ou en décharge) pourraient faire l'objet de valorisation matière si une collecte séparée des biodéchets était organisée. Ainsi les verrous ne sont parfois pas que techniques et **requièrent le pouvoir explicatif et/ou opératoire des Sciences Humaines et Sociales (ingénierie sociale, incitations, réglementation, nudges)**. Il faut en effet parfois des conditions sociopolitiques particulièrement favorables pour pouvoir

modifier une gestion locale des déchets, tant le sujet peut être localement sensible de par la définition du déchet ultime (ce dont on cherche à se défaire). Sociologues, anthropologues et même spécialistes de psychologie sociale ne s'y sont pas trompés, les expressions prolégomènes « NIMBY ⁷⁴», « le déchet, c'est les autres », « out of sight, out of mind », « poubelle du territoire » sont suffisamment éloquentes.

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

Plus spécifiquement les fronts de science sur le sujet concernent la:

- Recherche d'indicateurs génériques de caractérisation de la matière organique et des écosystèmes impliqués,
- Connaissance et rôle des paramètres biotiques/abiotiques vis-à-vis des services rendus,
- Moyens de représentation de l'information et des processus (modélisation) d'intégration et d'action (pilottage) des procédés et des écosystèmes associés pour agir et ne plus subir,
- Evaluation et gestion du devenir et des impacts environnementaux et sanitaires des produits issus des procédés de traitement dans une optique d'éco-conception des filières.

Pour répondre à ces divers objectifs, la démarche peut consister à optimiser les technologies existantes, à proposer de nouveaux systèmes de prétraitement et de caractérisation, à intégrer des procédés innovants de rupture (*i.e.* les systèmes bio-électrochimiques) et à développer de nouveaux concepts (ingénieurs des écosystèmes, station de récupération des ressources de l'eau) en profitant de multiples compétences disciplinaires.

Les priorités de recherche peuvent ainsi se décliner :

- **à l'échelle du processus** par la caractérisation des cinétiques, des systèmes clés physiologiques et des dynamiques de populations microbiennes,
- **à l'échelle du procédé** par le développement de nouveaux systèmes d'épuration, par l'optimisation de l'hydrodynamique, de la dépense énergétique ou des rendements et productivités des installations, ainsi que par la mise en œuvre de techniques physico-chimiques de co-traitement.
- **jusqu'à l'échelle de la filière** par l'intégration des contraintes environnementales (*i.e.* impact quantitatif et qualitatif des produits résiduels de traitement sur les milieux récepteurs), sanitaires (*i.e.* minimisation des risques liés aux éléments organiques et microbiologiques), économiques (*i.e.* minimisation des investissements, diminution des intrants de fonctionnement, optimisation des performances) et sociétales (*i.e.* production d'éléments objectifs sur l'innocuité et la traçabilité des produits pour favoriser le développement des nouvelles filières de valorisation et de traitement, gestion des rivalités potentielles d'usages).

Concernant ces fronts de science, divers domaines d'applications sont concernés et encore peu explorés :

- **Le CO₂ en tant que source de carbone pour la bioéconomie.** Au-delà des diverses techniques de captage et de stockage du CO₂ aujourd'hui disponibles, les méthodes de séquestration biologique du CO₂ à l'aide de microorganismes comme catalyseurs pourraient conduire à des avancées importantes pour la bioéconomie. Qu'ils soient photosynthétiques ou non, divers microorganismes (microalgues, cyanobactéries, bactéries homoacétogènes, archae, ...) peuvent en effet assimiler et synthétiser le CO₂ pour produire de multiples produits, tels que l'hydrogène, des acides organiques, des alcools et autres molécules à hautes valeurs ajoutées⁷⁵. Ces molécules peuvent être utilisées dans l'alimentation humaine et animale, la chimie de synthèse, la cosmétique, la pharmacie, ou même s'inscrire dans un contexte énergétique avec la production de méthane renouvelable pour une gestion modulaire des réseaux énergétiques (concept du « power to gas »). Mais de nombreux verrous sont encore à lever : conception optimale de procédés avec accès non limitant à la lumière pour les organismes photosynthétiques, mélange et transfert de gaz en conditions triphasiques, couplage et intégration de procédés avec récolte et extraction à faible coût énergétique, interactions microalgues/cyanobactéries et bactéries endogènes

⁷⁴ NIMBY: Not In My BackYard

⁷⁵ S. Ventaka Mohan, J. Annie Modestra, K. Amulya, S. Kishore Butti, G. Velvizhi: A Circular Bioeconomy with Biobased Products from CO₂ Sequestration, Trends in Biotechnology, 34(6), 506-519, 2016.

présentes dans les écosystèmes naturels, colonisation exogène et prédation par des macroorganismes dans les systèmes ouverts, aérosolisation et impact sur la santé humaine,...

- **L'azote et le phosphore** ont des rôles importants pour la fertilisation de cultures et leur recyclage – via par exemple l'utilisation des digestats en combinaison avec l'extraction de molécules d'intérêt comme les acides humiques pouvant servir de biostimulants ou la fertirrigation issue de la réutilisation raisonnée des eaux usées traitées – doit être encouragé en tenant compte des risques potentiels pour la santé des Hommes et des écosystèmes naturels (pathogènes, micropolluants organiques et métalliques,...). Cela peut conduire à totalement repenser les stations d'épuration voire le concept même du traitement des eaux usées et des déchets pour parvenir à valoriser au mieux les ressources contenues dans les résidus de l'activité humaine. Mais au-delà, l'azote et le phosphore peuvent également servir de substrats principaux, et l'azote en particulier, pour la production de protéines microbiennes (via des bactéries, des champignons, des levures ou des microalgues) qui pourraient remplacer avantageusement les protéines animales et végétales tout en évitant des impacts importants sur l'environnement (i.e., lessivage et volatilisation aux champs évités)⁷⁶. Les verrous sont ici similaires à ceux du CO₂ avec en sus, des innovations à imaginer autour de l'utilisation de gaz (H₂, CO₂, CH₄, syngaz) qui permettraient de nouvelles voies de production.
- Dans ces diverses approches, la Nature peut être source d'inspiration et d'innovations. Au-delà des solutions basées sur la Nature⁷⁷, le biomimétisme est en particulier un chantier qui mériterait d'être investi. A titre illustratif, les systèmes digestifs sont, en termes de productivité, les meilleurs méthaniseurs qui soient, et de très loin devant tous les procédés imaginés selon une logique d'ingénierie. De même, des matériaux aux propriétés spécifiques (par exemple, étanchéité, plasticité, voire mémoire de forme) peuvent être conçus en s'inspirant de la Nature et il est clair que certaines fonctionnalités aujourd'hui non exploitées industriellement peuvent être amenées à un grand avenir et remplacer avantageusement celles obtenues à partir de produits pétrosourcés.

3.8. Bouclage des cycles

Eléments de contexte et défis à relever

Au cours des 50 dernières années, la multiplication par 2,5 de la production alimentaire mondiale s'est accompagnée d'une multiplication par 8 de la quantité d'engrais azotés et par environ 4 de la quantité d'engrais phosphatés. L'utilisation généralisée d'engrais synthétiques à base d'azote (N) et de phosphore (P) a donc entraîné une augmentation sans précédent de la production agricole, mais les systèmes et les régions agricoles se sont spécialisés, la circulation de l'azote dit « réactif » a plus que doublé, et les cycles N et P se sont localement "découplés"⁷⁸, entraînant des pertes dans l'atmosphère ou dans l'hydrosphère avec un impact spectaculaire sur l'environnement⁷⁹. Par exemple, à l'échelle européenne, les sols agricoles représentent 54 % de la source des émissions de N₂O⁸⁰, puissant gaz à effet de serre au pouvoir de réchauffement global environ 300 fois supérieur à celui de CO₂, et pour la France, 81 % des émissions totales de N₂O proviennent de l'agriculture, dont 82 % des émissions des cultures fertilisées et 4,5 % des élevages⁸¹. Contrairement à l'azote, la source de phosphate est non renouvelable, fournie par seulement cinq pays qui détiennent 90% des réserves mondiales de P, et la ressource en P pourrait finir par devenir limitante même dans les terres agricoles, en raison de la demande croissante⁸². On estimait qu'un total de 5,7 milliards d'hectares de terres dans le monde contenait déjà un faible niveau de P assimilable par les plantes⁸³. Par ailleurs l'utilisation intensive de pâturages et de boues animales

⁷⁶ I. Pikaar, S. Matassa, K. Rabaey, B. L. Bodirsky, A. Popp, M. Herrero, W. Verstraete. Microbes and the next nitrogen revolution, *Environmental Science & Technology*, 51, 7297-7303, 2017.

⁷⁷ https://en.wikipedia.org/wiki/Nature-based_solutions

⁷⁸ Billen G. et al., 2011. Nitrogen flows from European watersheds to coastal marine waters. In: Sutton, M. A. (ed.). *The European Nitrogen Assessment*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 271-297. ISBN 9781107006126

⁷⁹ Erisman J.W. et al., 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world, *Nature Geoscience* 1, 636-639 / Sutton M.A., et al. 2011, Too much of a good thing. *Nature* 472, 159–161.

⁸⁰ Hertel O., et al. 2012. Governing processes for reactive nitrogen compounds in the European atmosphere. *Biogeosciences* 9, 4921-4954.

⁸¹ CITEPA, 2016. <https://www.citepa.org/fr/air-et-climat/polluants/effet-de-serre/protoxyde-d-azote-n2o>.

⁸² FAO, 2015. *World fertilizer trends and outlook to 2018*. ISBN 978-92-5-108692-6. <http://www.fao.org/3/a-i4324e.pdf>

⁸³ Cakmak I., 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil* 247, 3-24

pour la fertilisation, avec des apports élevés de P provenant de concentrés non agricoles, principalement importés (par exemple le soja), peut entraîner des transferts importants de P vers les écosystèmes aquatiques par l'érosion des sols, avec des effets négatifs dus à l'eutrophisation.

