

Perspectives du génie des procédés pour la valorisation alimentaire et non alimentaire des agro-ressources

Catherine Bonazzi

▶ **To cite this version:**

Catherine Bonazzi. Perspectives du génie des procédés pour la valorisation alimentaire et non alimentaire des agro-ressources. SFGP 2022 - 18e congrès de la Société Française de Génie des Procédés, SFGP, Nov 2022, Toulouse, France. hal-03884113

HAL Id: hal-03884113
https://hal.inrae.fr/hal-03884113

Submitted on 5 Dec 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Perspectives du génie des procédés pour la valorisation alimentaire et non alimentaire des agro-ressources

Catherine BONAZZI

Directrice de recherche INRAE

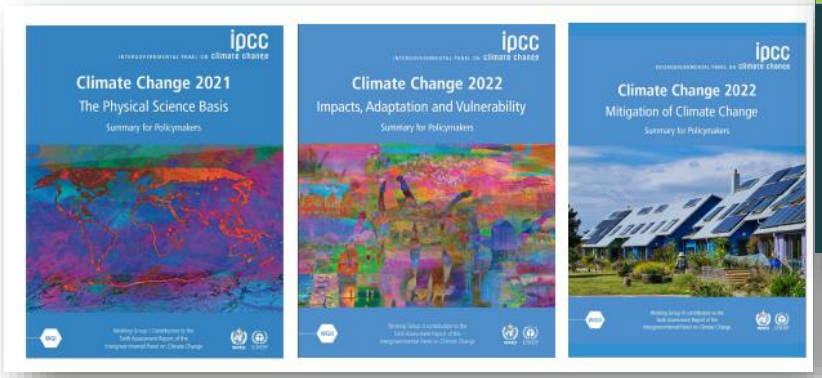
Paris-Saclay Food and Bioproduct Engineering

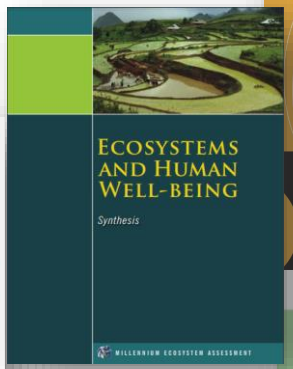
SayFood
Food & Bioproduct Engineering

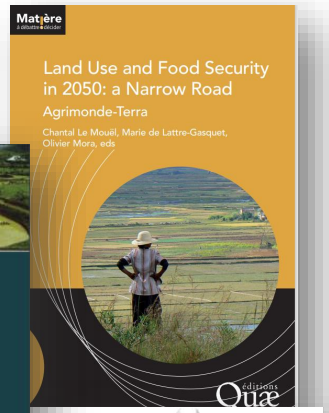
INRAE AgroParisTech université PARIS-SACLAY

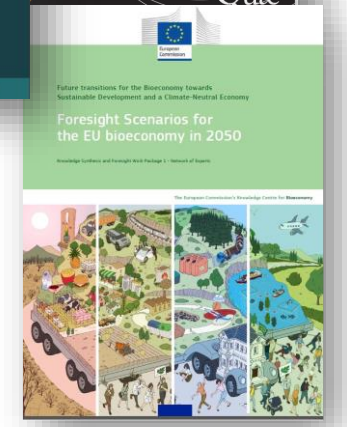
Contexte et challenges sociétaux

- Défis mondiaux
  - Dérèglement climatique
  - Population et urbanisation croissante
  - Raréfaction rapide des ressources naturelles
  - Dégradation des écosystèmes
  - Perte majeure de biodiversité
- Tensions sur
  - L'alimentation et la sécurité alimentaire
  - La demande en énergie
  - La génération de déchets
  - L'usage des sols (stockage du C, production d'aliments et de biomasse, pollution, CC infrastructures…)
- Besoin de trouver de nouveaux moyens de produire et de consommer qui respectent les limites de la planète
  - Atténuer les effets du changement climatique
  - Tout en assurant la sécurité alimentaire, énergétique et les bien-être des populations





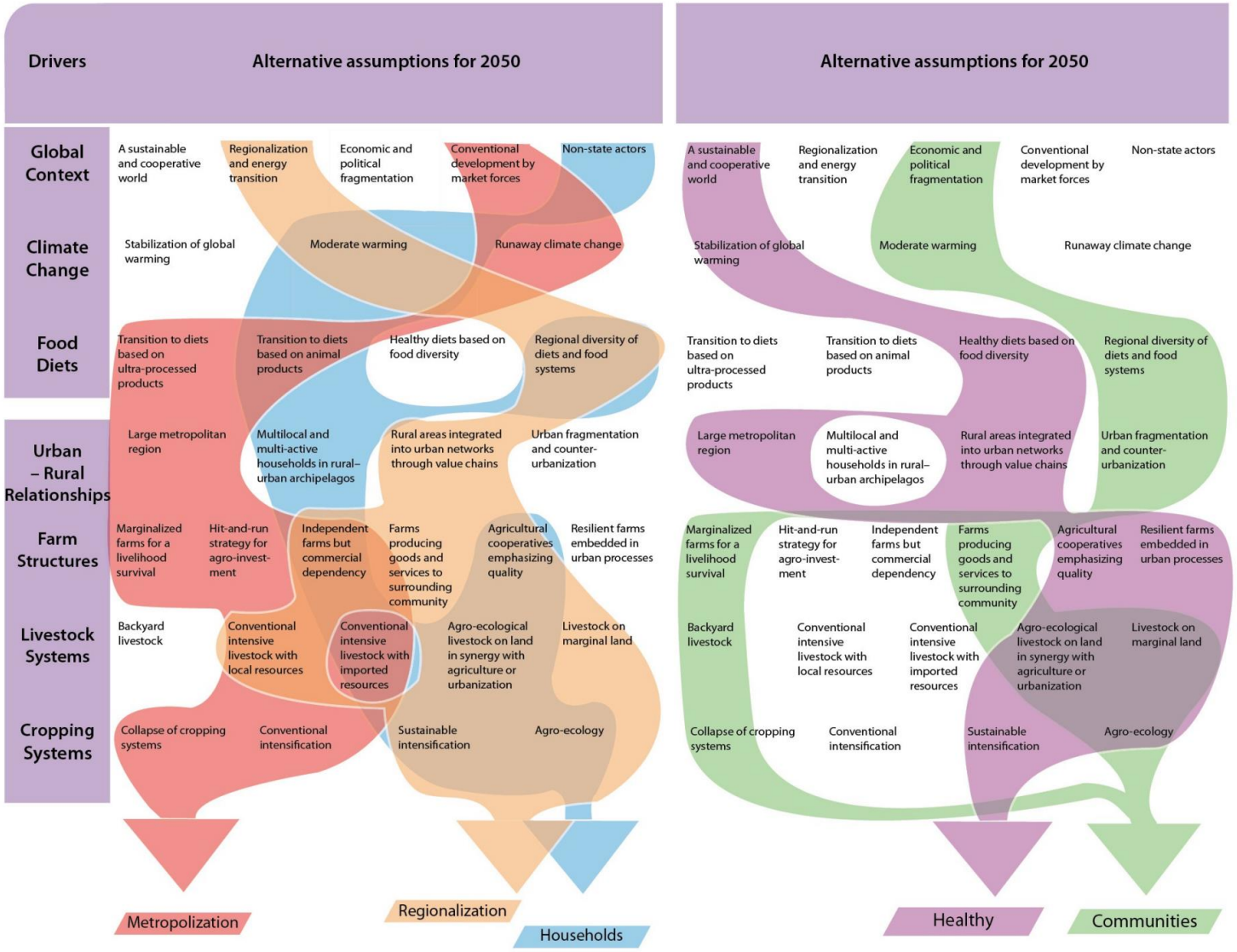


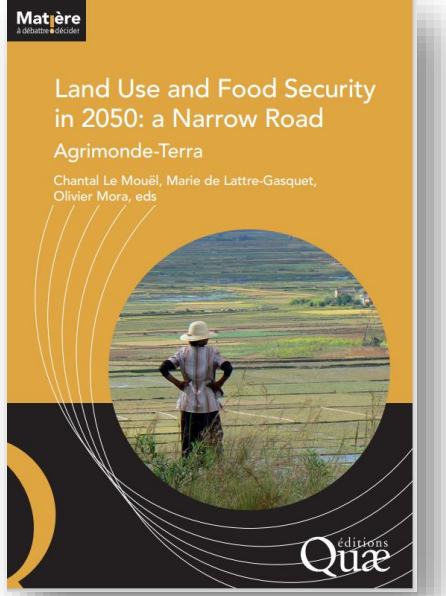


25-30% GES < systèmes alimentaires



Agrimonde -Terra (INRAE & CIRAD)





Etude prospective sur l'usage des terres et la sécurité alimentaire dans le monde à l'horizon 2050

Résultats sur 14 régions du monde / 5 scénarios

Objectif : éclairer les débats et la décision publique

https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/agrimonde-terra-resume-8-p-en-francais-1.pdf

Mora O, Le Mouël C, de Lattre-Gasquet M, Donnars C, Dumas P, Réchauchère O, *et al*. 2020, PLoS ONE 15(7): e0235597

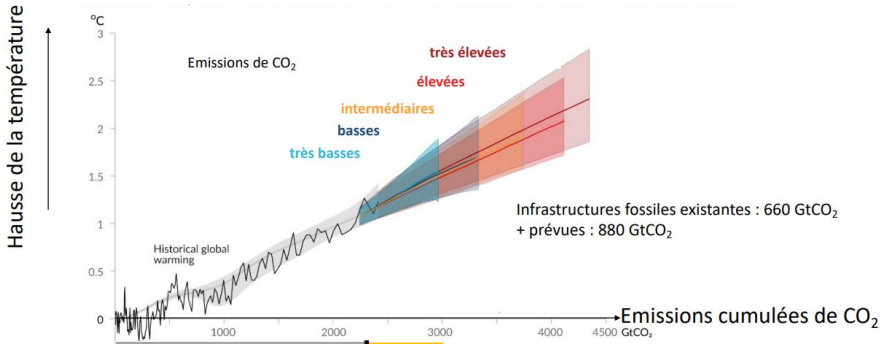
(d'après Sophie Szopa, Lab Sci Climat Env, rédactrice rapport GIEC)

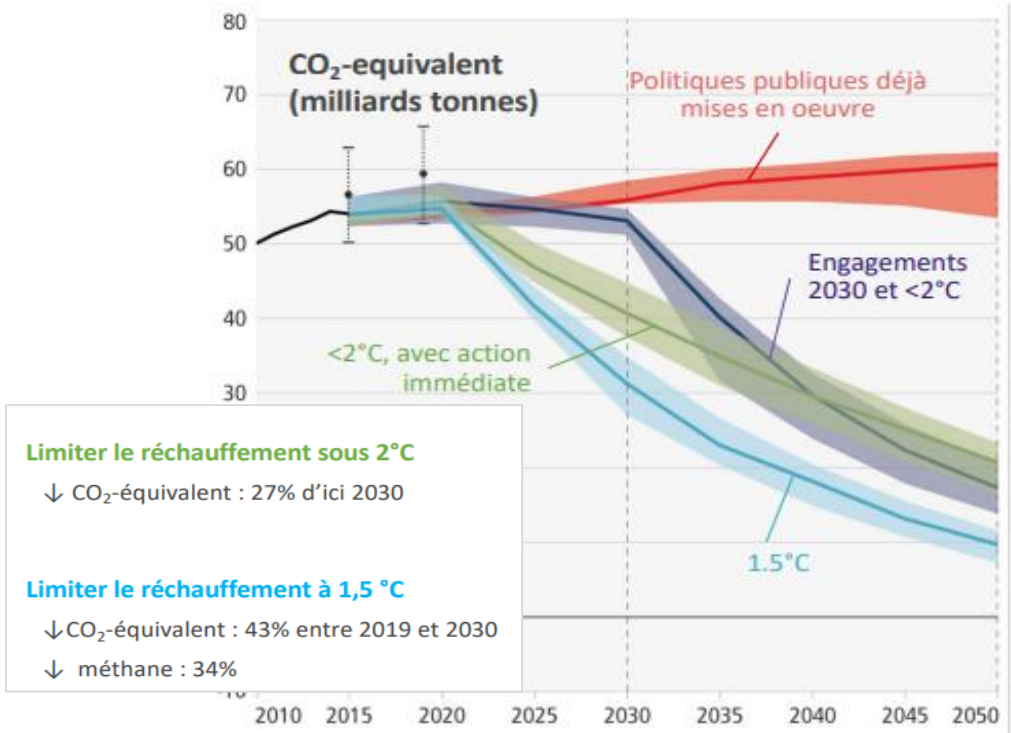
Rapports du GIEC 2021-2022

- Constats
  - Réchauffement planétaire (+1,1 °C), changements rapides, généralisés, inédits qui s'intensifient
  - Hausse des émissions de GES liées aux activités humaines : consommation d'énergie, modes de vie, production d'aliments et utilisation des terres
  - Trajectoires d'émissions croissantes, impacts et risques qui s'intensifient pour chaque incrément supplémentaire de réchauffement
  - Les écarts se creusent entre les mesures d'adaptation nécessaires et celles qui sont réellement mises en œuvre

- Nécessité d'agir maintenant pour rester sur une trajectoire soutenable (< 2 °C)
  - Options disponibles pour diviser par 2 les émissions d'ici 2030
  - Décisions à prendre à tous les niveaux des organisations sociales
  - Changements transformateurs systémiques (technologiques, sociaux, styles de vie) qui bouleversent les tendances actuelles du développement
  - Choix qui doivent être réfléchis (transitions justes) et orientés par la science (éléments probants)