L'intensification de l'agriculture dans les systèmes de culture a aussi conduit à une ouverture des cycles des nutriments, d'abord favorisé par l'introduction de la fertilisation minérale intensive N et P qui a autorisé le découplage de l'offre et de la demande de nutriments (i) dans le temps : la fertilisation a profondément modifié la succession des cultures, réduit l'occupation des sols par les plantes et rendu marginale la contribution de la fixation de l'azote et de la minéralisation des matières organiques à la fourniture de nutriments⁸⁴; (ii) dans l'espace : la fertilisation minérale et le transport peu coûteux des engrais ont rendu possible des systèmes agricoles spécialisés à une échelle régionale et à l'échelle mondiale, augmentant ainsi les flux de nutriments à l'échelle planétaire, et leurs pertes⁸⁵.

A partir des années 1990 et l'émergence des questions relatives au changement climatique global (sommets de Rio (1992) et Kyoto (1997)), le rôle des cycles globaux du carbone et de l'azote dans la prévision de futurs scénarios climatiques et du potentiel de stockage du carbone dans la biosphère continentale est devenu évident, et ils ont fait désormais l'objet d'enjeux politiques et économiques mondiaux. Au milieu des années 2000, ces enjeux climatiques et la raréfaction prévisible des ressources fossiles, ont conduit les Etats à proposer de substituer au carbone d'origine fossile, le carbone d'origine végétale ou « carbone renouvelable ». En agriculture, cela implique une évolution rapide des modes d'occupation et de gestion des terres et corrélativement la prise de conscience de l'importance des matières organiques à la fois indispensables à la fertilité des sols, sources de carbone « renouvelable », et puits et sources des principaux éléments liés aux gaz à effet de serre (C, N). Le développement de l'initiative 4 pour mille⁸⁶, proposée par la France en 2015 lors de la COP21⁸⁷ et portée au niveau international, vise à sensibiliser les Etats et mobiliser les scientifiques sur le rôle des sols agricoles et non agricoles dans l'atténuation des émissions de CO₂, en raison de son potentiel de séquestration du carbone atmosphérique sous forme organique. Cela pose crucialement la question des compromis à gérer dans les divers usages des biomasses et produits organiques, celle du recyclage des produits et déchets issus des transformations alimentaires et non alimentaires, et ne peut occulter la nécessaire gestion couplée du cycle du carbone avec ceux des autres éléments majeurs.

L'évolution nécessaire des systèmes de culture vers une plus grande autonomie énergétique et nutritionnelle, pour réduire les intrants chimiques, économiser les ressources et réduire les impacts environnementaux, mobilise des leviers inspirés des écosystèmes faiblement anthropisés qui sont autant de défis à relever. On peut distinguer les mesures visant à améliorer l'efficacité des intrants minéraux et organiques des mesures visant à remodeler les systèmes de culture⁸⁸ :

1- L'amélioration des pratiques de fertilisation, vise à accroître la récupération et l'efficacité de l'azote appliqué, en généralisant le calcul prévisionnel des doses d'engrais à apporter (obligatoire dans les zones vulnérables), en adaptant les dates d'apport à la cinétique des besoins, et les formes d'apport aux conditions pédoclimatiques notamment pour minimiser les pertes, ii) en développant le suivi tactique de l'état de nutrition des peuplements grâce à des indicateurs et en tenant compte de la variabilité spatiale intra-parcellaire grâce aux outils numériques de l'agriculture de précision.

⁸⁴ Lashermes G., et al 2010. Typology of exogenous organic matters based on chemical and biochemical composition to predict potential nitrogen mineralization. *Bioresource Technology*, 101, 157-164

⁸⁵ Le Noë J., et al., 2017, How the structure of agro-food systems shapes nitrogen, phosphorus and carbon fluxes: the generalized representation of agro-food system applied at the regional scale in France. *Science of the Total Environment* 586, 42-55.

⁸⁶ (<http://4p1000.org/>)

⁸⁷ COP : Conference of parties ; <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>

⁸⁸ Hufnagl-Eichiner S., et al., 2011. Assessing social–ecological coupling: Agriculture and hypoxia in the Gulf of Mexico. *Global Environmental Change*, 21(2), 530-539

2- La reconception des systèmes de culture, basée sur la connaissance et la valorisation des interactions biologiques dans les sols et sur la diversification des espèces végétales^{89,90} :

- L'augmentation des cultures de légumineuses dans les systèmes de culture⁹¹ qui permet l'élimination des engrais minéraux synthétiques sur certaines phases des rotations culturales ;
- Les pratiques de couverture du sol pendant les périodes d'inter-culture grâce à des Cultures Intermédiaires Piège A Nitrate (CIPAN) et des Cultures Intermédiaires à Vocation Énergétique (CIVE) comme moyen d'intercepter les nutriments, les recycler ou les exporter (CIVE) en contribuant aux couplages de cycles en inter-culture et limitant les pertes par lixiviation du nitrate vers les aquifères ;
- L'introduction de plantes vivaces et semi vivaces dans les agrosystèmes, et le développement de systèmes agroforestiers mélangeant spatialement arbres et cultures annuelles, apparaissent également comme des agrosystèmes prometteurs qui améliorent dans le temps et l'espace les interactions biotiques et abiotiques. La couverture permanente des sols par des biomasses végétales vivantes et mortes, combinée à un travail réduit du sol, constitue le fondement de l'agriculture de conservation⁹².
- Une diversification des cultures à l'échelle des parcelles et des systèmes de culture et des paysages apparaît également comme un levier majeur pour accroître la durabilité des systèmes de production agricole, en réduisant les intrants (eau, pesticides et engrais azotés), en augmentant l'hétérogénéité des mosaïques d'habitats ou en réduisant les pertes de rendement dues aux rendements trop élevés de la même espèce. De plus en plus de recherches suggèrent que le niveau de régulation interne de la fonction dans les agroécosystèmes dépend largement du niveau de biodiversité végétale et animale présente^{93,94}.

Les enjeux scientifiques et méthodologiques, les priorités de recherche

Ces leviers s'appuient sur les connaissances des processus, en particulier ceux de couplage et le rôle des microorganismes du sol (diversité, fonctionnement physiologique vis-à-vis du carbone, de la stœchiométrie, de l'efficacité enzymatique), l'importance des interactions entre les fonctions physiques, chimiques et biologiques du sol, les interactions entre traits fonctionnels des plantes, des organismes du sol, et flux de nutriments, etc. Les modèles numériques permettent de concevoir les "bons" assemblages de plantes dans le temps et dans l'espace, mais aussi quantifier les échanges de nutriments et les flux de biomasse à différentes échelles spatiales selon divers scénarios.

Le développement d'une économie basée sur l'utilisation et le recyclage de ressources d'origine végétale en substitution aux ressources fossiles n'est donc pas forcément synonyme de durabilité environnementale et climatique, les priorités et les questions sont alors de :

- **Concilier une demande accrue en biomasse alimentaire et non alimentaire**, et produits issus du végétal, **et la nécessaire réduction des intrants chimiques**, notamment les engrais minéraux de synthèse.
 - Comment boucler les cycles, c'est-à-dire supprimer les pertes pour diminuer les apports, favoriser le recyclage des nutriments, augmenter la fixation symbiotique ?

⁸⁹ Duru M., et al., 2015. Designing agroecological transitions: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(4), 1237-1257.

⁹⁰ Recous S. et al., 2018, C-N-P Decoupling Processes Linked to Arable Cropping Management Systems in Relation with Intensification of Production. *In Agroecosystem Diversity: Reconciling contemporary agriculture and environmental quality*. Lemaire, G., et al., (Eds), Publisher: Academic Press, Elsevier, Chapter: 3, pp 35-45

⁹¹ Siddique, K. H. M., et al., 2012. Innovations in agronomy for food legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 45–64

⁹² Scopel E., et al. 2013, Conservation Agriculture cropping systems in temperate and tropical conditions, performances and impacts. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 113–130.

⁹³ Kremen, C., Miles, A., 2012. Ecosystem Services in Biologically Diversified versus Conventional Farming Systems: Benefits, Externalities, and Trade-Offs. *Ecological and Society*, 17(4)

⁹⁴ Dwivedi, S. L., et al., 2017, Diversifying Food Systems in the Pursuit of Sustainable Food Production and Healthy Diets. *Trends in Plant Science*, 22, 842-856.