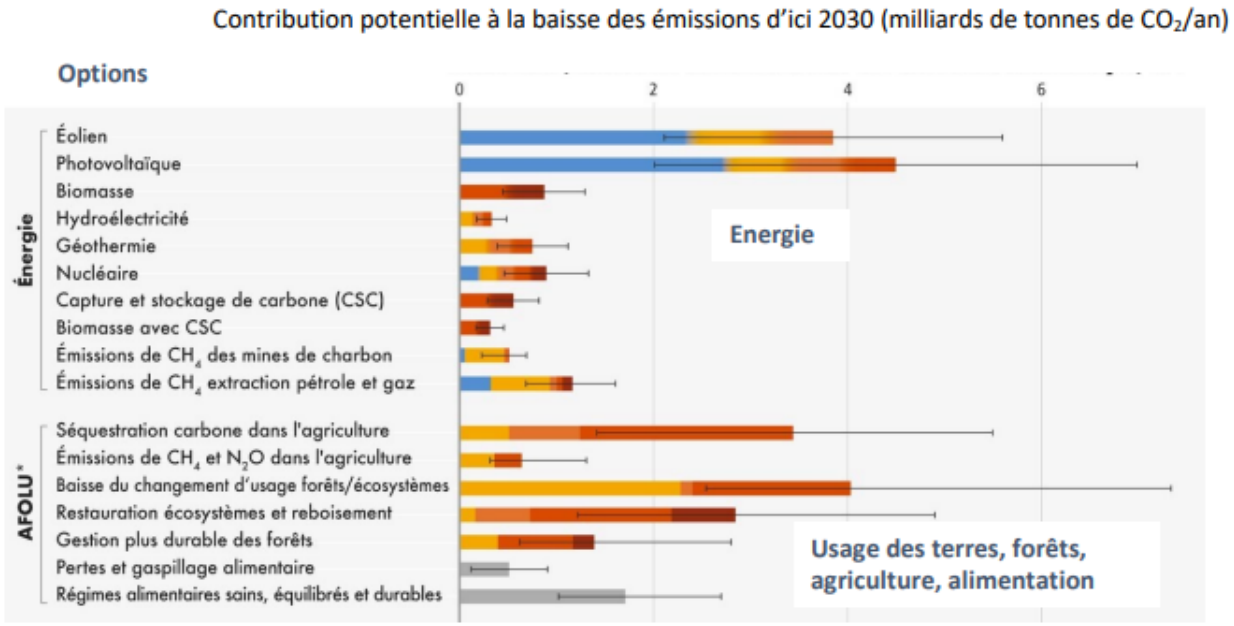
Chaque t de CO2 contribue au réchauffement planétaire

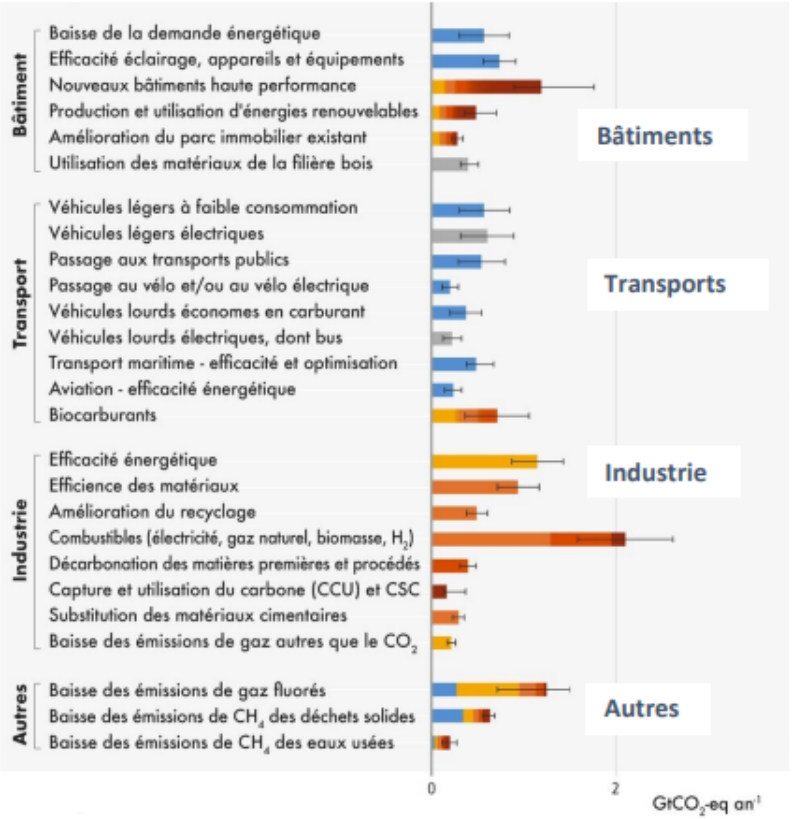


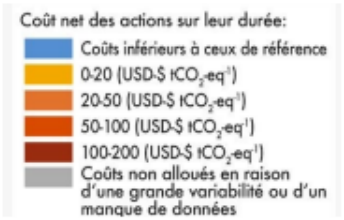


GIEC, AR6 WGIII SPM

Pour diviser par 2 les émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2030, des leviers d'action sont disponibles dans chaque secteur







- Enclencher les transformations
- Co-bénéfices (qualité de l'air, santé, qualité de vie) : stratégies de soutenabilité
- Enjeux économiques à agir rapidement (coûts de l'inaction)
- Besoins d'investissements

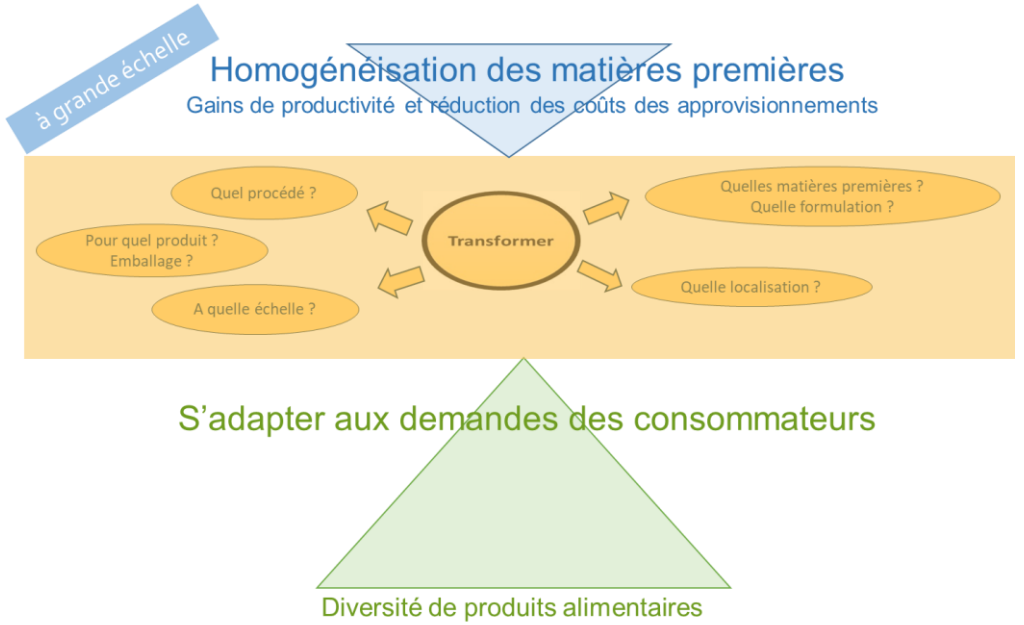
GIEC WG3

(D'apès S Szopa)

Evolution de la pression sur les agro-ressources

- Diversification des systèmes agricoles
  - Agriculture intensive industrielle, conventionnelle, raisonnée, biologique…
  - Développement de l'agroécologie
  - Transitions des systèmes d'élevage
  - Développement de cultures intermédiaires à vocation énergétique
  - Développement de nouvelles ressources (algues, insectes…)
- Évolution des régimes alimentaires
  - Disponibilité calorique et sécurité alimentaire
  - Transition nutritionnelle : changement de composition des régimes
  - Alimentation et santé : persistance de la sous-nutrition, augmentation très rapide de l'obésité, surpoids et maladies chroniques liées à l'alimentation.

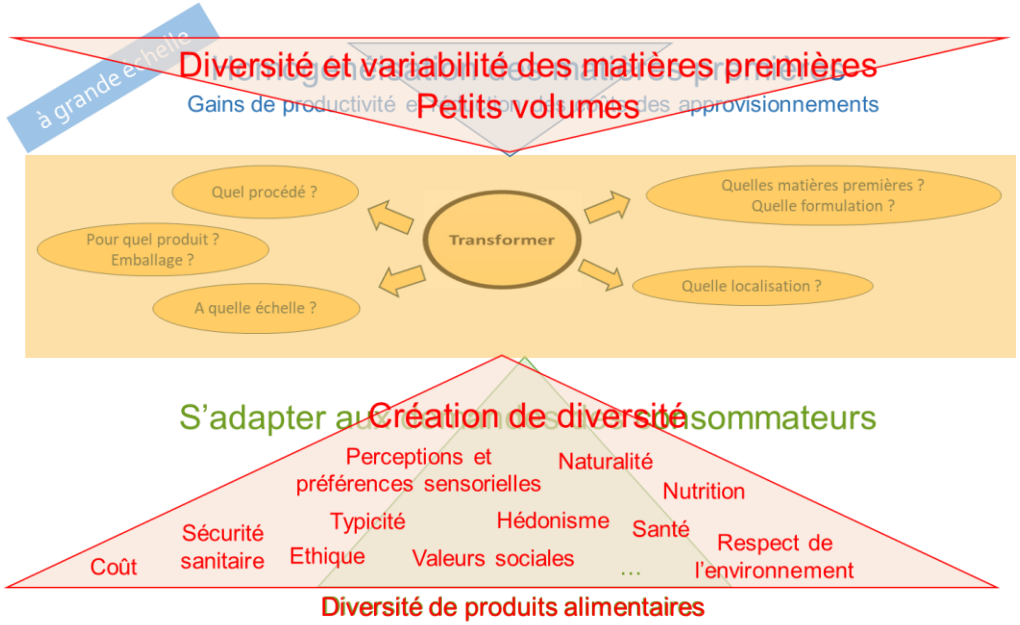
- Changements de paradigmes pour la transformation alimentaire
  - Développement de nouveaux itinéraires de transformation qui s'appuyent sur les spécificités des territoires
  - Augmentation de la variabilité des MP
  - Nécessité de revoir et optimiser les échelles pour la transformation alimentaire



Evolution de la pression sur les agro-ressources

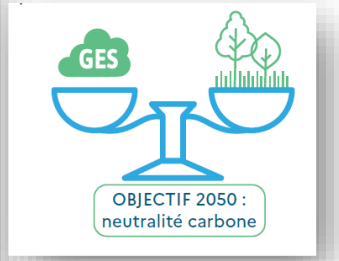
- Diversification des systèmes agricoles
  - Agriculture intensive industrielle, conventionnelle, raisonnée, biologique…
  - Développement de l'agroécologie
  - Transitions des systèmes d'élevage
  - Développement de cultures intermédiaires à vocation énergétique
  - Développement de nouvelles ressources (algues, insectes…)
- Évolution des régimes alimentaires
  - Disponibilité calorique et sécurité alimentaire
  - Transition nutritionnelle : changement de composition des régimes
  - Alimentation et santé : persistance de la sous-nutrition, augmentation très rapide de l'obésité, surpoids et maladies chroniques liées à l'alimentation.

- Changements de paradigmes pour la transformation alimentaire
  - Développement de nouveaux itinéraires de transformation qui s'appuyent sur les spécificités des territoires
  - Augmentation de la variabilité des MP
  - Nécessité de revoir et optimiser les échelles pour la transformation alimentaire



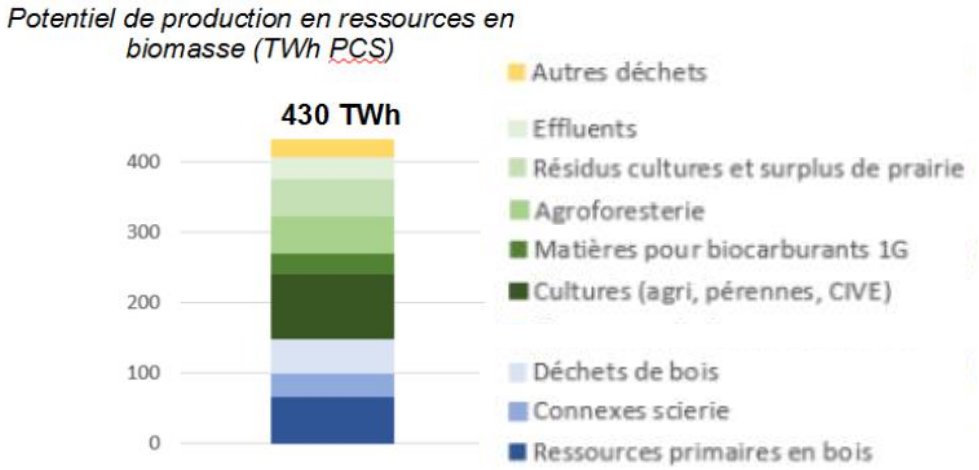
Stratégie Nationale Bas Carbone





SNBC : objectif 1
Décarboner la production d'énergie

Pour y parvenir, il faut se reposer uniquement sur les sources d'énergie suivantes : les ressources en biomasse (déchets de l'agriculture et des produits bois, bois énergie…), la chaleur issue de l'environnement (géothermie, pompes à chaleur…) et l'électricité décarbonée.



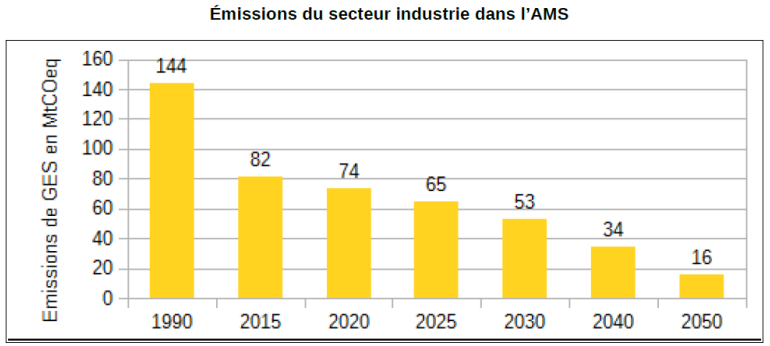
Horizon 2050

Transports : zéro émission (à l'exception du transport aérien domestique)
Bâtiment : zéro émission
Agriculture : réduction de 46 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2015
Industrie : réduction de 81 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2015
Production d'énergie : zéro émission
Déchets : réduction de 66 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2015

Industrie

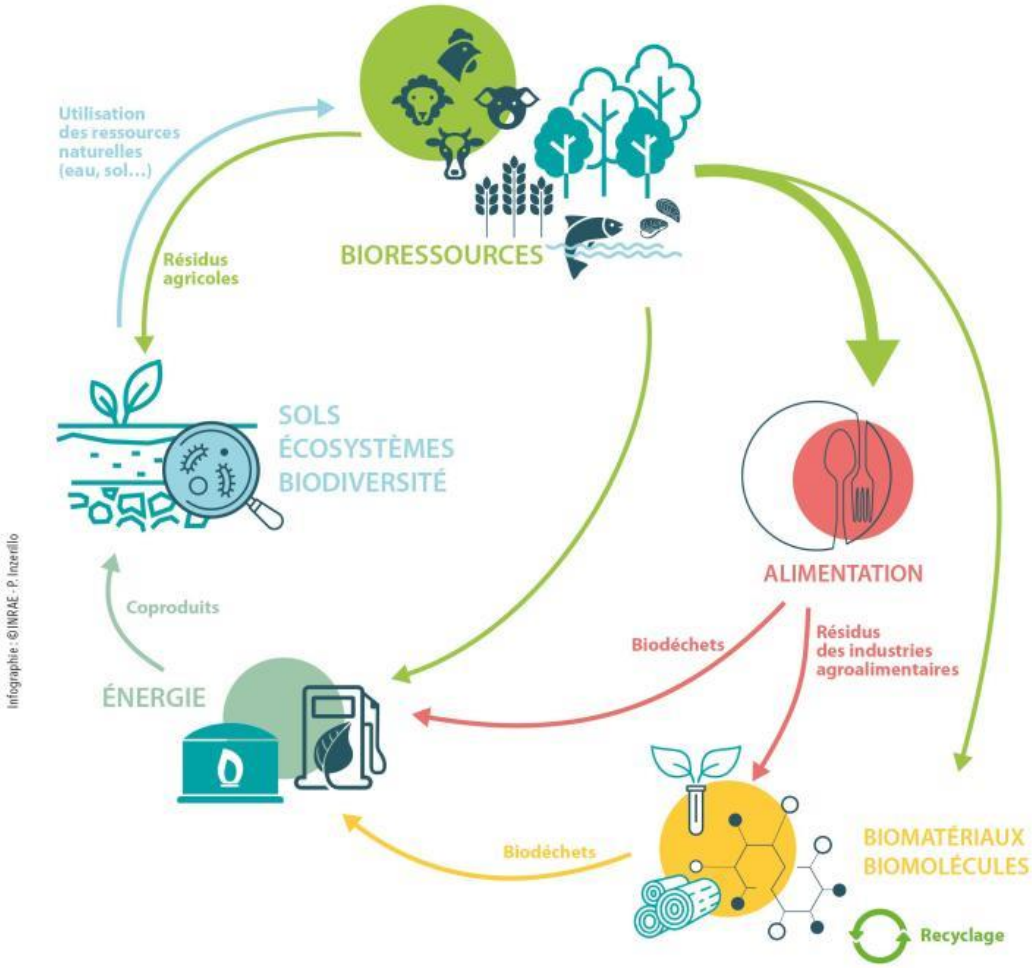
Orientation 1 : Accompagner les entreprises dans leur transition vers des **systèmes de production bas-carbone** et le développement **de nouvelles filières**
Orientation 2 : Engager dès aujourd'hui le développement et l'adoption de **technologies de rupture pour réduire et si possible supprimer les émissions résiduelles**
Orientation 3 : Donner un cadre incitant à la maîtrise de la demande en énergie et en matières, en **privilégiant les énergies décarbonées et l'économie circulaire**

- *Efficacité énergétique (gains 40%) et électrification (70% en 2050) des procédés*
- *↗économie circulaire, écoconception, incorporation de matières recyclées (80% en 2050), valorisation totale des déchets*
- *↘émissions non-énergétiques*



Développer la bioéconomie

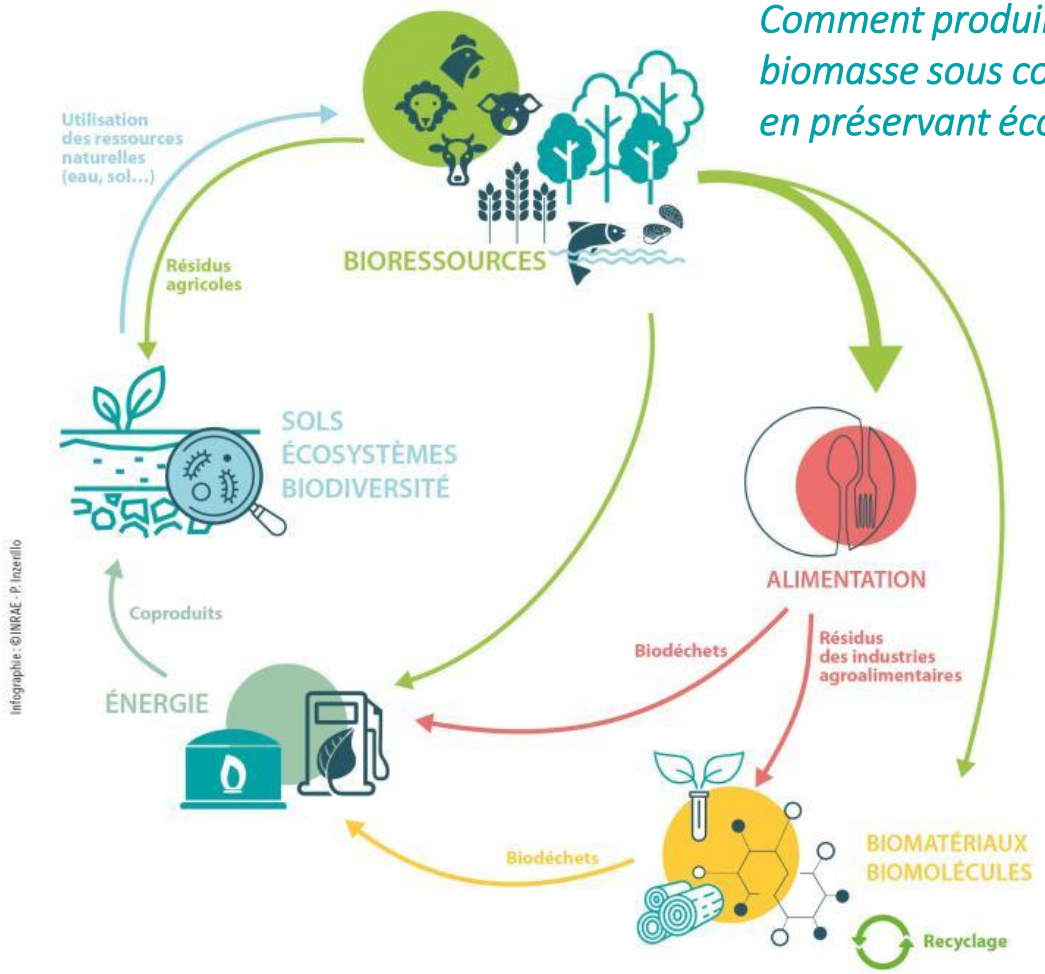
- Remplacer les matériaux et l'énergie d'origine pétro-sourcée par leurs équivalents issus de la biomasse renouvelable
  - Cultures dédiées (chanvre, sorgho, cultures intermédiaires à vocation énergétique)
  - Bois et résidus de la sylviculture
  - Algues, insectes
  - Biodéchets (déchets agricoles, déchets des IAA, déchets urbains, eaux usées)
- Produire et mobilisation une part accrue de biomasse, transformer, recycler
  - En veillant à l'usage concurrentiel des terres pour couvrir les besoins alimentaires
  - Sans porter atteinte à la biodiversité des écosystèmes, ni à la préservation des ressources (sol, eau)
  - En tenant compte des besoins en forêts/sols pour la séquestration du C
  - En s'inscrivant dans la transition agroécologique
- Développer des filières à l'échelle de territoires permettant de limiter les coûts de transports
  - Transformation de tous les produits et coproduits : aliments & molécules d'intérêt, biocarburants, matériaux
  - Favoriser les usages en cascades



Développer la bioéconomie

Comment anticiper, organiser et gérer les flux, les échanges et les marchés dans un contexte d'incertitude ?

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



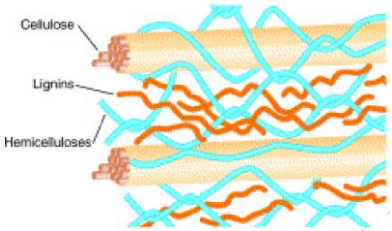
Comment optimiser la transformation des biomasses dans toute leur diversité ?

Comment assurer le recyclage des matériaux afin de boucler les cycles biologiques du carbone, de l'azote et du phosphore ?

2 voies de transformations distinctes : besoins sociétaux, maturité, valorisation économique, usage concurrentiel des ressources, objectifs technologiques (construction, déconstruction)

Bioraffinerie

- Mobiliser une part accrue de la biomasse
  - Etudier les **flux** et les **stocks** de carbone dans les différents écosystèmes pour diversifier les sources et innover en préservant les ressources, dans un contexte d'incertitude et sous contrainte climatique
  - Analyser les **métabolismes** (flux de matières, acteurs, filières, impacts environnementaux et socioéconomiques)
  - Caractériser une matière première spécifique très complexes : couplage **eau + énergie + matière complexe à valoriser** (lignocellulose, sucres, protéines, acide gras, enzymes...), pour optimiser ses transformations et sa biodégradabilité

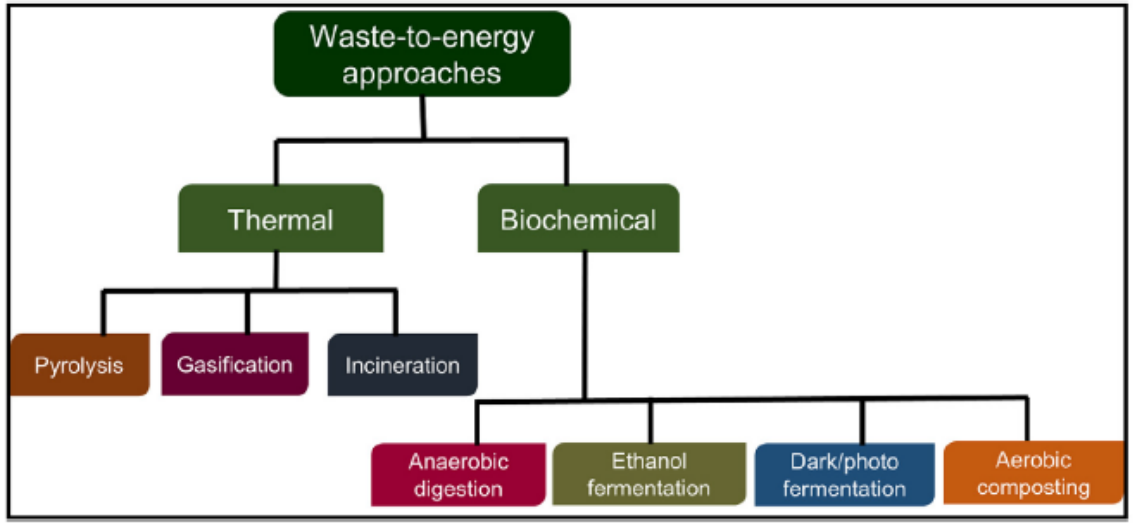


- Construire les innovations techniques, organisationnelles et sociales pour actionner les leviers d'une transformation efficace par différents procédés chimiques, thermiques, biologiques et leurs couplages
  - Alternatives durables aux carburants d'origine fossile
  - Valorisation des co-produits des industries agroalimentaires, des résidus de l'agriculture et des biodéchets
  - Recycler les matériaux pour boucler les cycles en C-N-P