- **Accroître le recyclage des résidus végétaux, déchets et coproduits** de l'agriculture, l'élevage et l'industrie, en substitution à la nutrition minérale en respectant les contraintes stœchiométriques inhérentes à la production végétale et aux transformations biologiques, et en s'assurant i) de l'adéquation de la ressource aux besoins des cultures (disponibilité, nature, logistique) et de l'efficacité pour la nutrition des cultures, ii) du bouclage des cycles c'est-à-dire de la limitation des pertes vers l'atmosphère (NH₃, N₂O) et vers les aquifères (NO₃ principalement) et iii) de l'innocuité pour les milieux et pour la chaîne alimentaire.
 - Comment caractériser facilement cette diversité de composition des produits ?
 - Avec quels outils accompagner la décision de l'agriculteur ou du prescripteur dans un contexte de variabilité forte de la masse et de la composition, en réponse à la diversité des sources et des procédés de transformations ?
- **Gérer les compromis entre mobilisation de la biomasse végétale** (via l'exportation) pour la production d'énergie, de bioproduits et d'agro-matériaux, **et le recyclage nécessaire vers les sols** pour maintenir voire augmenter la fertilité des sols nécessaire à la production végétale mais aussi favoriser la séquestration du carbone pour réguler le climat (4 pour mille).
 - Quelles cultures sur quels sols ?
 - Quelle fréquence d'exportation pour maintenir la fertilité des sols et donc la durabilité de la production agricole et forestière ?
- **Reconcevoir les systèmes de culture et développer des pratiques culturelles innovantes** en lien avec la gestion des cycles biogéochimiques pour réduire l'ouverture des cycles (rotations, couvertures du sol permanentes, légumineuses, apports de nouvelles matières fertilisantes d'origine urbaine, industrielle et agricole) etc.
 - Comment accompagner les innovations des agriculteurs, pour permettre de nouveaux marchés économiquement viables ?
- **Gérer la nutrition des cultures et la fertilisation des sols non pas « en cascade » mais « en boucle »** et ce, dans un contexte global impactant la gestion systémique des filières agricoles, urbaines et industrielles.
 - Comment traiter et valoriser les effluents et déchets solides issus des filières précitées par méthanisation sous forme d'énergie, de biomolécules et de matières recyclables (les digestats) pour contribuer au bouclage des cycles en agronomie, en permettant le retour au sol simultané de nutriments, de matières organiques et de minéraux qui auraient tendance à se concentrer dans les zones urbaines en raison du modèle actuel de ville « linéaire » ?

AXE 4 : les acteurs d'une société « biosourcée »

3.9. Connaissances et anticipation des marchés

Eléments de contexte et défis à relever

La transition d'une société qui repose essentiellement sur l'utilisation des ressources fossiles vers une société qui exploite durablement ses bioressources pour satisfaire ses besoins impose de revisiter les systèmes de production, transformation, distribution et usage d'aliments, d'énergie et de matériaux, ainsi que ceux du recyclage et de la gestion des déchets, tels que décrits dans l'ensemble des défis thématiques.

C'est au niveau des marchés dans leur diversité (matières premières, demi-produits, biens de consommation, services, etc.), que se croisent les enjeux technologiques et environnementaux avec ceux des exigences des industries (croissance, compétitivité) et des attentes des citoyens et des consommateurs. Dans ce contexte, l'évolution des marchés vers une bioéconomie soutenable est difficile à réaliser, compte-tenu de l'organisation actuelle et des forces en présence, très largement dominées par l'économie pétrosourcée. Le taux de pénétration du biosourcé par rapport au pétrosourcé est de l'ordre de 10% en moyenne. Même si le développement observé des marchés des produits biosourcés semble irréversible, les obstacles à franchir et les dynamiques selon qu'il s'agit de produit de masse ou de spécialité ne sont pas identiques, de même que les implications économiques et environnementales au sein d'un territoire ou entre territoires (et au-delà, en Europe ou au niveau mondial).

Un défi majeur à relever concerne le développement maîtrisé des marchés du biosourcé de manière à établir des niveaux de confiance et de risque acceptables par les acteurs. Cela signifie de pouvoir construire des chaînes de valeur bioéconomiques plus attractives économiquement que celles qui s'appuient sur les produits pétrosourcés. Pour cela, la description de l'ensemble des critères qui font la valeur d'un bioproduit sur un marché requiert l'acquisition de nouvelles connaissances car il faut que ces caractéristiques puissent être rendues comparables, standardisées et accessibles.

Pour évaluer les perspectives économiques (entre autres) associées au développement de systèmes basés sur la bioéconomie, il est indispensable d'analyser les comportements qui sous-tendent les décisions des acteurs impliqués. Du côté des producteurs agricoles, propriétaires forestiers ou industriels, il s'agit d'identifier leur propension à adopter de nouvelles technologies de production et à faire face à des risques différents. Cette aptitude à innover ou/et à adopter une autre technologie dépend naturellement de nombreux déterminants techniques mais également socio-économiques (connaissance des innovations ; confiance dans les filières d'approvisionnement, durée de l'engagement notamment dans le cas spécifique de productions par le secteur agricole de plantes pérennes, investissements déjà réalisés, anticipations sur l'évolution des prix etc.) et comportementaux (aversion au risque, à la perte, à l'incertitude, normes personnelles, normes sociales, etc.). Des modèles d'optimisation, prenant en compte les préférences des producteurs et leurs contraintes financières, techniques et réglementaires, permettent de construire des simulations sur l'évolution de l'offre et des relations d'approvisionnement entre producteurs dans une perspective d'économie circulaire.

Un domaine moins souvent exploré en raison de la difficulté d'accéder aux données est celui de la demande par les firmes de produits issus de la bioéconomie. Ces produits sont alors souvent des produits intermédiaires utilisés pour la fabrication de produits finaux à destination des consommateurs. A ce niveau de la chaîne de transformation, le prix, la régularité de l'approvisionnement et les fonctionnalités des produits ont un rôle essentiel dans la décision d'utilisation de ces produits issus de la bioéconomie.

Une fois caractérisés les comportements du côté offre (producteurs dans les secteurs de bioéconomie), il sera possible de construire une représentation (simplifiée) de la technologie de transformation utilisée dans les filières de bioéconomie et de la demande en produits biosourcés de ces filières dans une perspective d'économie circulaire. Une « remontée » d'échelle permettra alors de représenter des bilans ressources-emplois de biomasse au niveau régional, avec leur sensibilité à l'évolution des prix et autres attributs des produits.

Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche

Au vu du contexte et des défis à relever, les enjeux scientifiques sont les suivants :

- Identifier les facteurs techniques et socio-économiques de l'adoption, faire une typologie des déterminants (variables spécifiques du producteur, de l'environnement et du contexte, etc.)
- Développer des analyses de marketing stratégique en amont de la mise en œuvre territoriale, dans une approche d'innovation incrémentale pouvant renforcer la bioéconomie (approche *Market Pull*)
- Construire des protocoles d'observation et d'inférence statistique pour analyser l'adoption de technologies et pratiques (agricoles, industrielles) dans les filières de la bioéconomie ;
- Lancer des études prospectives sur les technologies nouvelles et de rupture encore au stade laboratoire afin de constituer et d'évaluer les « stocks de science » pour l'innovation (approche *Technology Push*).
- Favoriser la création de *living labs* (commun avec 3.10) associant les acteurs pour une bioéconomie territoriale durable où peuvent être testées les solutions et la dynamique des nouveaux marchés et les modes d'interactions et compromis entre parties prenantes rurales et urbaines.
- Construire des prospectives au moyen de *think tank* (économie verte ; nouvelles formes de financement de l'innovation ; organisation en systèmes, équilibres dans les compétitions/synergies/compromis entre différentes valorisations des bioressources ; biodiversité, etc.) et avec les pôles de compétitivité et partenaires (voir ci-dessous).

Les priorités de recherche

- Remontée d'échelle (*upscaling*) pour associer les bilans ressources-emplois de biomasse au niveau régional, avec le niveau des prix et les autres attributs des produits ;
- Analyse de la demande industrielle pour les produits issus de filières de bioéconomie, dans un contexte de données et informations limitées
- Evolution des protocoles expérimentaux standard en économie de la production, vers des contextes de secteurs intégrés (avec visibilité des attributs des produits probablement moins directe).
- Etude des conséquences démographiques, économiques et sociales sur les territoires des changements subis (changement climatiques) ou non, pour anticiper les conditions de marchés.
- Développement des outils de modélisation pour faciliter l'accès au marché de solutions « moins carbonées » (nouvelles fonctionnalités pour les aliments, nouveaux plastifiants ; nouveaux matériaux, carburants ; etc...)
- Etude des stratégies industrielles de labellisation (type éco-labélisation) sur les aspects environnementaux et de soutenabilité des produits
- Développement d'outils numériques de traçabilité et de systèmes de *block-chain*, pour la certification environnementale et/ou de durabilité des solutions proposées

3.10. Bioéconomie et citoyens-consommateurs

Eléments de contexte et défis à relever

La bioéconomie se développe en interaction avec des attentes, exigences et initiatives sociétales qui s'expriment à la fois à l'échelle locale, dans son ancrage territorial, et à l'échelle globale via des porteurs d'enjeux très variés. Les consommateurs constituent évidemment la demande finale pour des produits issus de la bioéconomie mais les citoyens sont également concernés et actifs dans la régulation des marchés comme dans leur création. Il convient donc de relever le défi de penser le développement de la bioéconomie à la croisée i) d'une économie comportementaliste de la demande sous contrainte d'informations incomplètes ou d'incertitudes radicales, ii) d'une étude des processus d'innovation et de création de marchés incubant et exprimant les attentes citoyennes et iii) d'une approche néo-institutionnaliste de la régulation et de la captation par l'institution de normes et de standards.

Les préférences et comportements des consommateurs influencent les types de produits et les choix technologiques de la bioéconomie, mais les prescripteurs de marché sont nombreux, relayant tant les promesses socio-techniques que les attentes sociétales. Cruciale est alors la question de l'information des consommateurs, l'expression de leur préférence pouvant inclure des biais cognitifs, et les approches en termes de *nudge* peuvent alors se révéler localement efficaces. La recherche sur la bioéconomie peut ainsi s'inscrire dans un champ de recherche en pleine extension.

Au-delà d'être un ensemble de consommateurs, les citoyens se fédèrent vis-à-vis de projets et d'intérêts communs et se constituent en prescripteurs à leur tour des transformations de durabilité et des

créations de marchés, souvent en lien avec des initiatives de niche ou d'élaboration de normes ou de standards. Les frontières entre citoyenneté et consommation sont donc mouvantes et parfois inexistantes. La complexité de ces processus de changement, de substitution et de création de valeurs à des échelles territoriales variées définit un champ d'investigation nouveau.

Via des processus de coordination, le développement de la bioéconomie repose sur différentes formes d'entrepreneuriat ou d'économie publique qui s'articulent aux initiatives citoyennes, aussi bien localement, par l'implantation de projets de territoire, que plus globalement, par l'objectif de préservation de l'environnement, de gestion du changement climatique et de plus grande autonomie vis-à-vis des ressources non renouvelables. Les trajectoires de développement d'une économie biosourcée sont donc le résultat d'une co-évolution entre les demandes des consommateurs, les attentes des citoyens, l'organisation économique des territoires et des filières, et la création technologique. Le caractère transformateur de ces trajectoires est à mieux connaître pour déployer une intelligence des transitions de durabilité autant du côté de la gouvernance des politiques transformatives que de celle des marchés du biosourcé.

Evolution de la demande : préférences et comportement des consommateurs

Pour évaluer les perspectives économiques associées au développement de systèmes basés sur la bioéconomie, il est indispensable d'analyser les évolutions de la demande pour les produits biosourcés, en comprenant les préférences et les comportements des consommateurs finaux mais aussi des firmes utilisant des produits ou services issus de la bioéconomie dans leur processus de production. Les méthodologies d'analyse des préférences et du consentement à payer des consommateurs pour différents attributs des produits alimentaires existants ou nouveaux sont bien maîtrisées par la recherche à INRAE. **L'un des défis porte sur la mesure des préférences pour des attributs de qualité du produit (objective ou non) et des attributs sociaux ou environnementaux attachés au produit** (issus du commerce équitable, respectant un cahier de charges en matière de bonnes pratiques environnementales, de bien-être animal, etc.). Dans le cas des produits biosourcés, il faut ajouter les questions de complémentarité et de substitution entre produits issus de la bioéconomie et leurs équivalents issus des ressources fossiles dans la structure de consommation, ainsi que les méconnaissances et incertitudes sur la nature du produit. Des études récentes (Bioways 2018⁹⁵, Sijtsema et al, 2016⁹⁶) montrent en effet que les consommateurs sont peu familiers des produits issus de la bioéconomie et les confondent par exemple avec les produits issus de l'agriculture biologique. **Un défi est donc d'affiner les méthodes d'évaluation des préférences dans un contexte de connaissances biaisées, incomplètes ou erronées.** Les raisons de cette méconnaissance et l'impact de l'apport d'information sur l'évolution du consentement à payer sont aussi des questions de recherche importantes à traiter, en synergie avec l'analyse des mécanismes de partage et de diffusion de cette information (également via les politiques publiques) et les éventuels processus de normalisation, labélisation et certification de produits « bioéconomiques ».

Dans la pratique, il est parfois difficile d'élucider les préférences pour les produits biosourcés car les marchés sont trop rares voire inexistantes, ou encore parce que la technologie fait l'objet de restrictions d'accès à l'information. Dans ce cas, **le défi porte sur la mobilisation des méthodes indirectes, notamment pour évaluer les consentements à payer des consommateurs pour des produits qui n'existent pas encore, mais dont les attributs peuvent être « valorisés » par les consommateurs** : méthodes de préférences révélées avec des protocoles expérimentaux en laboratoire ou de terrain quand on ne peut observer les comportements d'achat sur des marchés existants, ou méthodes de préférences déclarées avec des enquêtes d'évaluation contingente ou des expériences de choix discrets.

Les relations société – bioéconomie

La bioéconomie peut être vue comme un nouvel espace de croissance sous l'égide de comptabilités environnementales avec de potentiels impacts sociaux (emplois) et environnementaux (gestion durable des ressources naturelles) positifs. Elle est aussi largement fondée sur des processus d'innovations et sur la création de nouveaux marchés. Se pose toutefois la question de l'appropriation sociale de ces évolutions tout comme de l'appropriation économique des ruptures techni-économiques ou de la destruction créatrice de l'économie du carbone fossile. L'analyse du positionnement et des actions des collectifs socioprofessionnels et citoyens vis-à-vis de l'implantation de ces filières dans les territoires et plus généralement du développement de projets

⁹⁵ <http://www.bioways.eu/>

⁹⁶ <https://doi.org/10.1016/j.njas.2016.03.007>

bioéconomiques est aujourd'hui essentielle à la compréhension des dynamiques des systèmes bioéconomiques. Dès lors les frontières entre citoyenneté et consommation sont mouvantes et parfois inexistantes comme dans le cas du boycott. La complexité de ces processus de changement, de substitution et de création de valeurs à des échelles territoriales variées définit un champ d'investigation nouveau

L'influence des collectifs d'acteurs constitués sur les processus de changement, de substitution et de création de valeurs à des échelles territoriales variées définit un champ d'investigation à part entière. Il s'agit de comprendre la contribution des collectifs participant de l'action publique au sens large qui peuvent servir de relais aux industriels pour diffuser l'information sur les filières de bioéconomie, à l'administration du territoire et aux citoyens. De tels collectifs (constitués en général d'associations organisées au niveau local) ont vocation à contribuer aux instances d'information et de participation du public en amont de la mise en place d'unités de production/transformation sur un territoire. **La dynamique des collectifs citoyens mobilisés dans le secteur de la bioéconomie représente donc un troisième pilier important en relations avec celui des stratégies industrielles et celui des politiques publiques.** Le rôle des parties prenantes de l'éco-citoyenneté est central dans les processus de développement des filières, concernant la diffusion des informations techniques et économiques, mais aussi dans la définition de problèmes publics et des dispositifs de gouvernance des projets innovants.

Les projets industriels ou les actions publiques font parfois l'objet de controverses, les collectifs d'acteurs (notamment citoyens) jouent alors dans certains cas un rôle de modérateur voire d'opposition au développement de filières bioéconomiques sur les territoires. Qu'il s'agisse de la défense d'intérêts locaux (protection de l'environnement local, de la santé et du cadre de vie des habitants) ou globaux plus larges (changement climatique), une connaissance incomplète des caractéristiques des solutions proposées par la bioéconomie, ou encore des préférences majoritairement en faveur d'autres options technologiques, peuvent constituer des facteurs importants d'opposition. A noter cependant que des désaccords peuvent exister quant au développement de filières bioéconomiques sur certains territoires même avec une connaissance complète des caractéristiques de ces filières. Les processus de construction de l'action publique, en faveur ou opposés à la bioéconomie, peuvent dans certains cas être différents de ceux liés aux attitudes des citoyens face à des modifications technologiques (innovantes ou non) de filières de production ou de transformation affectant leur cadre de vie et l'image de leur territoire. Tout dépend de l'existence, dans l'instruction de projet industriels, de règles de représentation et de participation des citoyens, ce qui est par exemple le cas lorsque ces projets dépendent de décisions publiques (installations classées, etc.)

Les controverses mentionnées ci-dessus font partie de l'étude des relations sciences-société, qui inclut les nouvelles formes d'échange et de diffusion de l'information constituées par les nouvelles technologies (réseaux sociaux, notamment), mais également le rôle joué par les experts scientifiques. **Un des défis est de comprendre la façon dont ces derniers contribuent à la construction de référentiels technico-économiques en appui aux politiques publiques avec deux éléments centraux.** Le premier porte sur les relations entre la recherche scientifique et technique et les groupes d'intérêt, dont l'influence peut jouer en faveur ou non de l'application de principes de droits (principe d'information publique, principe de prévention, principe de précaution et bientôt principe de contribution à la limitation du changement climatique). Le second concerne la construction de normes sociotechniques sur les performances (et la rentabilité économique) à partir des processus de diffusion et d'échanges d'informations entre experts scientifiques, industriels et citoyens, notamment sous l'égide des analyses de la captation des normes.

3- Co-innovation et gouvernance de la bioéconomie

On assiste depuis quelques décennies à un souhait des collectifs locaux de prendre leur destin en main face à la mondialisation. Démocratisation de la démocratie (représentative) et retour au local, sensibilisation aux impacts environnementaux locaux ou globaux, voire parfois retour au fait main ou à la *low-tech*, concourent à l'émergence de projets citoyens⁹⁷ (avec ou sans l'aval ou le soutien des élus locaux). Les plus emblématiques sont sans doute la re-municipalisation de services techniques comme la gestion de l'eau, le développement des énergies décentralisées ou de circuits agroalimentaires courts (AMAP⁹⁸) ou plus respectueux de l'environnement local

⁹⁷ <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/dossiers-comprendre/projets-citoyens-developpement-energies-renouvelables>

<https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/etude/les-projets-participatifs-et-citoyens-denergies-renouvelables-en>

⁹⁸ AMAP association pour le maintien d'une agriculture paysanne

(Agriculture Biologique (AB)). La bioéconomie, par ses circuits potentiellement courts et ses innovations potentiellement *low-tech*, peut s'insérer dans cette mouvance.

Le défi porte alors sur la capacité à élaborer et à tester des normes en l'absence de dispositifs opérationnels pour certaines filières de bioéconomie, au-delà de pilotes expérimentaux à petite échelle. La mise en place de dispositifs de type *living labs* est une solution intéressante pour conjuguer cet objectif avec celui d'objectiver la perception qu'ont les citoyens de la bioéconomie. De tels dispositifs de science participative incluent des lieux de diffusion d'informations entre scientifiques, industriels et citoyens, ainsi que des expérimentations contrôlées dont les résultats peuvent être capitalisés dans un processus de constitution de normes.