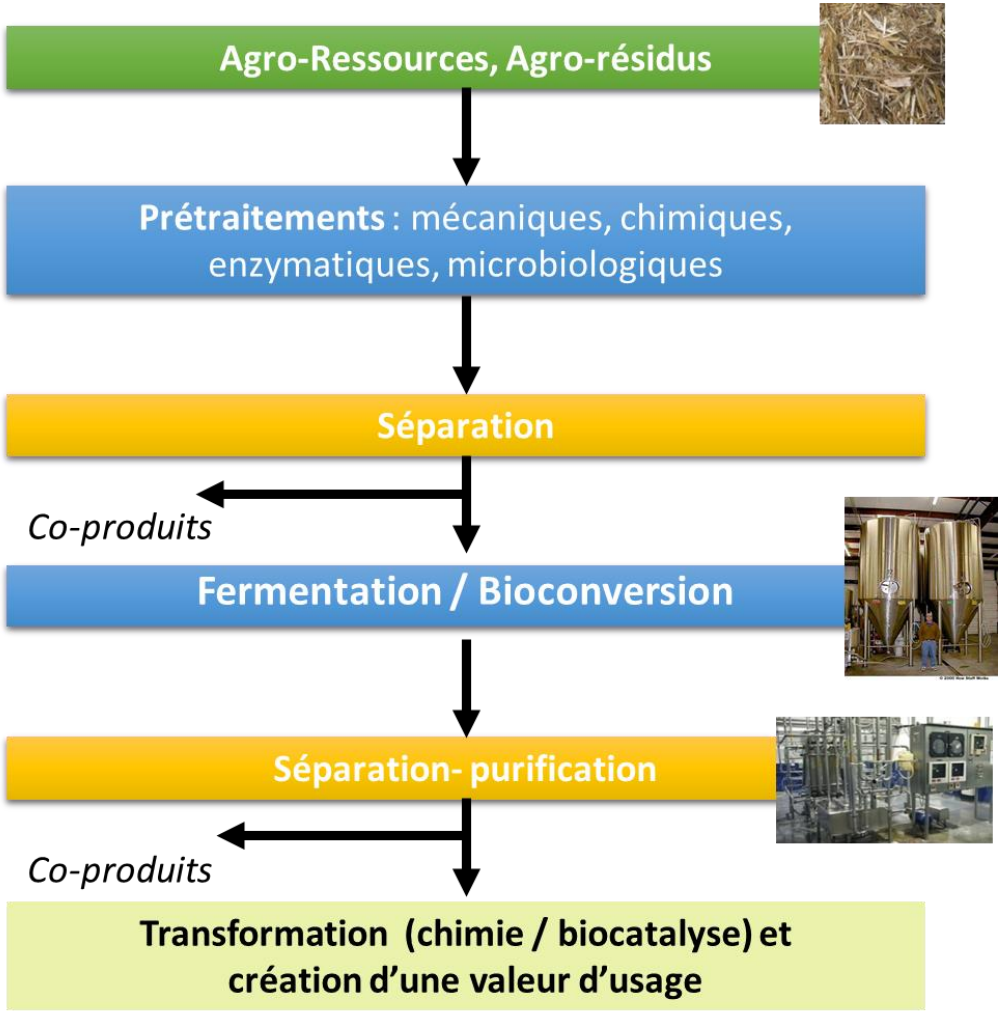


- Réfléchir aux échelles (du territoire à la planète) pour mobiliser efficacement les acteurs concernés

Approches technologiques



S. Sharma et al. *Environmental Pollution* 267 (2020) 115501



*Séparation : 40 à 70% de l'investissement et des coûts de fonctionnement dans les bioindustries**

*Ramaswamy et al., 2013
Humphrey et Keller, 2001

Des exemples déjà anciens…

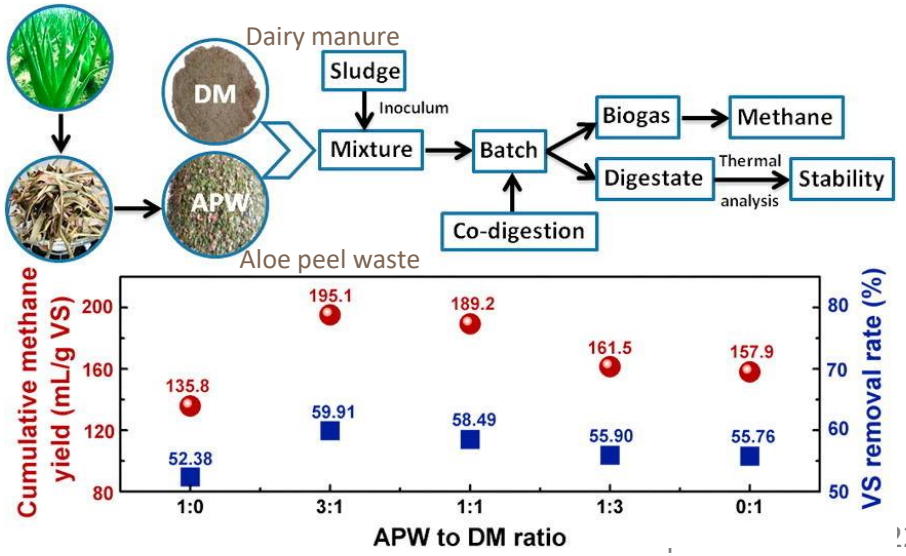
- Sucrerie
  - XIXe : découverte < chimie (*Marggraff, 1747*), industrialisation (*Achard, 1878*), et installation de cultures de betteraves aux alentours
  - Nombreuses innovations OU (diffusion, double carbonatation, évaporation triple effet), couplage distillation et création de deux filières de transformation (1880's)
  - Aujourd'hui, les usines de canne à sucre produisent de l'électricité (combustion de la bagasse) → autonomie, voire fourniture au réseau
- Industrie papetière…

1992 : mise en service d'une centrale thermique mixte bagasse-charbon à La Réunion (1e mondiale). Deux centrales, attenantes aux usines sucrières, transforment 540 000 t bagasse en énergie, ce qui évite l'importation et la combustion de 138 000 t charbon chaque année. (TEREOS, www.tereos.re/la-filiere-canne-a-sucre-rhum-energie)

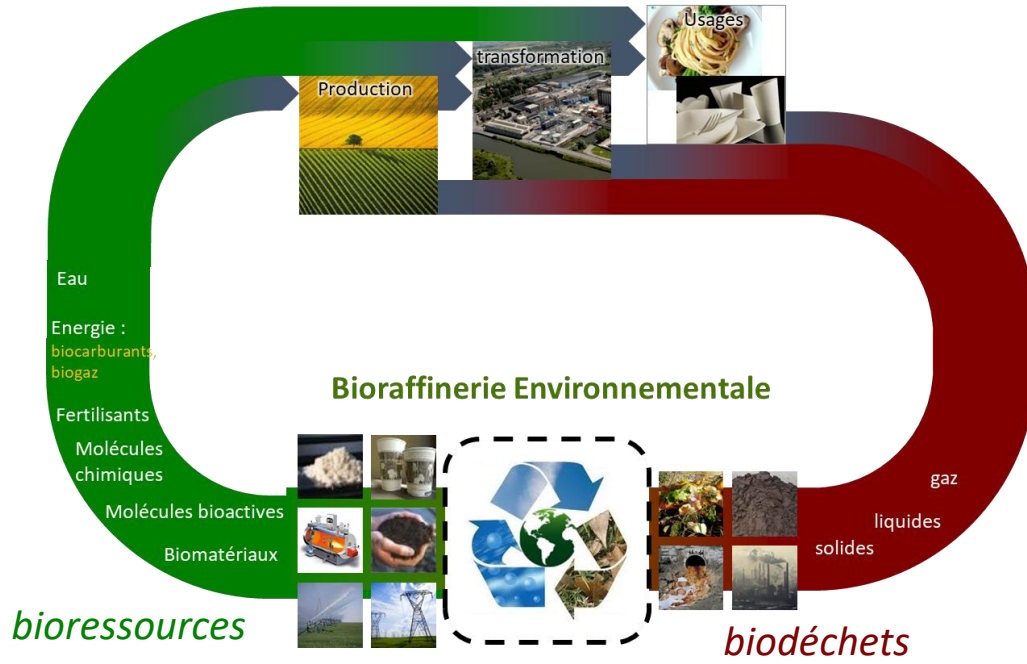
- Nouveaux paradigmes rendus possibles par le développement et la maîtrise des biotraitements microbiens

Développer la bioraffinerie environnementale

- Compostage, méthanisation
- Digestion anaérobie par des écosystèmes microbiens
  - Bactéries hydrolytiques → protéines, lipides, cellulose, amidon → acides aminés, acides gras, sucres simples
  - Bactéries acidogènes → AGV, alcools, CO_2, H_2S ✸ *bioéthanol, biomolécules pour la chimie verte*
  - Bactéries acétogènes → acide acétique, CO_2, H_2 ✸ *acétate pour la chimie verte, H_2*
  - Archées → CH_4, CO_2
- Degrés de liberté
  - Bloquer à certaines étapes selon les finalités ✸
  - T, pH → orienter les métabolismes
  - Prétraitements, procédés de séparation
  - Souches
  - Co-digestion



(X. Huang *et al.*, 2016, *Bioresource Technol*)



d'après J.P. Steyer (LBE)

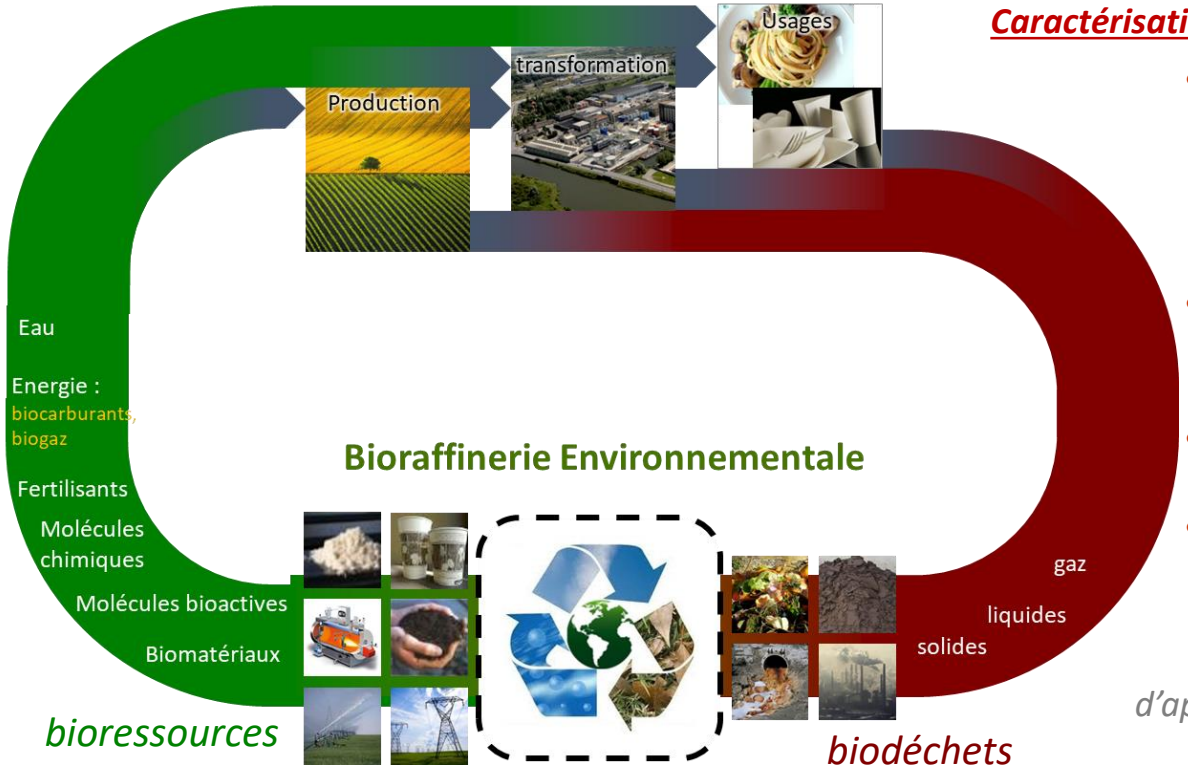
Développer la bioraffinerie environnementale

Développement de solutions technologiques

- Définir des **procédés** sobres, à haute efficacité énergétique et à faible impact environnemental
- Développer des **modèles de connaissance** des réacteurs multiphasiques et opérations unitaires
- Optimiser, dimensionner les procédés par le développement de **modèles de simulation multiphysiques**
- Investiguer de nouvelles **solutions d'intensification**
- Caractériser en environnement réel simulé les **performances** des procédés
- Préconiser les conditions de mise en œuvre pour une transposition à **l'échelle industrielle**

Développement de solutions technologiques

- Analyser la **durabilité** et le **potentiel de déploiement** industriel
- Proposer des scénarios d'implémentation favorisant une démarche d'**écologie industrielle**



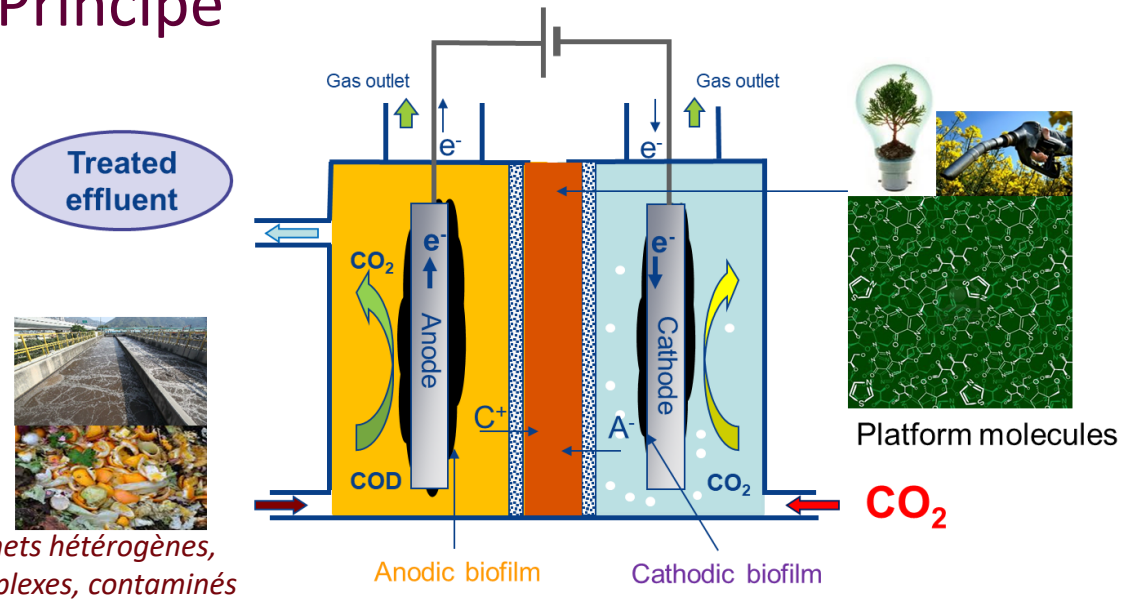
Caractérisation des ressources et co-produits