Mais, au-delà de ces expérimentations, la question de la coordination du développement de la bioéconomie repose sur la gouvernance de différentes formes d'entrepreneuriat, d'exploration critique et d'économie publique qui tendent à s'articuler aux initiatives citoyennes, avec une attention de plus en plus forte à la composition d'un *policy mix* dans la gestion du changement climatique et de la recherche d'une plus grande autonomie vis-à-vis des ressources non renouvelables. Les trajectoires de développement d'une économie biosourcée sont donc le résultat d'une co-évolution entre demandes des consommateurs, des attentes des citoyens, l'organisation économique des territoires et des filières, et la création technologique. La gouvernance des transformations sociotechniques suscitée, portée ou suggérée par la bioéconomie comprend alors des enjeux importants de politique scientifique et technique et d'innovation (*ST&I Policy*). La mise à l'agenda européen des politiques transformatrices *mission-oriented*, contient alors une intensification de la participation multi-niveaux des citoyens et des « consomacteurs ». Il s'agit donc de considérer comme un défi la compréhension des politiques dédiées à la bioéconomie et à la façon dont la gouvernance des transformations et des innovations industrielles plus « *grass-root* » voit le jour de façon inclusive au sein de l'agenda des ODD.

Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche

Les enjeux

- Analyser la diffusion des connaissances sur les propriétés des produits, les lieux et mécanismes de partage de l'information, les stratégies privées et le rôle d'accompagnement des politiques publiques.
- Identifier les relations de substitution/complémentarité avec les produits "conventionnels" (non issus de la bioéconomie) et le consentement à payer des consommateurs pour les attributs des produits biosourcés
- Comprendre le rôle des collectifs d'acteurs territoriaux dans la construction, la mise en place ou le blocage de projets bioéconomiques ancrés sur un territoire.
- Etudier la dynamique des controverses et des relations science-société en association avec les filières basées sur la bioéconomie
- Etudier le rôle des associations citoyennes dans les dynamiques socio-politiques de création de marché et de normes ou de standards de la bioéconomie
- Etudier de façon comparative (au niveau régional et international) les trajectoires de projets biosourcés pour caractériser des dynamiques socio-techniques écocitoyennes.

Les priorités de recherche

- Faire évoluer les protocoles expérimentaux standards en économie de la consommation et de la production, pour prendre en compte l'impact des connaissances incomplètes, l'effet des controverses et des incertitudes/méfiance envers des produits nouveaux, et les attitudes vis-à-vis d'attributs non directement observables.
- Développer l'analyse des promesses sociotechniques et de la gouvernance des transformations induites par le développement d'une économie biosourcée et des enjeux normatifs associés
- Adapter des *living labs* en y incorporant la possibilité d'expérimenter la mise en place d'unités pilote de production mobilisant des ressources locales de biomasse et contribuer à la réflexion européenne sur les *living labs* et leur rôle dans les transitions de durabilité.

- Développer une analyse en sociologie des sciences et techniques sur les controverses et la perception de la bioéconomie territoriale, notamment en abordant les enjeux de production et de mobilisation de connaissances pour la modélisation (plante ; procédé ; ACV sur filière ; land-use)
- Développer les mix-méthodes pour l'analyse des réseaux de sociabilité des innovations, des *living-labs* et des formes distribuées d'exploration via des projets territoriaux du biosourcé.

3.11. Politiques et actions publiques : justification, construction, évaluation

Eléments de contexte et défis à relever

Les projets de la bioéconomie reposent souvent sur des actions publiques visant à favoriser leur développement. Des exemples d'instruments de politique sont a) les systèmes de normalisation et de certification associés à des processus de transformation et de distribution de produits issus de la bioéconomie; b) des politiques d'accompagnement (subventions, formations, etc.) des transitions, à la fois dans les industries et dans les systèmes alimentaires, vers des technologies répondant aux critères de respect de cahiers des charges liés à la bioéconomie.

Trois questions au moins se posent quant à l'intervention publique :

La première est celle de la justification d'une intervention publique. Les économistes se réfèrent souvent aux défaillances du marché qui justifient une action 'correctrice'. La présence d'externalités est un exemple classique mais d'autres imperfections de marché existent (marché non concurrentiel, asymétrie d'information, bien public...). L'intervention publique est alors vue comme un moyen d'améliorer le fonctionnement des marchés. Les outils permettant de corriger ces imperfections dépendent de la nature de l'imperfection. Ce qui renvoie à la question de la forme 'optimale' d'intervention. Dit autrement, les outils d'intervention publique ne sont pas les mêmes selon qu'il s'agit de corriger un problème d'information ou un problème d'externalités. Une question associée, traitée par l'économie publique, porte sur l'éventuelle incompatibilité entre les objectifs des politiques publiques, conduisant en pratique à de possibles incohérences dans les instruments de politique

Dans un deuxième volet, il faut aussi s'interroger plus largement sur **le processus d'élaboration de l'action publique**, le rôle que jouent les différents porteurs d'intérêt dans la mise à l'agenda et l'orientation d'une politique (la sémantique employée, les objectifs affichés, les cibles de l'intervention, les dispositifs et critères d'évaluation). **L'analyse de la façon dont se construit l'action publique renvoie notamment à l'examen des interactions entre les acteurs qui souhaitent faire émerger (ou s'opposer) à une action publique.** Il est important de souligner que la « réception » des acteurs sur les territoires (consommateurs, résidents proches des centres de transformation, etc.) vis-à-vis de ces filières peut avoir un effet de « retour » (*feedback loop*) vers la mise à l'agenda et la conception des politiques publiques concernées. C'est là un travail qui doit être porté avec l'appui des sciences politiques et des sociologies, voire des historiens.

Un troisième volet consiste à **s'intéresser à l'impact des politiques publiques.** On distingue classiquement les évaluations *ex ante* consistant à évaluer les effets potentiels d'une intervention publique (et en pratique bien souvent à comparer différentes options de politiques publiques, (voir par exemple⁹⁹ dans le cas des biocarburants), des évaluations *ex post* consistant à mesurer les effets de la mise en place d'une politique en cherchant à reconstituer finement la situation contrefactuelle (dans le cas plus général des politiques industrielles, voir par exemple¹⁰⁰). Dans le cas de la bioéconomie, l'évaluation *ex post* sera d'autant plus riche en enseignements qu'elle pourra porter sur un nombre suffisant de filières différentes basées sur la bioéconomie. Il est de plus vraisemblable que la variété de cas d'études concrets de bioéconomie, en particulier sur un territoire de faible taille, soit trop limitée pour une évaluation *ex post*. Dans le cas contraire, l'évaluation devra être du type *ex ante* et mobiliser des techniques d'économie expérimentale, éventuellement associées à des outils de simulation.

⁹⁹ Cui, J., H. Lapan, G. Moschini, Cooper J. (2011). Welfare Impacts of Alternative Biofuel and Energy Policies. American Journal of Agricultural Economics 93 (5): 1235–56.

¹⁰⁰ Criscuolo C., Martin R., Overman H.G., Van Reenen J. (2019). Some causal effects of an industrial policy. American Economic Review, 109(1):48-85.

Les défis majeurs sont les suivants. Il s'agit tout d'abord de **construire une typologie de politiques publiques pertinentes pour le développement de la bioéconomie**, ou encore qui influencent ce développement (par exemple, des politiques agricoles ou environnementales impactant l'usage des terres, la production de biomasse, etc.) Cette typologie peut être construite selon les secteurs et l'échelle de décision (agriculture, ménages résidentiels, industries ; collectivités territoriales, régions, pays, Europe, etc.). Cette construction constitue un défi majeur potentiel en raison de la multitude de politiques dont les objectifs ne sont pas toujours alignés, de la hiérarchie de certaines politiques entre elles (liée au niveau décisionnel) et de leur dynamique.¹⁰¹ **Un deuxième défi concerne la caractérisation des instruments et mesures contenus dans ces politiques publiques.** Les propriétés des politiques construites pour répondre à des objectifs d'approvisionnement en agriculture et forêt, de protection de l'environnement, de santé humaine, etc. sont bien étudiées et une description de leurs performances attendues est possible dans un grand nombre de cas. Par contre, dans le cas de la bioéconomie, un exercice comparable doit encore être mené, s'agissant de politiques modifiant potentiellement le comportement d'acteurs dans plusieurs secteurs interconnectés, ainsi que l'organisation des filières et des marchés. Si les propriétés théoriques de différents instruments de politique, pris un par un (taxe ou subvention sur la production ou les intrants, quotas d'utilisation, norme technique, marché de droit, etc.) sont connues (critère de coût-efficacité, facilité de mise en place, effet redistributif, etc.), il n'en va pas de même pour des combinaisons d'instruments inclus dans des politiques multi-sectorielles de développement de la bioéconomie. En particulier, et en relation avec la thématique du comportement des producteurs, transformateurs (cf 3.9), consommateurs et citoyens (cf 3.10), les effets attendus des politiques publiques doivent être précisés en termes de sensibilité des acteurs au niveau et à la nature des instruments de politique. Le défi majeur à ce niveau concerne donc la mesure (l'estimation) de l'impact attendu sur les différentes catégories de parties prenantes (élasticité de la demande aux prix et aux taxes ; propension industrielle à adopter en fonction d'un taux de subvention ; sensibilité des citoyens à une campagne d'information, etc.)

Une fois réalisées l'identification et la caractérisation des différentes politiques publiques pertinentes, **un dernier défi majeur porte sur la comparaison des coûts et bénéfices associés à ces politiques.** Il s'agit en effet de fournir des éléments précis en appui aux décideurs publics afin de les guider dans leur choix d'instruments, en fonction des contextes locaux et sectoriels, et surtout des objectifs de la puissance publique en matière de bioéconomie. Cette comparaison des politiques peut être menée par une analyse coût-bénéfice, une approche coût-efficacité ou une forme simplifiée d'analyse multicritère, en fonction de la disponibilité des données. Ce dernier défi porte ainsi sur l'adaptation d'approches de type ACB (Analyse Coût-Bénéfices) aux politiques de développement de la bioéconomie, qu'il s'agisse de projets d'investissements (de long terme), de développement économique d'un territoire, ou de mesures de plus court terme.

Enjeux scientifiques et méthodologiques, priorités de recherche

Au vu du contexte et des défis à relever, les enjeux scientifiques sont les suivants :

- Propositions de politiques publiques adaptées aux différents types de projets, aux objectifs des différents territoires, et répondant à différents critères (par exemple objectifs de réduction des émissions de GES mais aussi objectifs de réduction des inégalités territoriales, ...)
- Articulation des politiques publiques selon l'échelle territoriale ; compatibilité et cohérence de l'action publique, y compris celle ne visant pas directement les systèmes bioéconomiques ; interaction entre politiques publiques
- Impact des politiques publiques : évaluation *ex-ante* et *ex-post* des politiques appliquées à différents niveaux (état, région, ...), adaptation à la bioéconomie des analyses multicritères, analyses coût-bénéfices et analyses coût-efficacité, mobilisation quand c'est possible d'approches expérimentales pour l'évaluation (expériences économiques de laboratoire, de terrain, expériences de choix discrets, expériences sociales)

Priorités de recherche

- Caractériser les interactions entre les différentes politiques s'appliquant à un territoire et impactant directement ou indirectement le développement de systèmes bioéconomiques. Mettre en évidence les

¹⁰¹ Dietz, T.; Börner, J.; Förster, J.J.; Von Braun, J. Governance of the Bioeconomy: A Global Comparative Study of National Bioeconomy Strategies. *Sustainability* 2018, *10*, 3190.

complémentarités et les oppositions (en particulier, entre différents niveaux institutionnels ou de politiques publiques).

- Appliquer les différents outils d'évaluation de politiques publiques à des cas concrets pour produire des résultats mais aussi dans le souci de développer une approche plus générique articulant l'apport des différents outils d'évaluation.
- Développer des modèles de représentation des systèmes bioéconomiques permettant d'évaluer l'impact des politiques publiques, intégrant les variables d'intérêt impactées par les politiques publiques.
- Systématiser les évaluations des impacts non-marchands des systèmes bioéconomiques.

4. RECOMMANDATIONS

4.1. Quantifier les flux de matière et d'énergie

De la production des biomasses jusqu'aux produits biosourcés les flux de matières et d'énergie sont au cœur de la bioéconomie et insuffisamment pris en compte. Ils doivent être mieux identifiés, tracés, à toutes les échelles et dans toute leur complexité, afin d'être en mesure de les réduire et d'assurer le bouclage des cycles des macro- (tout particulièrement le carbone, l'azote, le phosphore sans oublier l'eau) et microéléments. Si le rôle des cycles du carbone et de l'azote dans la prévision des futurs scénarios climatiques et du potentiel de stockage du carbone et de l'azote dans la biosphère est devenu évident, la question cruciale des compromis et des synergies avec la production et l'exportation de biomasse pour la bioéconomie reste à approfondir.

Plusieurs aspects doivent être considérés autour des quatre questions suivantes :

- Quelles innovations techniques et organisationnelles proposer pour optimiser les exportations de biomasses des différents systèmes de production issus de différents territoires pour tendre vers un bouclage de cycles des éléments tout en répondant aux objectifs d'approvisionnement ?
- Comment repenser l'organisation des unités de transformation dans une logique d'écologie industrielle territoriale pour favoriser les échanges de matières et d'énergie trans-filières, leur recyclage et réduire les émissions ?
- Comment appréhender et modéliser les flux de carbone renouvelable lors du cracking et de la transformation en cascade (linéaires ou circulaires) de la matière végétale et sa transformation ?
- Comment accroître le recyclage des résidus végétaux, des déchets et des coproduits de l'agriculture, de l'élevage, de l'industrie et des consommateurs, en substitution à la nutrition minérale tout en assurant l'adéquation de la ressource aux besoins des cultures, la limitation des pertes vers l'atmosphère et les aquifères et l'innocuité pour les milieux et la chaîne alimentaire ?

4.2. Développer des approches et outils pour accompagner la transition

Approches dynamiques de modélisation

Afin d'analyser de tels systèmes complexes, les approches dynamiques peuvent permettre une compréhension des mécanismes menant à l'émergence de comportements collectifs. Parmi ces outils, nous pouvons citer les approches de type Equations aux Dérivées Partielles (EDP) qui sont classiquement utilisées pour modéliser et caractériser les dynamiques de systèmes bioéconomiques : détermination du *Maximum Sustainable –or economic Yield*, la stabilité des équilibres d'exploitations, évolution des biomasses etc. Les modèles individus-centrés, quant à eux, décrivent les comportements individuels d'agents en interaction entre eux-mêmes et avec leur environnement. Ces approches, notamment lorsqu'elles sont spatialisées, sont particulièrement propices à la prise en compte de la dimension territoriale des systèmes bioéconomiques. Cependant ces modèles peuvent présenter un grand nombre de variables d'état rendant difficile leur analyse théorique et leur exploration. Il est alors nécessaire de développer des stratégies d'exploration de modèles à travers de nouvelles avancées technologiques et algorithmiques. De plus, les différentes approches utilisées en bioéconomie n'ont pas forcément le même formalisme, i.e. modèle agents vs modèle EDP, modèles dynamiques vs modèles statiques. Cela est principalement dû à l'utilisation d'outils spécifiques disciplinaires propres à des communautés scientifiques. Ces différentes approches mathématiques devront donc être partagées pour permettre d'améliorer notre compréhension de la bioéconomie à l'échelle du territoire.

Acquisition/traitement de données hétérogènes ; gestion des données manquantes

Les bioressources disponibles et les politiques territoriales existantes présentent des spécificités qui entraînent des hétérogénéités en terme de données. L'objectif est de mesurer et caractériser (qualitativement et quantitativement) les ressources existantes des territoires non seulement biologiques et technologiques mais aussi sociologiques, économiques, organisationnelles et politiques pour caractériser les conditions de déploiement d'une bioéconomie territoriale durable. Ces données servent : 1) à l'analyse qualitative de la bioéconomie; 2) à l'analyse quantitative de la bioéconomie à travers les modèles dynamiques et les approches d'analyse de cycle de vie (ACV et ACV sociales). Une difficulté de l'hétérogénéité des sources de données est

la modélisation des données d'un ensemble de concepts (ontologie) afin de pouvoir les regrouper et les analyser. Une autre difficulté concerne la gestion des données manquantes ainsi que la prise en compte d'incertitudes dans les données. Les approches mobilisables sont : les statistiques, les approches probabilistes, les approches d'intelligence artificielle (IA.)

Développement d'outils d'aide à la décision multicritères

Une fois les systèmes bioéconomiques formalisés à travers des modèles dynamiques, il est nécessaire de développer des outils d'aide à la décision. Les méthodes classiques d'aide à la décision consistent à déterminer des politiques d'action par rapport à des objectifs de durabilité. A titre d'exemple, des politiques de régulation de type quotas ou « *catch share* » sont mises en place en Europe pour atteindre le « *Maximum Sustainable Yield* » pour les pêcheries. Ces méthodes sont essentiellement basées sur des approches d'optimisation multicritères. Cependant, les solutions résultantes peuvent être fragiles lorsqu'elles sont soumises à des événements incertains. Une autre approche consiste à définir un ensemble de solutions respectant des contraintes durables, e.g. la théorie de la viabilité ou les approches de type « *tolerable window approach* ». Ces approches permettent de proposer une ensemble de politiques d'actions qui peuvent être mises en balance dans un second temps par rapport à d'autres critères, qui peuvent être qualitatifs.

Approches multi-échelles/multi-niveaux

Les stratégies bioéconomiques et territoriales doivent prendre en compte plusieurs échelles spatiales et temporelles. En effet, ces échelles spatiales et temporelles ne laissent apparaître que certains phénomènes qui peuvent impacter (in)directement les autres échelles. De la même manière, les politiques territoriales interagissent à différents niveaux (politique locale, communales, régionale...), ce qui nécessite une cogestion adaptée des territoires.

- Les approches multi-échelles

Les approches multi-échelles ont pour objectifs d'agrèger ou de désagréger des processus et des variables d'état d'un système d'une échelle à une autre. A titre d'exemple, comment l'exploitation locale d'une forêt impacte l'exploitation forestière du massif correspondant (et vice versa). Il est nécessaire d'avoir des approches multi-échelles afin d'évaluer les impacts d'un processus d'une échelle donnée sur un processus d'une autre échelle. Ces approches reposent principalement sur des méthodes de champ moyen qui intègre un comportement sur un domaine représentatif. A notre connaissance, peu d'approches ont été développées dans le cadre de système bioéconomique pour passer d'une échelle territoriale à une autre.

- Les approches multi-niveaux (liées à la gouvernance)

Les approches multi-niveaux concernent essentiellement les aspects liés à la gouvernance. Ce front de science inclut également la notion de gouvernance polycentrique. En effet, différents niveaux politico-administratifs composent les gestions bioéconomiques territoriale : implantation de filière, aménagement, décentralisation, loi NOTRe¹⁰². Les acteurs impliqués appartiennent à des niveaux de gouvernances potentiellement indépendants qui nécessitent une gestion adaptative. L'objectif est de développer des approches théoriques (SHS mais aussi de modélisation) afin de questionner et d'analyser les relations institutionnelles multi-niveaux de la gouvernance de la bioéconomie territoriale.

4.3. Développer des programmes de R&I internationaux en lien avec les ODD*

Mener des recherches sur la bioéconomie contribuera aussi à atteindre certains des Objectifs de Développement Durable (ODD) de la figure 7. On peut citer l'ODD 2 (Lutte contre la faim), l'ODD 6 (Accès à l'eau salubre et à l'assainissement), l'ODD 7 (recours aux énergies renouvelables), l'ODD 8 (accès à des emplois décents), l'ODD 9 (Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation), l'ODD 11 (villes et communautés durables), l'ODD 12 (consommation et production responsables), l'ODD 13 (lutte contre le changement climatique), l'ODD 14 (vie aquatique), l'ODD 15 (vie terrestre) et l' ODD 17 (Partenariats pour la réalisation des objectifs) – et leurs interfaces.