- Connaître la nature, les **compositions moléculaires** et les **propriétés physico-chimiques** des matières valorisées
- Prédire, mesurer, optimiser leurs **potentiels de valorisation et d'usages**
- Evaluer **l'abondance** et la **disponibilité** des ressources
- Spécifier les **contraintes locales** d'exploitation, les modes d'**approvisionnement**

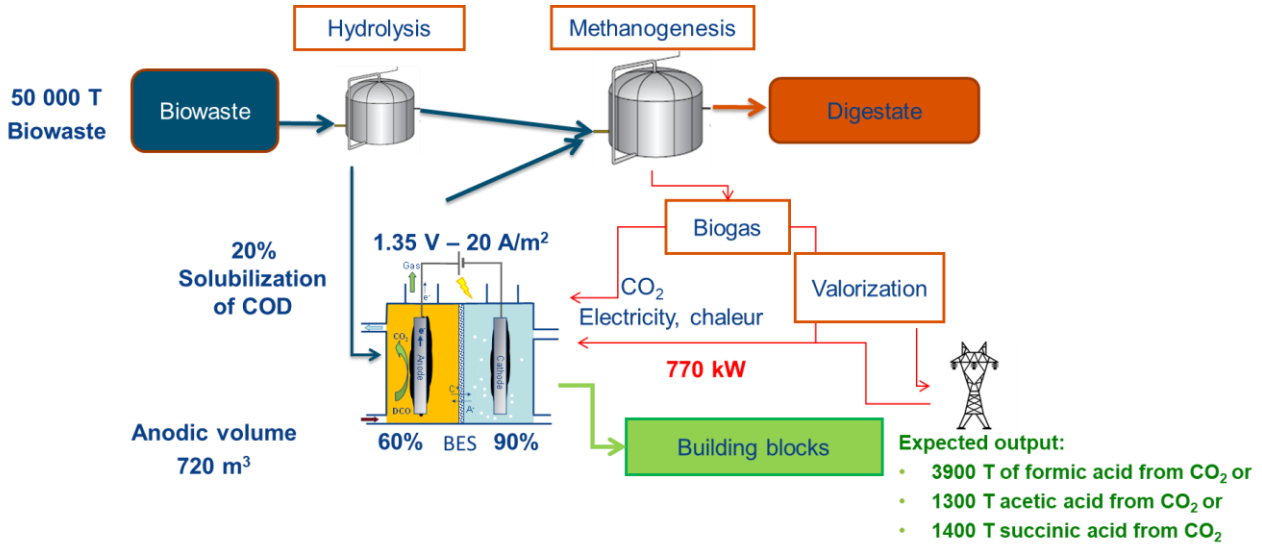
d'après J.P. Steyer (LBE) et GEPEA

Ex. de nouvelle technologie pour la production de molécules plateformes à partir de déchets : la bio-électrosynthèse

- Principe



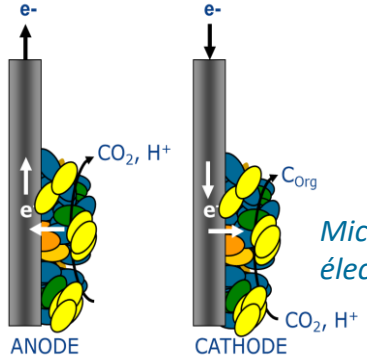
- Modélisation et scénarios d'implantation industrielle



✓ Séparation physique entre molécules produites et déchets contaminés

✓ Interfaçage du métabolisme microbien à un circuit électrique

BIORARE project
ANR-10-BTBR-02



Microorganismes électroactifs

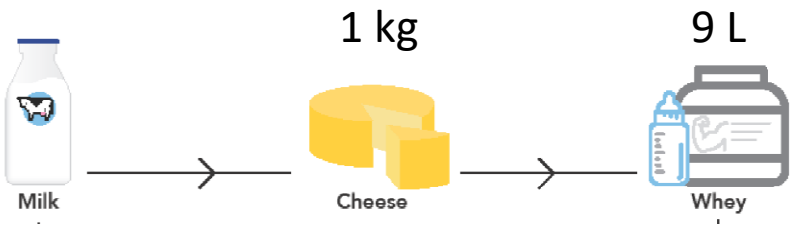
TB rendts de conversion

✓ ACV : impacts inférieurs à la production de bioéthanol < betteraves

✓ Phase pilote (→ TRL 7/8)

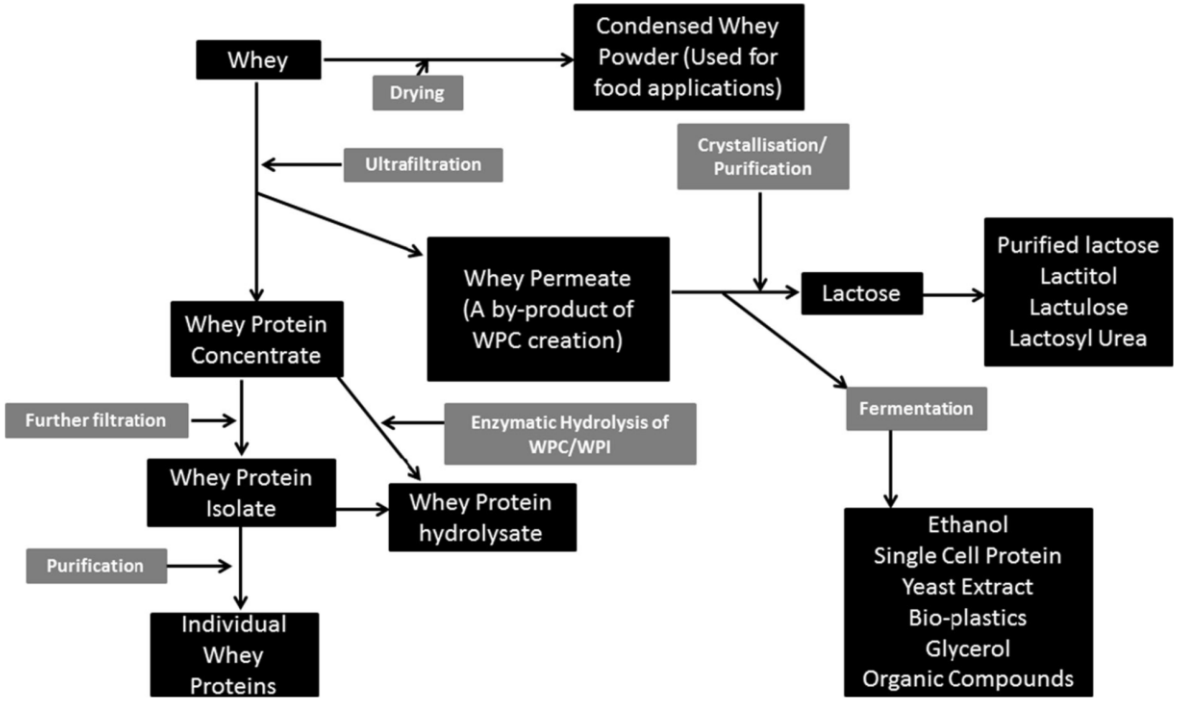
d'après T. Bouchez (PROSE)

Ex. de valorisation de résidus agro-industriels : lactosérum



- ✓ 190.10^6 t/an
- ✓ très polluant
- ✓ riche en nutriments, protéines, lactose

→ *alimentation humaine* *(concentrats protéiques, boissons, ricotta/mysoft, ingr fonctionnels)*, *peptides bioactifs* *(facteurs de croissance)*, *alimentation bétail, fertilisants, biotechnologies blanches*



- Ingrédients pour l'industrie boulangère
- Formules infantiles
- Glucose, galactose
- Probiotiques (GOS)

- Bioéthanol : 7 $g.L^{-1}.h^{-1}$ (↗ par génie génétique)
- Ferments, antibiotiques, produits pharmaceutiques
- Bioplastiques : PHA, PLA
- Détergents…

(Ryan *et al.*, 2016, *Env Environ Sci Biotechnol*)

Développement d'une filière industrielle



- Carbery (Cork, Irlande) : pionnière depuis 1978
  - Éthanol → boissons, pharmacie, encres
  - < 2005 → biocarburants (Maxol Oils, E85 jusqu'en 2010, puis E5)
  - 12 ML éthanol/an ; 11 cuves de fermentation en batch → distillation
  - Eq. à plus de 16 000 t d'émissions de CO_2 évitées par rapport à de l'essence standard
- Autres usines
  - NZ : Anchor Ethanol (filiale de Fonterra Coop Group) : 3 usines, 15 ML/an
  - Allemagne : Müllermilch
- Perspectives très attractives, mais non compétitif face à au bioéthanol < canne à sucre, maïs
- Besoin de développer des procédés plus efficaces et plus rentables → bioéthanol, bioplastiques

Développer la bioraffinerie à partir de cultures dédiées ou d'agro-résidus riches en lignocellulose

- Utilisation de matière lignocellulosique
  - Résidus agricoles, déchets forestiers, cultures dédiées comme le miscanthus
  - Ressource disponible importante et non dédiée à l'alimentation, prix modéré
  - Défis : coût de la transformation de la cellulose en sucres (hydrolyse enzymatique, liquides ioniques) & valorisation des coproduits (hémicelluloses et lignine)

→ *développement de procédés combinés (microorganismes produisant leurs propres enzymes)*

→ *souches capables de fermenter C_5 (xylose, arabinose) et C_6 (glucose, mannose, galactose)*

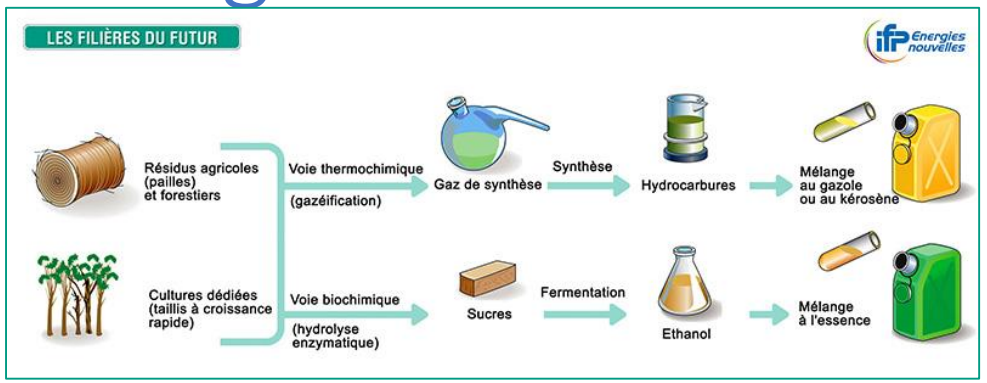
→ *contrôle T-pH-mélange*

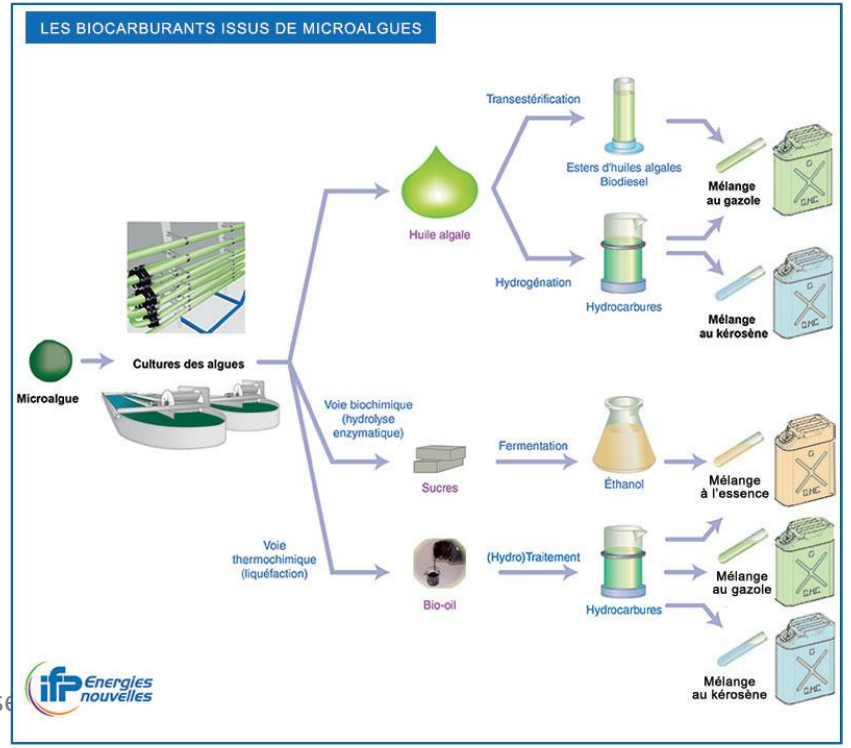
→ *génie métabolique/édition du génome (accroitre le rendement de saccharification, production durable de cellulases et d'hémicellulases dans les plantes)…*

- Utilisation de microalgues riches en huiles
  - Biocarburants 3e génération : transformation des triglycérides par transestérification ou hydrogénation catalytique ; TRL faibles, coûts de production élevés
  - Applications à hte VA (industrie cosmétique, chimie verte)

→ *maîtriser et optimiser la bioréaction photosynthétique (physiologie, génie métabolique, intensification de photobioréacteurs)*

→ *développer et maîtriser des procédés de fractionnement/purification et de bioraffinage, changement d'échelle …*



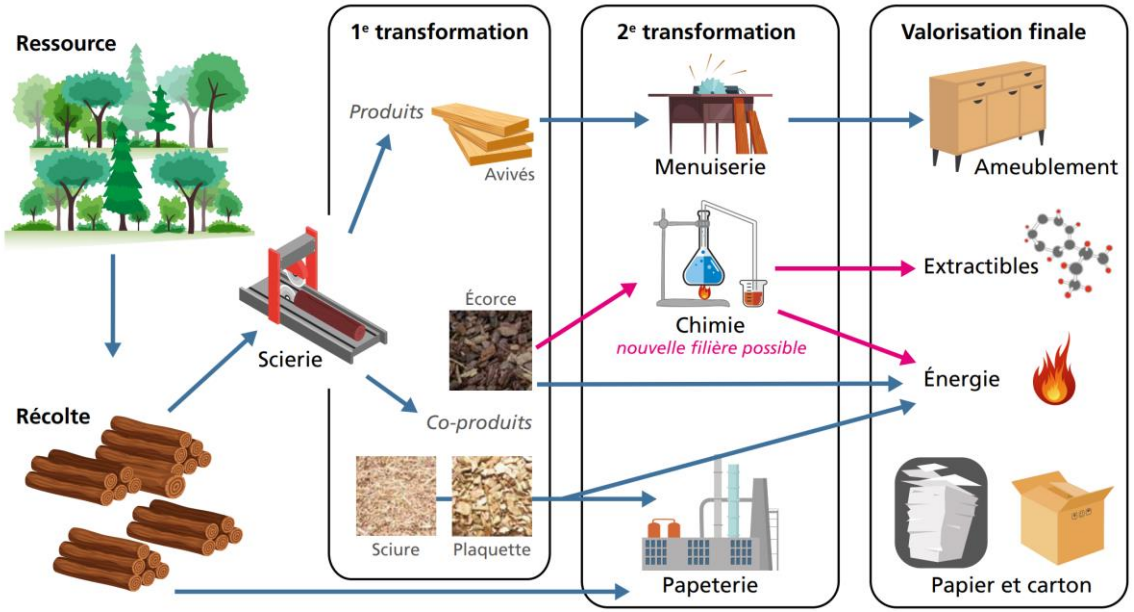




Développer la filière bois

- Atouts
  - France >16,9 millions ha, 4e pays européen en surfaces boisées
  - séquestration du carbone dans la biomasse
  - stockage du CO_2 dans les produits résultant de l'industrie du bois
  - substitution des matériaux pétro-sourcés pour la chimie, l'énergie ou la construction

- Renforcer la conception systémique de **filières forêt-bois-chimie** parmi
  - les filières parallèles forêt-bois
  - les boucles de recyclage des déchets et bois en fin d'usage
  - Les transferts et regroupements de biomasses entre filières

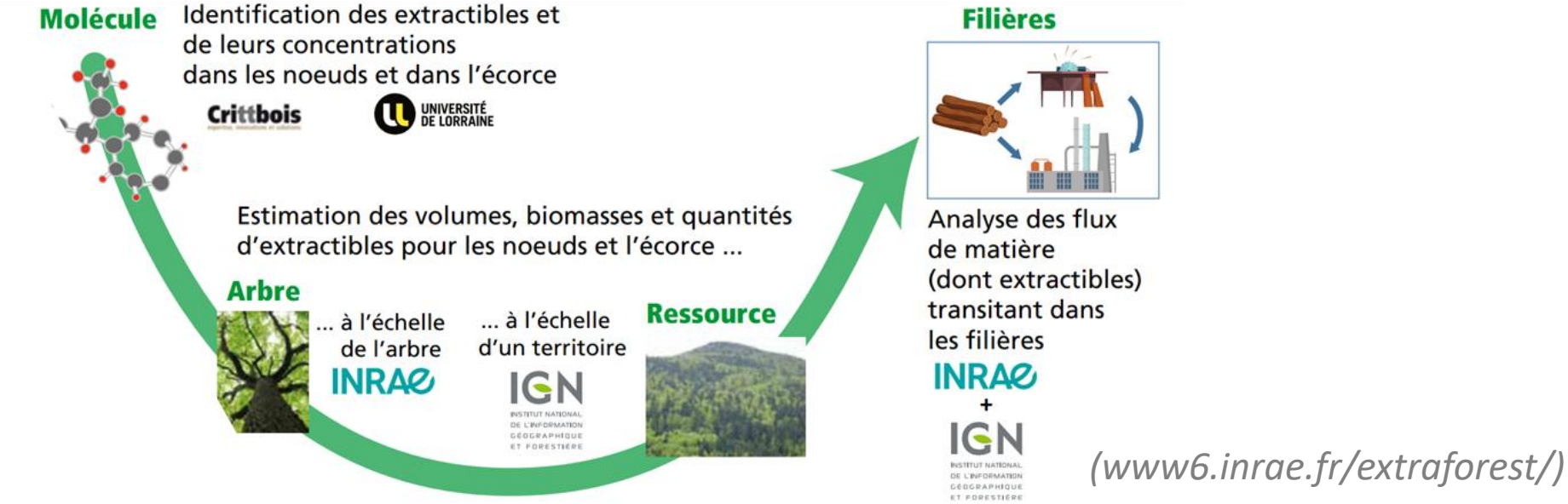




Projet ExtraForEst *(MAAF 2017-2022)*

INNOVER POUR
LA CHIMIE DU BOIS

- Depuis l'identification des molécules extractibles jusqu'à l'analyse intégrative des filières forêt-bois

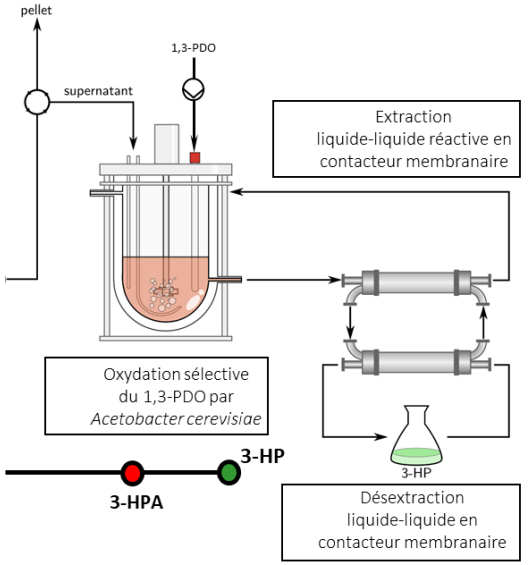


(www6.inrae.fr/extraforest/)

- Création d'une PF Woodchem Valley (Epinal)
  - Université de lorraine, critt Bois, pôles de compétitivités IAR et Fibres Energivie, laboratoire LERMAB
  - ONF, Foret et Bois de l'Est, Communauté d'Agglomération d'Epinal
  - Norske Skog Golbey, Soprema, Biolie

Défis pour le génie des procédés

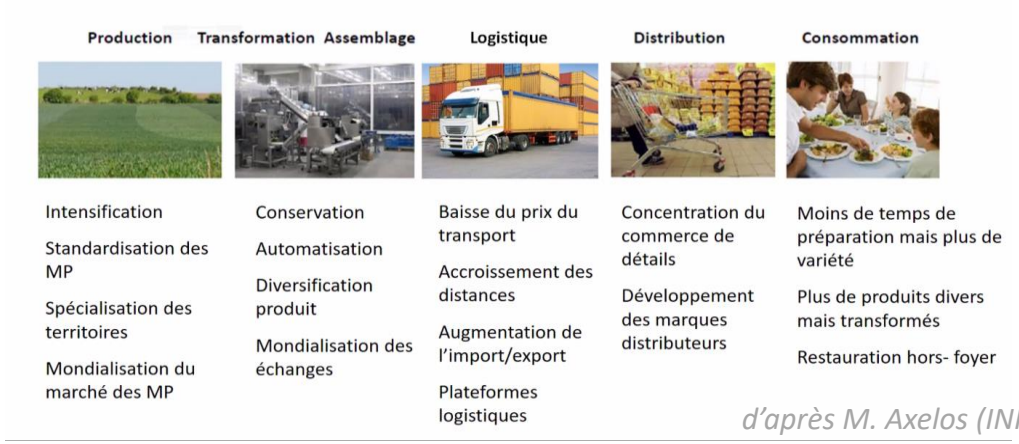
- Développer des modèles de connaissances complexes
  - Phénomènes multiphasiques, multicomposants
- Développer une vision intégrative en tenant compte
  - des caractéristiques et des potentialités de dégradation des matières premières
  - des performance de bioconversion des consortia microbiens
  - des possibilités offertes par le génie génétique (ingénierie métabolique, édition du génome)
- Développer des procédés combinés (intensification)
  - Bio-électrosynthèse pour la chimie verte
  - Procédés de fermentation-extractive → améliorer les performances de la bioconversion en éliminant en continu les molécules finales inhibitrices
  - Favoriser l'extraction : MW, ultrasons, CEP
- Passer de l'innovation scientifique à la production industrielle avec des coûts acceptables
  - scale-up, design et contrôle des bioréacteurs, efficacité des procédés d'extraction et de purification
  - minimiser des consommations d'eau et d'énergie
  - analyser les flux et les bénéfices environnementaux



Chemarin *et al.*, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2018
Sánchez-Castañeda *et al.*, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 2019

Les enjeux de l'alimentation

- Évolution des systèmes alimentaires dans les 50 dernières années

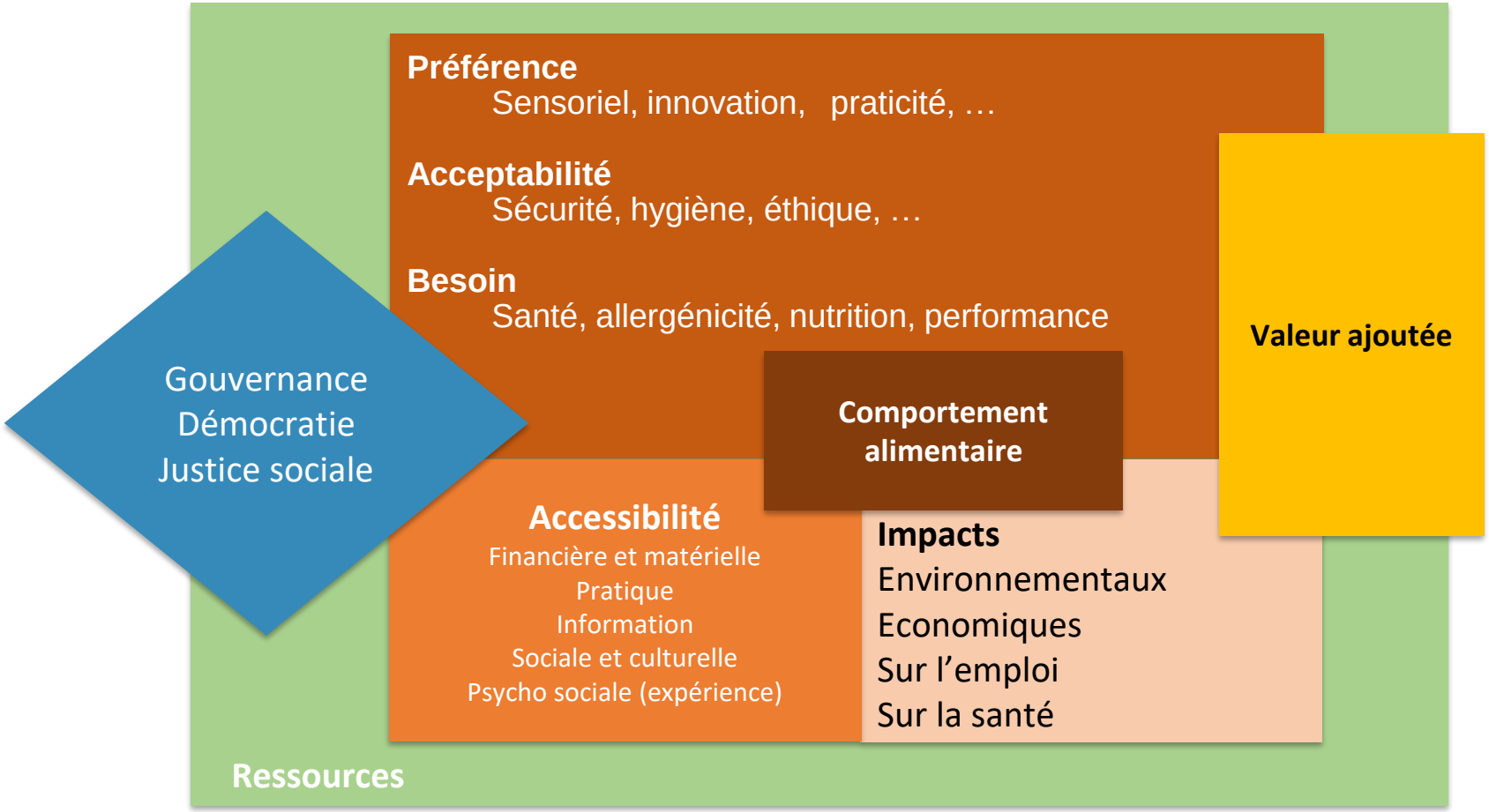


d'après M. Axelos (INRAE)

- Effets négatifs
  - Insécurité alimentaire, malnutrition et faim
  - Augmentation des maladies chroniques
  - Montée des inégalités
- Systèmes sous contraintes
  - Urbanisation : accès et environnement alimentaire
  - Sédentarité
  - Vieillissement de la population

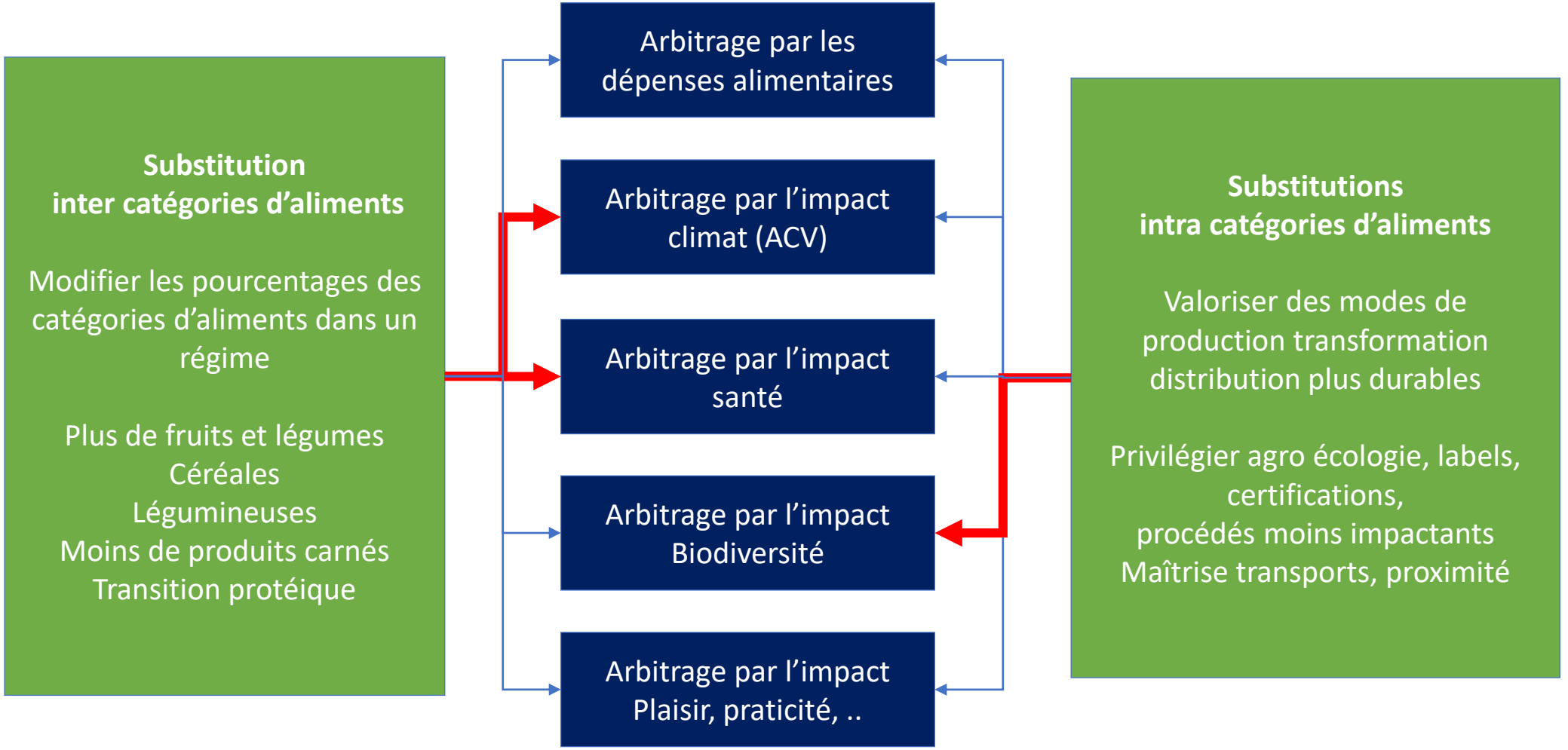
- Impact du dérèglement climatique
  - Tensions sur les approvisionnements
  - Tension internationale qui va tendre l'insécurité alimentaire
  - Concurrence sur les usages avec les autres voies de transformation de la biomasse (nexus alimentation-énergie-eau)
  - Développement de nouvelles pratiques agricoles
- Evolutions des comportements alimentaires
  - Contraintes nouvelles sur l'aliment, poids des études épidémiologiques (impacts à long terme de l'alimentation)
  - Nouveaux marchés, nouveaux acteurs, RHF
  - Des conséquences encore mal connues de la crise sanitaire
- Défis
  - Proposer une alimentation durable, saine et accessible à tous
  - Tout en assurant une juste rémunération des agriculteurs
  - Développer des aliments non « ultra-transformés », proposer des alternatives aux protéines animales

Fonctions attendues de la transformation & systèmes alimentaires



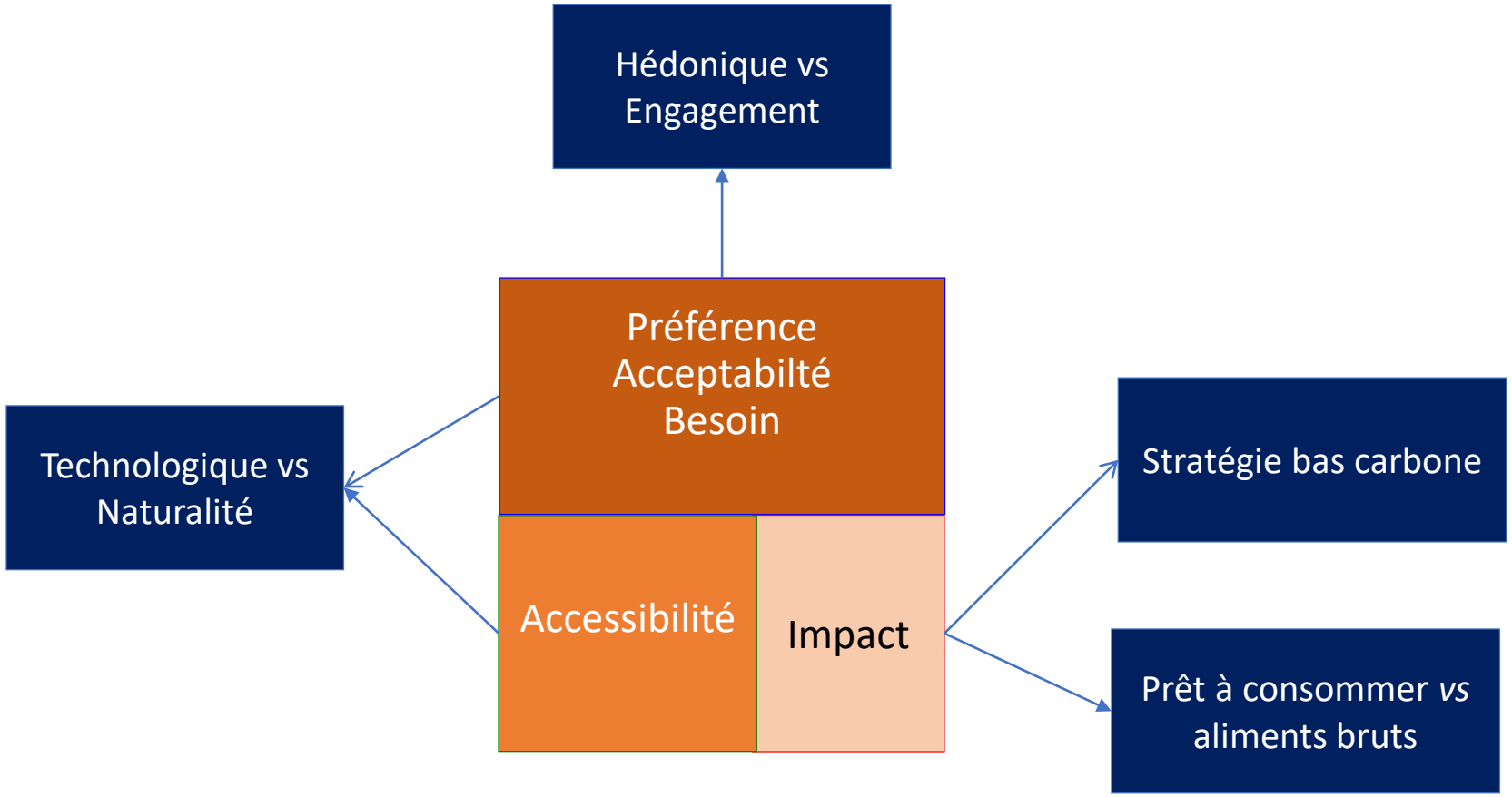
(d'après G. Trystram, AgroParisTech)

Diversité de comportements et arbitrages induits



(d'après L.G. Soler, INRAE, 2021)

Des tensions qui pilotent l'innovation



Comment repenser la transformation alimentaire ?

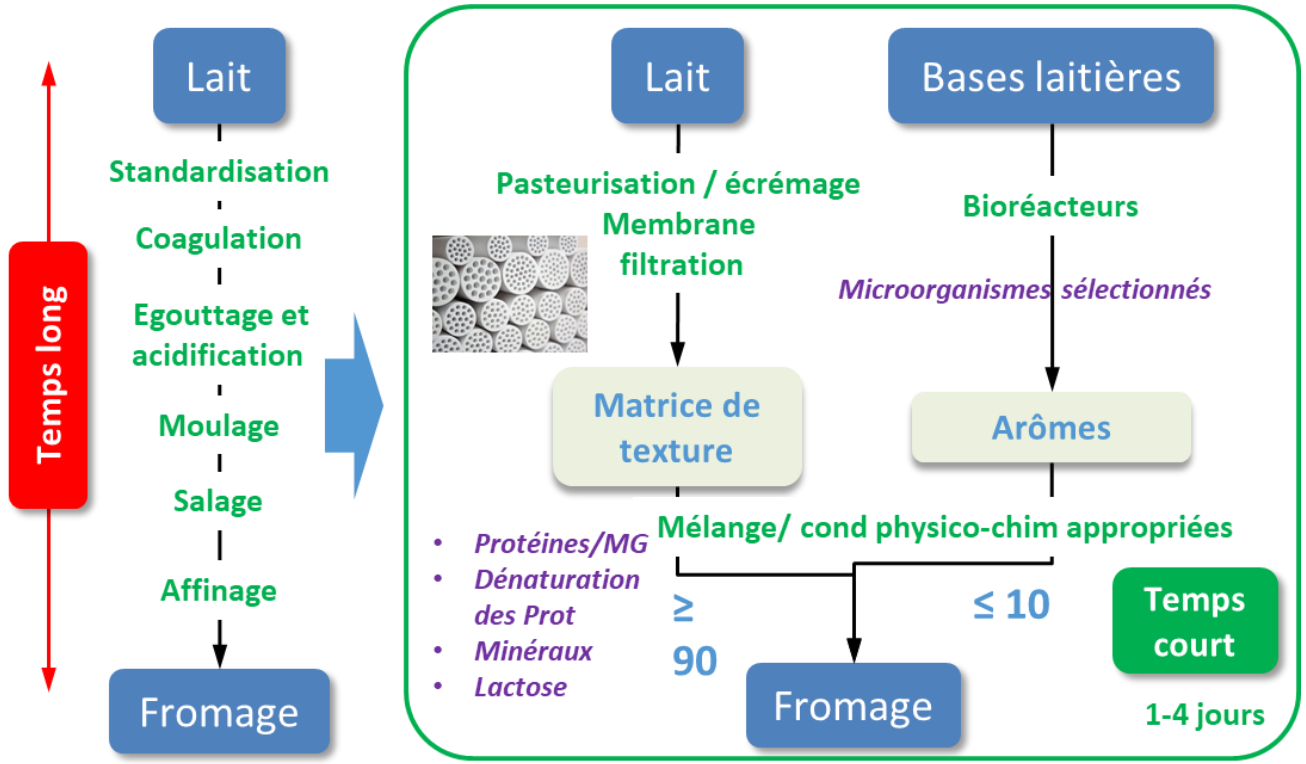
- Prendre en compte une diversité accrue
  - Des MP (diversification des modes de production agricole)
  - Des besoins, envies, communautés de consommateurs
- Favoriser la dimension santé de l'aliment
  - Vectoriser des molécules bioactives, nanostructures
  - Limiter le sel, le sucre, le gras ✸
  - Reformuler et substituer des ingrédients, modifier les procédés pour limiter les additifs (naturalité, « *clean label* ») ✸
  - Maîtriser les réactions (bio)chimiques induites par les transformations
- Développer des sensations nouvelles (ou mimétiques)
  - Maîtriser la structuration, l'obtention de textures par la formulation et les procédés
  - Maîtriser la réactivité (formation d'arômes)
  - Incorporer de nouvelles sources d'ingrédients
- Développer des produits de niche, sur-mesure
  - Nouvelles MP : algues, insectes, protéines synthétiques
  - Fabrication additive
- Repenser les modes de conservation et de distribution en lien avec les enjeux du DD
  - Distribution en vrac ✸
  - Nouveaux emballages biosourcés/bioactifs ✸
  - Limiter le recours à la chaine du froid ✸

✸ *Enjeu de sécurité sanitaire !*

Une innovation qui passe par les procédés
Ex : From'Innov

- Concept innovant de procédé fromager
  - Découplage et maîtrise de l'égouttage, de la coagulation et de l'affinage
  - Production en moins de 4 j, à la demande et avec une ligne de production unique, de textures allant de la pâte à tartiner à la pâte pressée
  - Co-produit standardisé (perméat)
  - Conduite simplifiée

- Innovations sur les produits
  - Grande variété d'arômes, formes originales → adaptéés à chaque marché local
  - Moins de sel, de gras, addition de probiotiques

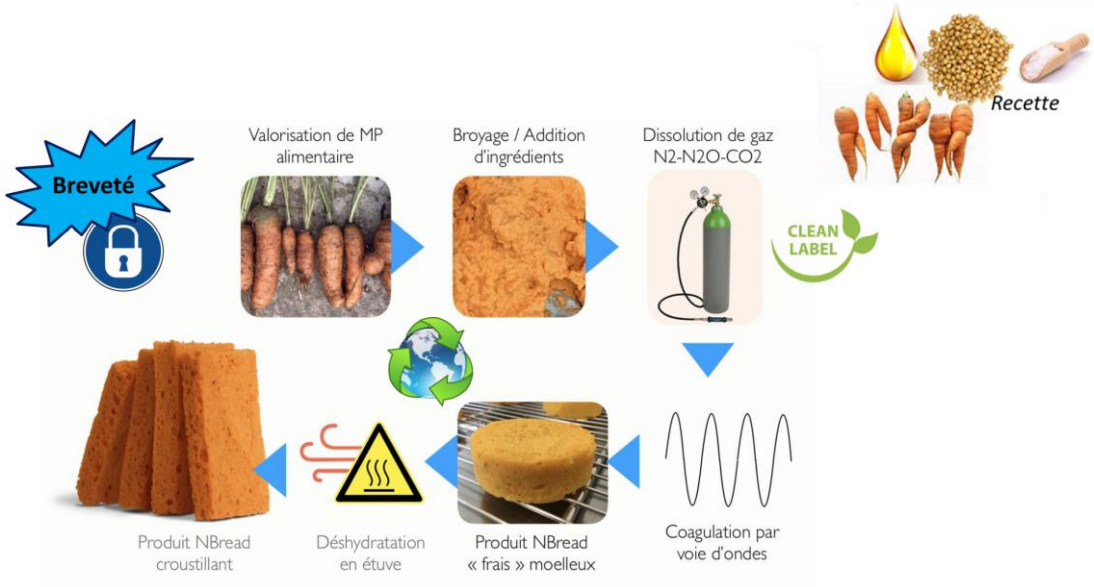


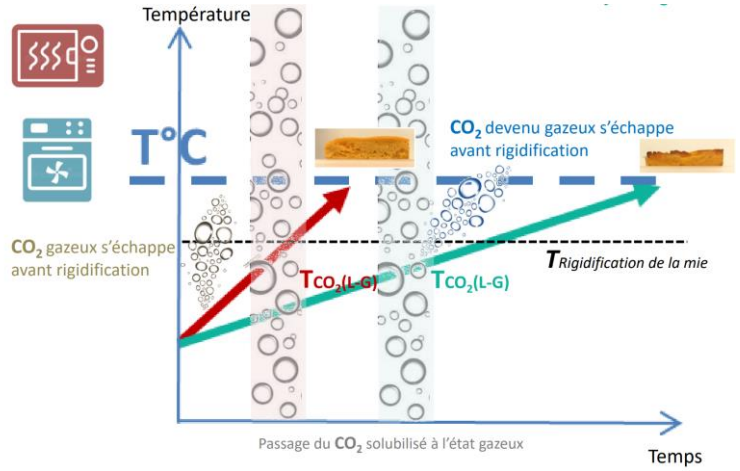
(d'après G. Garric, STLO)
World patent n° WO20166108024

Une innovation qui passe par les procédés
Ex : Nbread® process

- Développements de solutions de snacking végétal
  - Formulation simplifiée, sans poudres levantes
  - Procédé continu rapide combinant un mélange sous P de CO_2 et une cuisson MW
  - Textures moelleuses ou croustillantes

- La cuisson MW permet d'emprisonner le CO_2 par un rigidification précoce de la structure

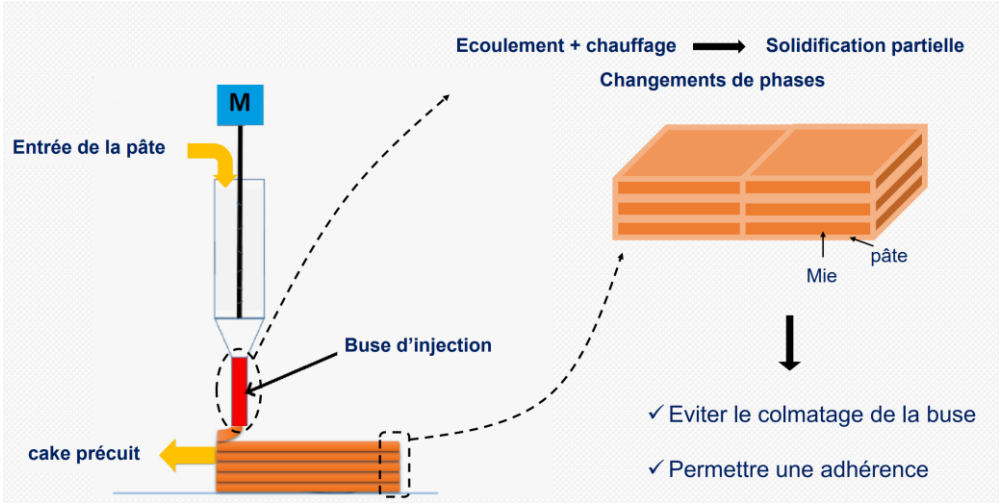


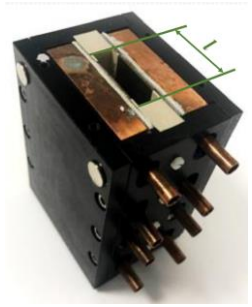


(thèse M. Chemin, BIA, 2022)

Une innovation qui passe par les procédés
Ex : post-traitement par chauffage ohmique intégré à la fabrication additive de produits céréaliers type cakes

- Permettre la stabilisation de la forme et la conception de structures alimentaires personnalisées
- Utilisation de la modélisation numérique comme outil prédictif et aide à la conception d'une buse de chauffage en continu
  - Permettant la cuisson de la pâte
  - Avec une inversion de profil des températures en écoulement : centre plus chaud que sur les côtés

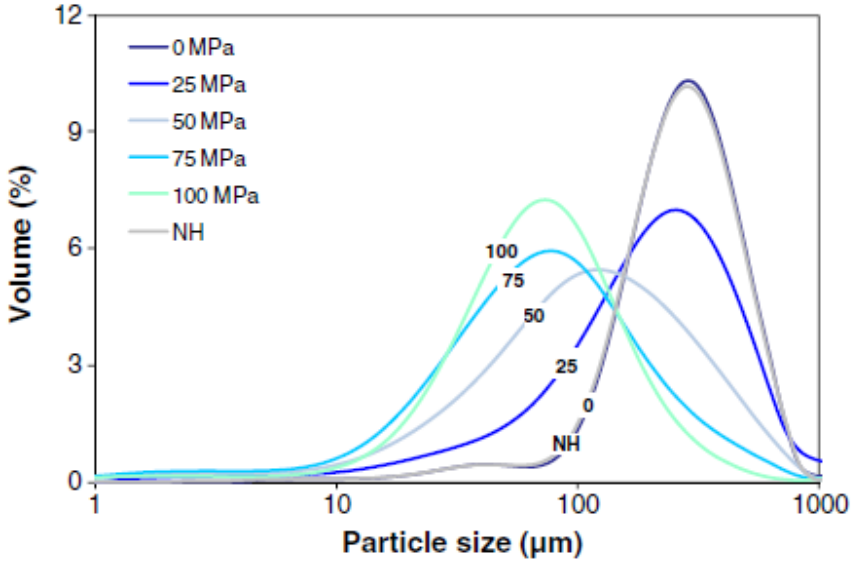


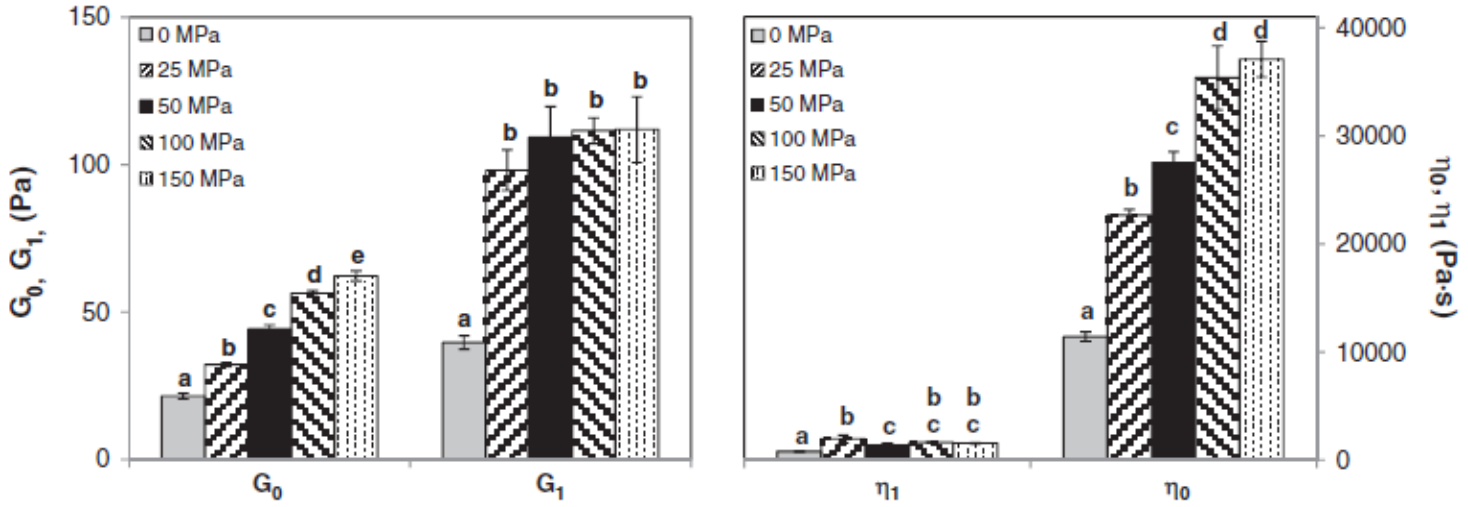


(thèse M. Khodeir, BIA-GEPEA, 2020)

Ex : homogénéisation HP

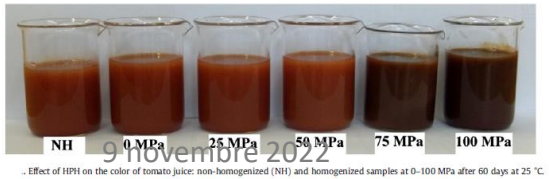
- Alternative aux traitements thermiques (minimal processing)
  - Inactivation des microorganismes
  - Impact sur les propriétés physicochimiques
- Ex : impact sur les propriétés rhéologiques et la couleur du jus de tomate





↗ *interactions entre particules* → ↗ *comportements élastiques et visqueux*

↗ consistance du produit → limite le besoin d'ajout d'hydrocolloïdes pour stabiliser la suspension



. Effect of HPH on the color of tomato juice: non-homogenized (NH) and homogenized samples at 0–100 MPa after 60 days at 25 °C.

libération du lycopène

Food Research International 51 (2013) 170–179

Quels enjeux pour les aliments de demain ?

- Aliments *vs* diètes alimentaires
- Enjeux des protéines végétales
  - Fonctionnalités
  - Propriétés organoleptiques
  - Nouveaux produits / *ultra-formulation*
- Transformations alimentaires adaptées à des territoires, plus proches des consommateurs
  - Intégrer les notions de résilience et robustesse dans la conception et proposer des solution éco-efficientes
  - Optimiser et rationaliser les usages dans des systèmes localisés
  - *Transformation à la ferme ? Dans des unités mobiles (limiter les pertes) ?*
- Beaucoup de potentiel pour les développements numériques (données, blockchain…)



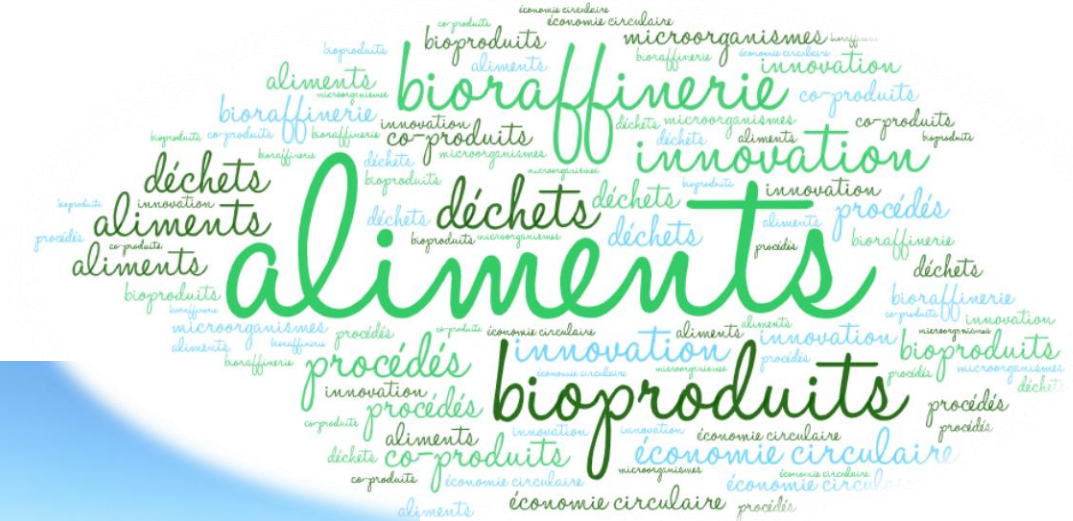
Procédé pour texturer des structures qui imitent les fibres de la viande de volaille
à partir de formules protéines de pois + huile végétale + arôme de viande

Pour conclure

- Rôle crucial de la bioéconomie pour faire face aux enjeux de développement durable
  - Nécessité de penser les cascades de transformations et d'usages pour boucler la circularité
  - Nécessité de maintenir une production alimentaire adaptée aux besoins de la population mondiale, qui permette de lutter à la fois contre la faim et la malnutrition et contre les maladies chroniques liées à l'alimentation, en garantissant la sureté de aliments
- Besoin d'écoconcevoir et de développer des filières territoriales
  - Exploiter au plus près de la production de biomasse sans rajouter des coûts de transport
  - S'adapter à la diversité / variabilité /aux flux de MP en tenant compte des équilibres entre usages
  - En comparant les usages concurrentiels (ACV)
- Besoin de recherches
  - Pour mieux comprendre les liens entre propriétés de agro-produits aux différentes échelles et leurs propriétés technologiques et fonctionnelles
  - Pour développer des procédés innovants et performants
  - Pour intensifier les procédés et passer à des échelles industrielles



Merci pour votre attention !



Merci à

Théodore Bouchez (PROSE)
Gilles Garric (STLO)
Patricia Le Bail (BIA)
Jérémy Pruvost (GEPEA)
Sophie Szopa (LSCE)
Jean-Philippe Steyer (LBE)
Gilles Trystram (SayFood)



catherine.bonazzi@inrae.fr

SayFood
Food & Bioproduct Engineering

INRAE AgroParisTech université PARIS-SACLAY