¹⁰² <https://www.vie-publique.fr/loi/20721-loi-notre-loi-du-7-aout-2015-nouvelle-organisation-territoriale-de-la>

*ce rapport a été écrit avant que les objectifs du Green Deal ne soient connus



Figure 7 : les Objectifs de Développement Durable

Pour progresser vers une bioéconomie durable, il est essentiel de bien mesurer les enjeux de viabilité de la planète, de clarifier les objectifs pour y parvenir, en s'appuyant par exemple sur les ODD, de les décliner aux échelles pertinentes, de définir des sous-systèmes bioéconomiques répondant à ces cibles réalistes et réalisables au travers de programmes de recherche ayant des impacts mesurables.

Le schéma de la figure 8, issu de la figure 2, permet de visualiser l'ensemble des composantes du système, les interactions entre elles et permet de répertorier les acteurs et leur rôle. Il a été utilisé pour définir treize objectifs, F1 à F13, qui correspondent à des défis sociétaux en lien avec certains ODD listés ci-dessus ou en lien avec une combinaison d'ODD. Ces objectifs sont volontairement situés aux interfaces entre les composantes du système.

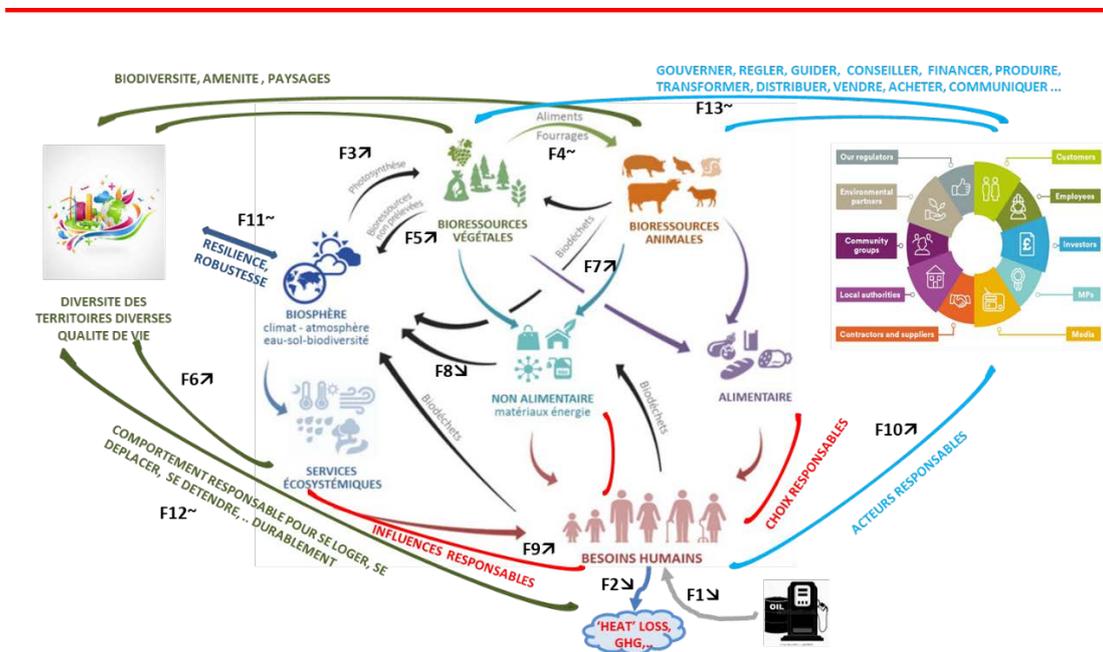


Figure 8 : Identification des objectifs

Fonction	Objectifs:	Cible à atteindre en 2030 (ex)	Programme de recherche interdisciplinaire	ODD adressés
F1	Réduire l'utilisation des produits d'origine fossile	X% de matériaux issus de la biomasse	Des plantes pour de nouveaux usages	7, 12, 13
F2	Réduire les émissions de GES...	Accroître de x% le stockage du Carbone ...	Dynamique des flux de biomasse	13, 12, 7, 11
F3	Maximiser la photosynthèse	x% d'augmentation des rendements de la photosynthèse des plantes et des algues	Photosynthèse inclusive	7, 12, 13, 15
F4	Équilibre aliments d'origine animale versus végétale	X % de produits végétaux dans les régimes alimentaires	Impacts environnementaux de l'alimentation	12, 14, 2
F5	Accroître la biodiversité des espèces cultivées	X% d'augmentation de la biodiversité des espèces cultivées	Les pratiques agroécologiques pour la bioéconomie	14, 15, 2
F6	Accroître la qualité de vie dans les territoires	x% des citoyens qui ont une appréciation positive de leur environnement et x% d'augmentation des produits éco-conçus	Les initiatives citoyennes dans les territoires	1, 2, , 6, , 8, 11, 12, 17
F7	Accroître l'efficacité d'utilisation de la biomasse –couplage alimentation – non alimentaire	Réduction de x% des coproduits non utilisés	Interopérabilité des chaînes de valeurs	1, 12, 17
F8	Réduire les déchets	X% de déchets en moins	Approche coûts- bénéfiques de la réduction des déchets	12, 7, 11
F9	Accroître les services de la bioéconomie et de la dématérialisation	La valeur ajoutée des services apportés par la bioéconomie et la dématérialisation augmente de x %	Les services de la bioéconomie	1, 8, 11, 12, 13
F10	Accroître les comportements humains responsables (choix, rôles, actions, influences)	X% des choix seront éco-responsables	Recherche-action pour le développement de politiques publiques avec les citoyens et les acteurs locaux	12, 11, 17,
F11	Accroître la résilience des systèmes bioéconomique sous condition de changement climatique extrêmes	X unités expérimentales dédiées à l'étude de la résilience des systèmes bioéconomiques de production de biomasse	Déploiements de stations expérimentales et de simulations de conditions extrêmes sur la production de biomasse.	1, 2, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 17
F12	Rechercher des solutions pour tendre vers des systèmes bioéconomiques équilibrés aux différentes échelles	X cas en France proposant des solutions équilibrées	Développement d'observatoires et de bases de données en relation avec les réseaux européens en développement	idem
F13	Créer les conditions pour une auto-organisation des systèmes bioéconomiques	Création d'un institut des systèmes complexes bioéconomiques pour tester physiquement et virtuellement les meilleures approches	Nouveau programme inter-disciplinaire d'étude des systèmes complexes pour la bioéconomie	idem

Tableau 1 : programmes internationaux potentiels

Pour chaque objectif, une cible chiffrée devra être identifiée (pour le moment indiquée par x) afin d'établir le niveau d'ambition requis. Ces objectifs seront ensuite traduits en programmes. A titre d'exemple le tableau 1 donne des objectifs et des programmes interdisciplinaires qui pourraient en découler. Ce tableau de programmes a été conçu pour fournir une première base de réflexion pour développer des approches interdisciplinaires notamment avec des partenaires internationaux.

4.4. Concevoir des programmes interdisciplinaires

Comprendre la dynamique d'évolution de ces systèmes pour tendre vers des solutions d'équilibre qui permettent le développement d'une bioéconomie durable requiert la mise en place d'équipes multidisciplinaires qui définissent conjointement les cibles à atteindre et les programmes pour y parvenir. La difficulté vient de l'étendue des disciplines à couvrir mais aussi de la nécessité de développer une approche intégrée en s'appropriant les questions propres à chaque discipline, exercice auxquels sont peu rompus les chercheurs. Si la plupart des disciplines majeures (agronomie, biologie au sens large, génies des procédés, économie...) seront présentes dans INRAE d'autres comme la chimie, la physique, la logistique ou les sciences cognitives seront à aller chercher aux travers de collaborations.

- La première action à mener consistera à reprendre le schéma de la figure 8 à l'enrichir avec d'autres objectifs et à préciser les cibles à partir des connaissances propres aux membres de l'équipe et d'une fouille de la littérature pour qu'elles soient ambitieuses mais réalistes.
- La deuxième action sera de traduire ces objectifs et ces cibles en programmes de recherche et d'innovation transdisciplinaires en grandes lignes qui permettent de poser un ensemble cohérent de questions et d'activités de recherche.
- La troisième action consistera à prioriser ces programmes en fonction de l'importance sociétale et des pistes de recherche réalistes et réalisables. Pour cela une méthodologie devra être mise au point et élaboré dans une Ecole Chercheur à caractère trans-disciplinaire.
- La quatrième action sera de partager cette méthodologie avec des acteurs économiques ciblées et des acteurs de la société civile pour traduire le programme scientifique dans un programme de recherche et d'innovation. Pour cela une série des workshops seront organisés pour arriver aux programmes co-construits.

Ces réflexions pourront conduire sur la nécessité de développer des scénarios prospectifs et de les utiliser pour prioriser des programmes de recherche.

Glossaire

Terme	Définition et source
4/1000	Initiative internationale lancée par la France, qui vise à montrer que les sols agricoles peuvent jouer un rôle crucial pour la sécurité alimentaire et le changement climatique; le 4/° symbolise le taux de croissance annuel des stocks de carbone qu'il faudrait atteindre pour limiter significativement l'accumulation de CO2 atmosphérique. https://www.4p1000.org/fr
Agriculture de conservation	Pratique reposant sur trois grands principes : couverture maximale des sols, absence de labour, rotations longues et diversifiées. Ces trois principes doivent être appliqués simultanément. Les régulations écologiques obtenues permettent de diminuer l'artificialisation du milieu (intrants, travail du sol). Suppose des changements profonds dans la conduite des systèmes de culture par rapport à l'agriculture conventionnelle. https://www.inrae.fr/actualites/agriculture-conservation
Agriculture de précision	Ensemble de techniques et de pratiques limitant l'utilisation d'intrants dans les parcelles agricoles pour améliorer le bilan économique, agronomique et environnemental des exploitations agricoles. L'AP fait appel à l'utilisation de nouvelles technologies, telles que l'imagerie satellitaire et l'informatique. Elle s'appuie sur des moyens de localisation dans la parcelle dont le système de positionnement par satellites de type GPS. L'agriculture de précision permet de mieux comprendre et analyser les besoins physiologiques des cultures et de développer des outils d'aide à la décision pour l'utilisateur. https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-de-precision/
Agroécologie	Discipline scientifique qui applique les concepts et les principes écologiques à la gestion des interactions entre les plantes, les animaux, les humains et l'environnement pour renforcer la sécurité alimentaire et améliorer la nutrition. Peut être définie comme un ensemble disciplinaire alimenté par le croisement des sciences agronomiques (agronomie, zootechnie), de l'écologie appliquée aux agroécosystèmes et des sciences humaines et sociales (sociologie, économie, géographie). Elle s'adresse à différents niveaux d'organisation, de la parcelle à l'ensemble du système alimentaire. Dans une vision large, l'agroécologie peut-être définie comme l'étude intégrative de l'écologie de l'ensemble du système alimentaire, intégrant les dimensions écologiques, économiques et sociales (Francis et al., 2003). http://www.fao.org/agroecology/knowledge/practices/fr/ https://mots-agronomie.inra.fr/mots-agronomie.fr/index.php/Agro%C3%A9cologie Francis C., Lieblein G., Gliessman S., Breland T. A., Creamer N., Harwood, Salomonsson L., Helenius J., Rickerl D., Salvador R., Wiedenhoef M., Simmons S., Allen P., Altieri M., Flora C. Poincelot R., 2003. Agroecology: The Ecology of Food Systems, Journal of Sustainable Agriculture, 22 (3) : 99-118.

Agroforesterie Terme générique servant à désigner les systèmes d'utilisation des terres et les pratiques dans lesquelles les plantes ligneuses vivaces sont délibérément intégrées aux cultures agricoles et / ou à l'élevage pour une variété de bénéfices et de services.
<http://www.fao.org/3/i1861f/i1861f08.pdf>

Analyse du cycle de vie L'analyse du cycle de vie (ACV) recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux.
<https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>

Analyse multicritère Analyse qui vise à expliciter une famille cohérente de critères pour permettre de concevoir, justifier et transformer les préférences au sein d'un système de décision
Nadia Lehoux et Pascale Vallée - Ecole Polytechnique de Montréal

Approche en cascade Mise en œuvre d'une stratégie de transformation des ressources par séquences en utilisant des matières premières, leurs résidus et des matériaux recyclés afin d'étendre la disponibilité totale de la biomasse dans un système donné.
https://ec.europa.eu/knowledge4policy/glossary/cascading-use_en; Olsson et al 2016. Cascading of Woody Biomass: definitions, policies and effects on international trade. IEA Bioenergy Task 40. April 2016.

Biocarburants - biocombustibles Les biocarburants et biocombustibles couvrent l'ensemble des carburants et combustibles liquides, solides ou gazeux produits à partir de la biomasse et destinés à une valorisation énergétique dans les transports et le chauffage.
<https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/quel-avenir-les-biocarburants;> <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants>

Biodéchets Les biodéchets regroupent les déchets issus de ressources naturelles animales ou végétales
<https://nouvelle-aquitaine.ademe.fr/offre-ademe/economie-circulaire/biodechets>

Bioéconomie bleue Volet de la bioéconomie qui compte l'ensemble des activités liées à la production, à la mobilisation, à l'utilisation et à la transformation de bioressources renouvelables issues du milieu aquatique, marin ou d'eau douce.
<https://agriculture.gouv.fr/le-developpement-de-la-bioeconomie-bleue-0>

Biogaz Gaz obtenu par la méthanisation, qui est processus de dégradation biologique de la matière organique dans un milieu sans oxygène due à l'action de multiples micro-organismes (bactéries). Elle peut avoir lieu naturellement dans certains milieux tels que les marais ou peut être mise en œuvre volontairement dans des unités dédiées grâce à un équipement industrie appelé « méthaniseur ».
<https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biogaz>

Biomimétisme Processus créatif interdisciplinaire entre biologie et technologie dans le but de trouver de nouvelles solutions durables inspirées par la nature. Il repose sur la production de connaissance sur des modèles biologiques du vivant au sens large. Les applications concernent tous les secteurs de l'activité humaine, sociale et technologique.

Bioprocédés Procédés relatifs à toutes les mises en œuvre de systèmes vivants, ou de leurs constituants, pour la production de savoir, biens ou services.
<https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/le-biomimetisme-un-outil-dinnovation-durable-44693/>; <https://lejournal.cnrs.fr/articles/regard-anthropologique-sur-le-biomimetisme>

Bioraffinerie Installation industrielle où la biomasse (ressources agricoles, forestières.....) est transformée en différents produits intermédiaires (sirops de glucose) ou finalisés (ex. éthanol-carburant).

Bioraffinerie environnementale Installation industrielle où les biodéchets sont transformés en différents produits, tels que le biogaz.
<https://theconversation.com/la-bioraffinerie-environnementale-quest-ce-que-cest-51842>

Bioressources Généralement une matière qui résulte (directement ou indirectement) de la photosynthèse, mais aussi d'autres matières biologiques présentes dans la biosphère.

Biosourcés (produits) Produits industriels, à usage non alimentaire et non énergétique, partiellement ou totalement issus de la biomasse : matériaux (plastiques et composites); molécules chimiques (tensioactifs, solvants, lubrifiants...). Ces produits peuvent être obtenus à partir de diverses sources de biomasse : oléoprotéagineux (colza...), plantes amidonnières (maïs, blé...) et sucrières (betterave...), plantes à fibres (lin, chanvre), micro-algues et macro-algues, ressources sylvicoles, plantes herbacées, écoproduits ou sous-produits industriels organiques...
<https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/produits-biosources/quoi-parler-filiere-produits-biosources>

Biotechnologie Application de la science et de la technologie à des organismes vivants, de même qu'à ses composantes, produits et modélisations, pour modifier des matériaux vivants ou non-vivants aux fins de la production de connaissances, de biens et de services
<http://www.oecd.org/fr/sti/tech-emergentes/definitionstatistiqueedelabiotechnologiemiseajouren2005.htm>

Carbone renouvelable Carbone issu de ressources de nature biologiques se renouvelant rapidement et dont la consommation n'augmente pas la quantité nette de CO2 présent dans l'atmosphère

Chimie verte Une pratique de la chimie qui met en œuvre des principes visant la réduction de l'empreinte écologique et la dangerosité des procédés chimiques.
<http://www.unesco.org/new/fr/natural-sciences/science-technology/basic-sciences/chemistry/green-chemistry-for-life/twelve-principles-of-green-chemistry/>

Co-produits Un coproduit est une matière, intentionnelle et inévitable, créée au cours du même processus de fabrication et en même temps que le produit principal. Le produit fini principal et le coproduit doivent tous les deux répondre à des spécifications de caractéristiques, et chacun est apte à être utilisé directement pour un usage particulier. Les coproduits sont aussi caractérisés par leur valorisation économique.
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Coproduit>

Cycles biogéochimiques Un cycle biogéochimique correspond à un ensemble de processus grâce auxquels un élément passe d'un milieu naturel à un autre, puis retourne dans son milieu original, en suivant une boucle de recyclage infinie.
<http://www.alloprof.qc.ca/BV/pages/s1334.aspx>

Déchets ultimes Déchet résultant ou non d'un traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans des conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.
<https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/reduire-impacts/reduire-cout-dechets/quest-quun-dechet>

Déchets Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon.
<https://www.ademe.fr/glossaire/d>

Digestats Résidus ou déchets « digérés », issus de la méthanisation des déchets organiques. Le digestat est constitué de bactéries excédentaires, matières organiques non dégradées et matières minéralisées. Après traitement, il peut être utilisé comme compost.
<https://www.ademe.fr/glossaire/d>

Downsizing Ensemble de stratégies visant l'intensification d'un procédé et conduisant à des réductions d'échelles ou la miniaturisation

Ecoconception Démarche scientifique technique et économique qui vise à intégrer les aspects environnementaux dans la conception et le développement de produits.
 ISO/TR 14062; <https://www.ademe.fr/entreprises-monde-agricole/organiser-demarche-environnementale/dossier/ecoconcevoir-produits/enjeux-lecoconception-benefices-lentreprise-leconomie-lenvironnement>

Ecologie Industrielle et Territoriale L'écologie industrielle est une notion et une pratique récente du management environnemental visant à limiter les impacts de l'industrie sur l'environnement.
<https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/lecologie-industrielle-et-territoriale>

Economie circulaire L'économie circulaire désigne un modèle économique dont l'objectif est de produire des biens et des services de manière durable, en limitant la consommation et les gaspillages de ressources (matières premières, eau, énergie) ainsi que la production des déchets. Il s'agit de rompre avec le modèle de l'économie linéaire (extraire, fabriquer, consommer, jeter) pour un modèle économique « circulaire ».
<https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/leconomie-circulaire>

Ecosystèmes anthropisés Ecosystème dont les caractéristiques écologiques et environnementales ont été modifiées par l'activité humaine (industrie; agriculture; urbanisme; ..)
<http://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/anthropisation>



INRAE
147 rue de l'Université
75338 Paris cedex7
Tél. : 01 42 75 90 00

Rejoignez-nous sur :



inrae.fr

**Institut national de recherche pour
l'agriculture, l'alimentation et l'environnement**



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE