



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*



FranceAgriMer

ÉTABLISSEMENT NATIONAL
DES PRODUITS DE L'AGRICULTURE ET DE LA MER

LES
ÉTUDES



Cartographie des flux de biomasse dans les filières de production de molécules biosourcés

Rapport final



CARTOGRAPHIE DES FLUX DE BIOMASSE DANS LES FILIÈRES DE PRODUCTION DE MOLÉCULES BIOSOURCÉES

Rapport final
Janvier 2023



FranceAgriMer

Auteurs

Etude réalisée par Romain Joya (Ceresco) et Justine Hamon (Ceresco), avec Jérôme le Notre (Pivert) et l'appui des membres du comité de pilotage de cette étude, en particulier Pierre-Louis Guillo (B4C) et Louis Tiers (B4C).

Comment citer ce rapport :

Ceresco, Pivert, 2023. Cartographie des flux de biomasse dans les filières de production de molécules biosourcées. Etude financée par FranceAgriMer.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement les membres du comité de pilotage pour leur participation active ainsi que les experts mobilisés tout au long de cette étude (entretiens, relecture, groupe d'experts) pour leurs apports riches et détaillés ayant permis de nourrir ce rapport.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	1
GLOSSAIRE	5
PORTER A CONNAISSANCE	6
1. CONCEPTS CLES	6
1.1 Définitions : Chimie verte, chimie biosourcée, produit biosourcé	6
1.1.1 La chimie verte	6
1.1.2 La chimie biosourcée	7
1.1.3 Un produit biosourcé	7
1.2 Biomasse et bioraffinerie	9
1.2.1 La biomasse, point d'entrée des bioraffineries	9
1.2.2 Les particularités de la biomasse pour la production de molécules biosourcées	11
1.2.3 Analogie entre raffinerie et bioraffinerie	12
1.3 Les différentes bioraffineries	14
1.3.1 Transformation de la biomasse au sein des bioraffineries	14
1.3.2 Panorama des bioraffineries et notion de plateforme	15
1.3.3 Les différentes bioraffineries	16
1.3.4 Le cas particulier des biotechnologies industrielles pour la production de molécules biosourcées	19
2. ENJEUX POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA CHIMIE BIOSOURCEE	22

2.1	Amélioration de la souveraineté des approvisionnements industriels	22
2.2	Réponse aux besoins en matières premières du secteur de la chimie	22
2.3	Valorisation des spécificités de la biomasse	24
2.4	Valorisation des externalités positives de la chimie biosourcée	28
2.5	Diversification des valorisations pour les agroressources	31
3.	CONTEXTE ACTUEL	31
3.1	Une accélération des projets industriels dans la chimie du végétal et des biotechnologies industrielles en France	31
3.2	Panorama des principaux projets industriels français	35
	ANALYSE	36
1.	INTRODUCTION	36
2.	OBJECTIFS DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE	37
2.1	Objectifs de l'étude	37
2.1.1	Eclairer la répartition des utilisations de la biomasse	37
2.1.2	La nécessité d'une cartographie des flux de biomasse	38
2.1.3	Disposer d'éléments tangibles pour alimenter les politiques publiques	40
2.2	Méthodologie	42
2.2.1	Périmètre de l'étude	42
2.2.2	Approche méthodologique	42
2.2.3	Critères de choix des molécules	44
3.	PRODUCTION FRANÇAISE DES MOLECULES BIOSOURCEES ETUDIEES ET BESOINS EN BIOMASSE	45
3.1	Liste des molécules étudiées	45
3.2	Diversité des matières premières utilisées	46
3.3	Procédés, rendements et autres critères de performance	48
3.4	Capacités actuelles et annoncées pour leur production	51
3.5	Utilisations de biomasse pour la production des biomolécules étudiées	52
4.	MISE EN PERSPECTIVE PAR RAPPORT AUX AUTRES UTILISATIONS DES BIOMASSES ETUDIEES	54
4.1	Bioraffinerie des corps gras (colza et tournesol)	54
4.1.1	Production française de colza et tournesol	54
4.1.2	Éléments de compréhension du fonctionnement de la bioraffinerie	57

4.1.1	Diagramme des utilisations	59
4.1.2	Focus sur les principales biomolécules	60
4.1.3	Grandes tendances et forces motrices de l'industrie des corps gras	60
4.2	Bioraffinerie du sucre de betterave	63
4.2.1	Dynamiques de la production française de betteraves	63
4.2.2	Eléments de compréhension du fonctionnement de la bioraffinerie du sucre	66
4.2.1	Diagramme des utilisations	67
4.2.2	Focus sur les principales molécules biosourcées	69
4.2.3	Grandes tendances et forces motrices	69
4.3	Bioraffinerie de l'amidon de céréales	71
4.3.1	Production française de céréales	71
4.3.2	Eléments de compréhension du fonctionnement de la bioraffinerie	74
4.3.3	Diagramme des utilisations	77
4.3.4	Focus sur les principales biomolécules	78
4.3.5	Grandes tendances et forces motrices de l'amidonnerie	80
4.4	Poids relatifs des productions de molécules biosourcées	81
4.4.1	Disponibilités totales en carbone	81
4.4.2	Analyse par type de matières premières	82
4.4.3	Equivalents de surfaces cultivées mobilisées	84
4.5	Bilan des consommations de biomasse pour la production de molécules	85
5.	FACTEURS DE DEVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION BIOSOURCEE	87
5.1	Synthèse des forces motrices de la chimie biosourcée	87
5.2	Focus sur certains facteurs de développement de la chimie biosourcée	89
5.2.1	Compétitivité relative de la biomasse par rapport au pétrole	89
5.2.2	Compétitivité des différentes biomasses	90
5.2.3	Leviers techniques et R&D	91
5.2.4	Investissements et industrialisation	92
5.2.5	Repositionnement stratégique des acteurs	92
5.3	Focus sur les molécules étudiées	93
5.3.1	Tableau de synthèse	93
5.3.2	Analyse détaillée des déterminants par molécule	98
5.4	Illustration de l'impact de ces facteurs sur les développements industriels actuels	101
5.5	Autres utilisations non étudiées mais pouvant mobiliser a terme des volumes très significatifs de biomasse	102
5.5.1	Le bioéthanol de seconde génération	103
5.5.2	La production de polymères notamment de plastiques biosourcés	103
5.5.3	La production de solvants biosourcés	103
5.5.4	L'utilisation potentielle d'huiles végétales en HVO et le principe du biomass balance	104
5.6	Bilan des déterminants de la demande en produits biosourcés	108
6.	CONCLUSION	109

ANNEXES	111
1. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR LA REALISATION DES BILANS	111
1.1 Bilan sucrerie	111
1.2 Bilan éthanol	111
1.3 Bilan blé et maïs - amidonnerie	112
1.4 Bilan colza et tournesol	112
2. BIBLIOGRAPHIE MOBILISEE	113

GLOSSAIRE

- 1G : Première génération
- 2G : Seconde génération
- CAPEX : Capital Expenditure
- CASI : Changement d'Affectation des Sols Indirect
- DSP : Downstream Processing
- EMHV : Esters Méthyliques d'Huiles Végétales
- EMAG : Esters Méthyliques d'Acides Gras
- EP1 : Egoûts Pauvres 1
- EP2 : Egoûts Pauvres 2
- HVO : Huile Végétale Hydrogénée
- OPEX : Operational Expenditure
- PBA : Poly(Acrylate de Butyle)
- PBS : Poly(Succinate de Butyle)
- PEF : Polyéthylène Furanoate
- PLA : Acide Poly Lactique
- SBP : Sirop Basse Pureté
- SHP : Sirop Haute Pureté
- USP : Upstream Processing

PORTER A CONNAISSANCE

Concepts clés et enjeux de la production de molécules biosourcées : prérequis techniques à la compréhension du rapport d'analyse

Cette partie a pour objectif de synthétiser les prérequis nécessaires à la compréhension de l'étude.

Le contenu de l'étude est présenté à partir de la [page 36](#).

La réalisation de cette cartographie des flux de biomasse à destination de la production de molécules biosourcées a nécessité l'étude de deux secteurs :

1. la production et de la transformation primaire de la biomasse (production agricole, collecte)
2. la transformation de cette biomasse en molécules biosourcée.

1. CONCEPTS CLES

1.1 DEFINITIONS : CHIMIE VERTE, CHIMIE BIOSOURCEE, PRODUIT BIOSOURCE

1.1.1 LA CHIMIE VERTE

La chimie verte peut être définie comme une manière de conduire des procédés de synthèse chimique qui soit plus soutenable d'un point de vue environnemental, et plus sûre d'un point de vue (éco)-toxicologique. La chimie verte repose sur l'application de douze grands principes, visant à réduire les impacts environnementaux des procédés [236] :

- › Prévention des déchets : il est préférable de prévenir la formation de déchets plutôt que de les traiter ou les éliminer une fois après qu'ils ont été formés.
- › Economie d'atomes : les méthodes de synthèse doivent être construites de manière à maximiser l'incorporation de tous les matières et atomes utilisés dans le procédé dans le produit final
- › Eviter la formation d'entités chimiques dangereuses : les procédés de synthèse doivent être construits de manière à utiliser et générer des substances non toxiques pour la santé humaine et pour l'environnement
- › Synthèse de composés chimiques moins toxiques : les produits chimiques obtenus doivent avoir une toxicité réduite tout en préservant l'efficacité

- › Utilisation de solvants et d'auxiliaires plus sûrs
- › Développement de procédés consommant moins d'énergie
- › Utilisation de matières premières renouvelables
- › Réduction de la production de dérivés : les étapes de dérivatisation conduisant au produit final (agents bloquants, protection/déprotection) doivent être minimisées ou évitées si possible, afin de limiter les réactifs utilisés, l'énergie consommée et les déchets générés.
- › Utilisation de réactifs catalytiques les plus sélectifs possibles : en particulier, développement de stratégies biocatalytiques ou hybrides.
- › Fin de vie des produits chimiques : réflexion en amont sur la capacité du produit chimique synthétisé à se dégrader pour limiter la persistance dans l'environnement, et éviter la formation de produits de dégradation toxiques.
- › Prévention des pollutions et de la formation de composés toxiques en temps réel lors du procédé, par des méthodologies analytiques
- › Augmenter la sécurité des molécules et des procédés pour prévenir les risques d'accidents chimiques.

1.1.2 LA CHIMIE BIOSOURCÉE

La chimie biosourcée a comme caractéristique principale d'utiliser des matières premières nécessairement dérivées de biomasse et donc renouvelables. Le développement des procédés de chimie biosourcée cherche à respecter au maximum les principes de la chimie verte, même si des compromis doivent souvent être trouvés pour conserver une compétitivité économique suffisante.

Les produits de cette chimie de la biomasse sont donc qualifiés de « bio-sourcés ». L'incorporation des produits de la chimie biosourcée peut se faire dans les filières industrielles existantes, ou impliquer la création de nouvelles chaînes de valeur et de nouveaux procédés [237].

1.1.3 UN PRODUIT BIOSOURCE

D'après les standards européens et la norme EN 1675:2014, le terme « biosourcé » signifie « dérivé de biomasse ». De ce fait, des produits biosourcés (bouteille, matériaux d'isolation, produits en bois, solvants, intermédiaires chimiques, matériaux composites...), sont des produits qui sont totalement ou partiellement dérivés de biomasse. Il convient de noter que les normes d'évaluation associées quantifient la quantité de biomasse contenue dans des produits mais ne disent rien sur d'autres caractéristiques du produit comme la performance de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV), la biodégradabilité, ou le caractère soutenable de la production de la biomasse [239].

Encadré : détermination du contenu biosourcé

En Europe le comité technique CEN/TC 411 a été établi afin de mettre en place des normes autour des produits biosourcés. La CEN/TR 16721 dresse ainsi un panorama des méthodes qui peuvent être utilisées pour déterminer la teneur biosourcée des produits solides, liquides et gazeux. On retrouve ainsi :

- **La méthode d'analyse du radiocarbone.** Il s'agit de la méthode la plus commune, pour laquelle la détermination de la teneur en biomasse est basée sur la mesure du carbone 14 (^{14}C) dans les produits biosourcés. Le carbone élémentaire, C, a en effet un isotope, ^{14}C , qui permet de différencier clairement les substances à base de carbone issues de la biomasse des substances à base de carbone d'origine fossile. Le ^{14}C présent dans les produits chimiques provient du CO_2 atmosphérique récent. En raison de sa désintégration radioactive, il est pratiquement absent des produits fossiles antérieurs à 20 000 ans à 30 000 ans. La teneur en ^{14}C peut ainsi être considérée comme un traceur des produits chimiques récemment synthétisés à partir de CO_2

atmosphérique et en particulier des produits récents [240]. L'analyse radiocarbone permet ainsi de calculer la fraction de carbone biosourcé qui peut également être exprimée en fraction de la teneur en carbone total. La réalisation d'une analyse radiocarbone peut nécessiter d'utiliser des instruments de mesure très sophistiqués et donc ayant un coût élevé. Les méthodes au radiocarbone se concentrent sur le carbone uniquement, et ne peuvent donc déterminer que le contenu en carbone biosourcé, négligeant ainsi le fait que les biomasses contiennent aussi de larges quantités d'autres éléments (hydrogène, oxygène et azote). En conséquence, la mesure peut dévier significativement par rapport au contenu réel en biomasse.

- **La méthode de bilan matière** : elle consiste à quantifier, pour un produit donné, les entrées en masse de matériaux biosourcés qui entrent dans l'unité de fabrication et à identifier, par un moyen de calcul et de traçage, ces masses dans chacune des compositions de produits mises sur le marché. Cette méthode est applicable à n'importe quel produit provenant d'une unité de production et pour lequel les teneurs biosourcées des intrants sont connues, les éléments H, N et O qui sont rattachés à une structure carbonée biosourcée étant considérés comme biosourcés. Les produits naturels (i.e. chanvre, liège, bois, etc.) ont une teneur en biosourcé imposée de 100%.

Les méthodes européennes différencient donc le **contenu biosourcé** et le **contenu en carbone biosourcé** : différents standards ont donc été construits pour prendre en compte ces divergences dans l'approche. Une liste de toutes les normes relatives à la mesure du caractère biosourcé des matériaux utilisés dans les labels a été effectuée dans le Tableau 1- avec des précisions sur les domaines d'applications ainsi que les principes généraux [240].

Tableau 1 Normes utilisées pour mesurer le taux de biosourcé d'un matériau

Norme	Intitulé	Méthodes utilisées		Domaine d'application	Label concerné
		Analyse radiocarbone	Bilan de matières		
ISO 16640	Détermination de la teneur en carbone biosourcé par la méthode au radiocarbone	X	.	Produits biosourcés	RSB, OK Biobased
ISO 16620 – 2	Détermination de la teneur en carbone biosourcé	X	.	Plastiques	DIN Geprüft,
ISO 16620 – 3	Détermination de la teneur en polymère synthétique biosourcé	X	.	Plastiques	DIN Geprüft,
ISO 16620 – 4	Détermination de la teneur en masse biosourcée	X	.	Plastiques	RSB, DIN Geprüft,
EN 16785 - 1	Détermination de la teneur biosourcée par une analyse au radiocarbone et une analyse élémentaire	X	.	Produits biosourcés	RSB, Biobased % Produit Biosourcé
EN 16785 - 2	Détermination de la teneur biosourcée à l'aide de la méthode basée sur le bilan-matières	.	X	Produits biosourcés	RSB, Produit Biosourcé
ASTM D6866	Standard Test Methods for Determining the Biobased Content of Solid, Liquid, and Gaseous Samples Using Radiocarbon Analysis	X	.	Produits biosourcés (pas d'accès à la norme)	DIN Geprüft, USDA Certified Biobased Product

1.2 BIOMASSE ET BIORAFFINERIE

1.2.1 LA BIOMASSE, POINT D'ENTREE DES BIORAFFINERIES

La production de molécules biosourcées implique l'utilisation de biomasses dont les principales sources sont les suivantes :

- Plantes amylacées (blé, maïs, pomme de terre) et plantes sucrières (betterave, canne)
- Plantes oléagineuses (colza, tournesol, soja)
- Biomasse lignocellulosique (bois, pailles, lin, chanvre...)
- Résineux (pin)
- Plantes contenant des substances actives (huiles essentielles, parfums)
- Algues et microalgues

La conversion de ses biomasses se déroule au sein de **bioraffineries**, qui peuvent être définies, en analogie avec les raffineries de pétrole, comme un « système technologique global défini comme une combinaison de technologies physiques, chimiques et/ou biologiques de déconstruction, séparation et fonctionnalisation visant à transformer de manière durable de la biomasse en produits commerciaux intermédiaires ou finis : les aliments pour l'homme et les animaux, les produits chimiques, les matériaux et l'énergie. » [5].

La vision historique du concept de bioraffinerie inclut une valorisation intégrée de l'ensemble des coproduits de biomasse générés lors des étapes de transformation. La valorisation économique repose donc sur l'ensemble produit-coproduit(s) et la minimisation des déchets.

En France métropolitaine, on distingue quatre grands types de filières industrielles de valorisation de la biomasse agricole/forestière [5] :

- L'amidonnerie, qui développe des molécules variées issues de l'hydrolyse de l'amidon
- Les huileries, qui développent la production de biodiesel et diversifient les débouchés en fabriquant des esters, du glycérol et des dérivés
- La sucrerie, qui transforme la betterave sucrière en sucre, éthanol et molécules biosourcées
- La papeterie (hors du périmètre de cette étude)

Dans une bioraffinerie, l'entrée correspond à de la biomasse (végétale dans le cadre de cette étude), soit sous forme de plante entière, de fractions ou en tant que coproduits, notamment issus de la transformation de la matière première pour l'alimentaire. Les sorties de la bioraffinerie sont des molécules (simples, polymères) ou des assemblages plus ou moins natifs à valeur d'usage, des synthons porteurs de réactivité, ou de produits porteurs d'énergie.

Les bioraffineries peuvent être classées selon la nature de la biomasse entrante, la technologie et les voies de conversion de la biomasse utilisées, ou encore le type de produits ciblés. La classification sur l'origine et le type de biomasse entrante distingue trois générations principales de bioraffineries : première génération (1G), deuxième génération (2G) et troisième génération (3G) (Figure) [238].

Les bioraffineries 1G utilisent différents sucres simples, amidons, huiles végétales et graisses animales comme biomasse pour la production de biocarburants et de molécules. Les bioraffineries 2G ou avancées partent de différentes biomasses de nature lignocellulosique, incluant des co-produits agricoles, des cultures agricoles énergétiques, des co-produits forestiers, ainsi que les fractions lignocellulosiques des déchets industriels ou municipaux. Quant aux bioraffineries 3G, elles reposent sur l'utilisation de biomasses algales. L'opposition entre ces types de bioraffineries repose donc sur le fait que les biomasses utilisées dans les bioraffineries 1G ont une valeur alimentaire et sont propres à la consommation humaine, tandis que les biomasses 2G ne sont pas en concurrence avec des usages alimentaires [238].

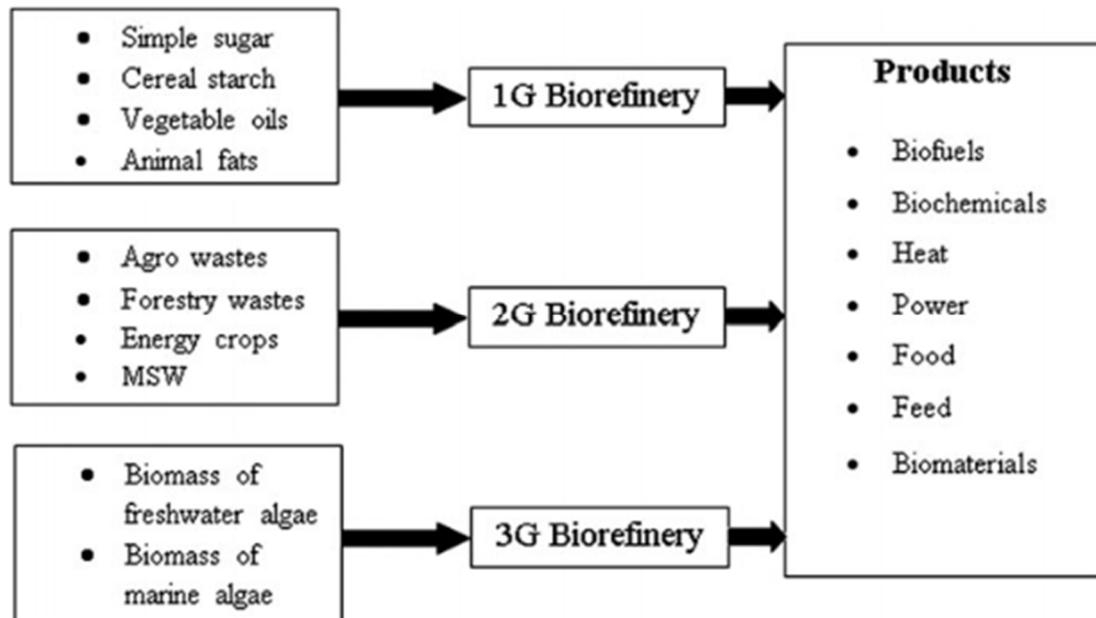


Figure 1 Les trois générations de bioraffinerie, selon la nature de la biomasse entrante [238]

L'équilibre économique de la bioraffinerie dépend généralement de sa capacité à coupler la production de produits à faible marge servant des marchés de volumes importants, avec la production de molécules à forte valeur ajoutée en volumes plus faibles [5]. Par exemple, l'intérêt du couplage alimentaire-non alimentaire est de bénéficier des flux quantitatifs importants de l'alimentaire pour y récupérer les fractions non valorisables, et ainsi valoriser la biomasse de manière intégrée, sans avoir besoin de cultures nouvelles et de mobiliser des surfaces agricoles supplémentaires. La bioraffinerie favorise en ce sens une meilleure efficacité de l'usage des sols.

1.2.2 LES PARTICULARITES DE LA BIOMASSE POUR LA PRODUCTION DE MOLECULES BIOSOURCEES

La biomasse, en particulier la biomasse lignocellulosique, est très différente en composition d'hydrocarbures et de ressources fossiles. Si on représente graphiquement les différentes sources de carbone fossile et renouvelables, en confrontant le ratio atomique H :C en fonction du ratio atomique O :C (Figure), on peut voir immédiatement que la biomasse est beaucoup plus oxygénée, et qu'elle perd ce niveau d'oxygénation au cours de sa lente transformation (millions d'années) par la température et la pression au sein des couches géologiques [247].

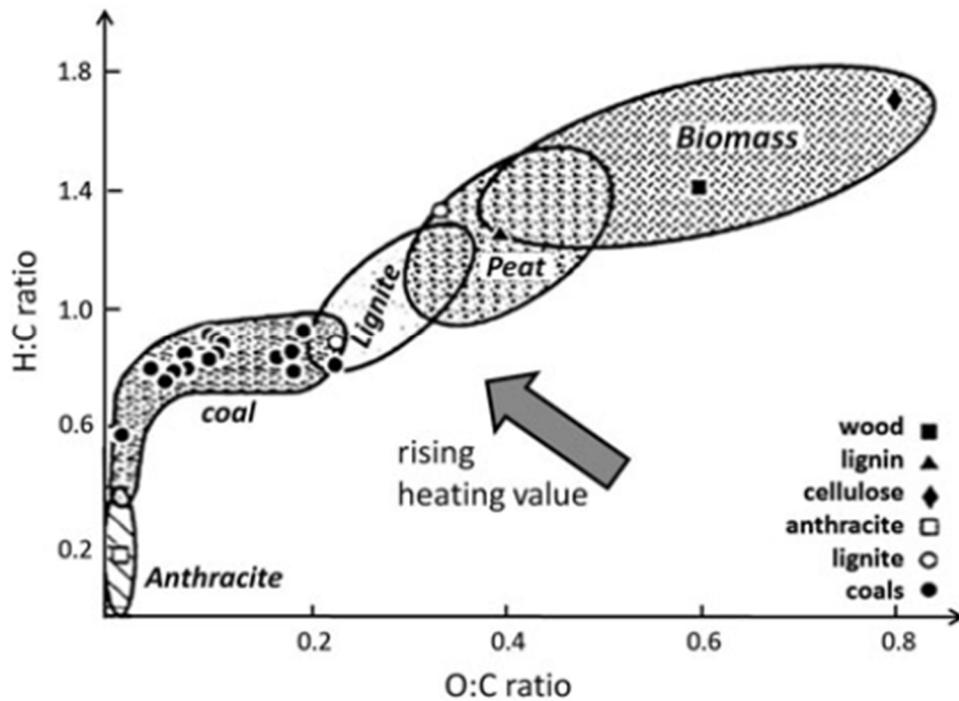


Figure 2 Diagramme de Kravellen illustrant la transformation chimique de la biomasse au cours de sa transformation lente en hydrocarbures au cours du temps [247]

Plusieurs verrous propres à la chimie biosourcée sont encore problématiques :

- 1- La chimie de la biomasse est une chimie de réduction, contrairement à la pétrochimie qui est une chimie d'oxydation. Plus la teneur en oxygène dans la biomasse augmente, plus la valeur ajoutée augmente. A l'inverse, plus on veut enlever de l'oxygène à la biomasse, plus cela coûte cher et moins c'est compétitif : il faut tirer profit des hétéroatomes de la biomasse plutôt de chercher à la simplifier pour revenir à des synthons pétrochimiques
- 2- Les sucres, particulièrement oxydés par rapport aux huiles par exemple (près d'un atome d'oxygène par atome de carbone), ont tendance à polymériser, faire du goudron, et bloquer les catalyseurs. On doit donc diluer davantage pour éviter la formation des goudrons, ce qui fait perdre en productivité par rapport aux procédés pétrochimiques, et implique aussi des consommations d'énergie importantes pour éliminer l'eau.

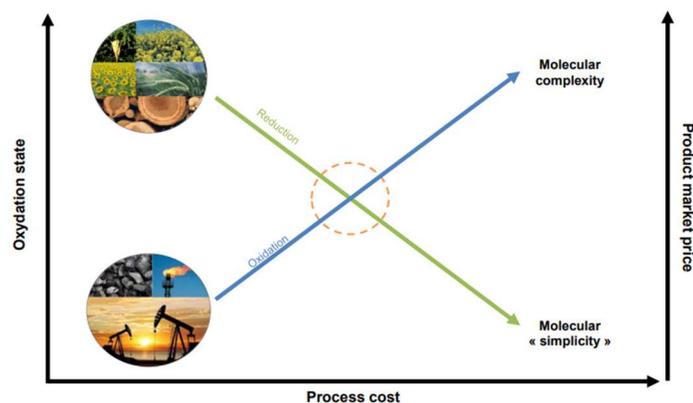


Figure 3 Les différences fondamentales dans la nature chimique des biomasses et des hydrocarbures, et ses conséquences pour la valeur ajoutée des molécules qui en sont issues [250]

1.2.3 ANALOGIE ENTRE RAFFINERIE ET BIORAFFINERIE

Les *bioraffineries* sont nommées par analogie aux raffineries de la pétrochimie, spécialisées dans la transformation d'une matière première pétrosourcée ensuite « craquée » en produits dérivés.

A l'image des raffineries pétrolières, les bioraffineries :

- Génèrent un mix de produits issus du fractionnement de la biomasse, dont il s'agit d'optimiser la valorisation globale
- S'adaptent à la variabilité de la composition de la matière première entrante
- Disposent d'une capacité d'adaptation du mix produits en sortie, selon la demande des marchés.

A l'inverse, l'utilisation de biomasse pose un certain nombre de défis et les technologies-procédés des bioraffineries sont globalement moins matures que ceux de l'industrie pétrochimique. Des avancées technologiques seront nécessaires pour que les bioraffineries parviennent à atteindre le même niveau de « cracking », de valorisation intégrée de l'ensemble des fractions de la matière première de départ que les raffineries de pétrole ou de gaz de schiste.

Encadré : le fonctionnement des raffineries

Deux grandes voies pétrochimiques permettent de former les intermédiaires pétrosourcés utilisés en chimie (oléfiniques et BTX). Les charges qui alimentent ces voies viennent de deux sources :

- Le raffinage, qui produit la majorité du naphta et du naphta léger, à partir de pétrole brut (conventionnel)
- Le NGL (gaz naturel liquéfié) : pour faire de l'éthane et du MPG (gaz naturel). Les unités exploitent en particulier le gaz de schiste.

› La voie oléfine ou « steam cracker » (vapocraquage)

Elle produit les oléfines à partir des coupes légères du naphta, de l'éthane et du Gaz de Pétrole Liquéfiés (GPL). Les *steam cracker* sont des systèmes très complexes. Ils produisent majoritairement du propylène et de l'éthylène. Ils peuvent accueillir des charges très lourdes et très légères. Le développement du gaz de schiste conduit au développement de gros craqueurs sur des charges très légères (méthane, éthane). Les rendements en sortie d'unité sont conditionnés par la charge en entrée : un éthane steam cracker va surtout sortir de l'éthylène, tandis qu'un naphta steam cracker va sortir de l'éthylène, un peu d'aromatiques, de l'éthane, du propylène. Le produit phare des steam cracker en fin de chaîne est le polyéthylène, qui tire la demande.

› La voie aromatique

Cette voie part du naphta lourd pour produire principalement des Benzène Toluène Xylènes (BTX), et en particulier le p-xylène, utilisé pour fabriquer le PET. Trois voies sont principalement utilisées : le reforming (70%), la voie utilisant de l'huile de pyrolyse, et celle qui utilise des sous-produits de l'industrie sidérurgique.

› La voie « crude to chemicals »

Une troisième voie, qualifiée de « crude-to-chemicals », est une raffinerie qui part de pétrole brut et qui est construite de manière à maximiser les rendements de production d'oléfiniques ou d'aromatiques. Cette voie transforme toutes les fractions du pétrole brut (crude) pour envoyer ensuite les coupes vers le complexe oléfine ou aromatique [248]. L'enjeu principal est d'accroître

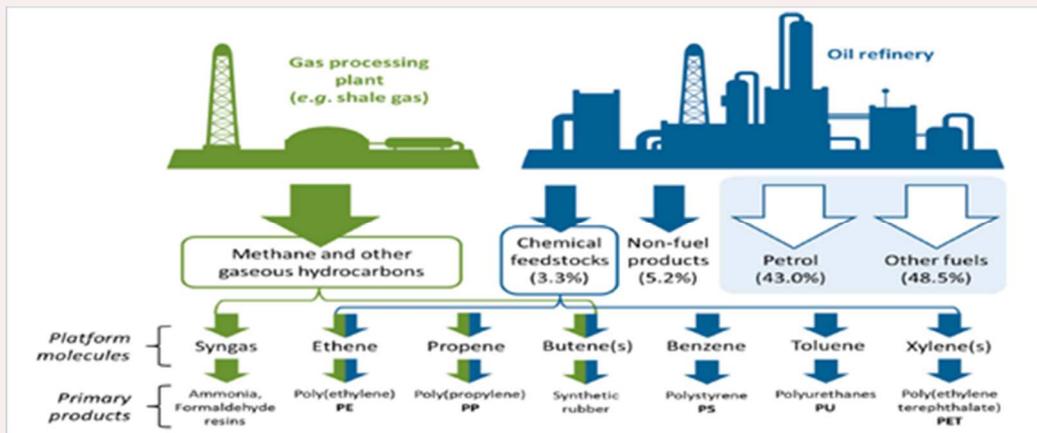


Figure 4 Flux d'intermédiaires chimiques et de polymères sortant des raffineries de pétrole conventionnel et de gaz de schiste [269]

l'agilité des raffineries et de s'adapter aux variations de la demande en détournant une partie des flux d'hydrocarbures brut destinés à la production de fractions lourdes (carburants) vers la production de composés pétrochimiques.

1.3 LES DIFFÉRENTES BIORAFFINERIES

1.3.1 TRANSFORMATION DE LA BIOMASSE AU SEIN DES BIORAFFINERIES

Toute bioraffinerie comporte trois groupes d'opérations unitaires successives [5] :

- La déconstruction ou fractionnement de la biomasse, permettant de déconstruire la ressource en ses composants élémentaires et réduire la variabilité de la biomasse
- La séparation, permettant de trier les entités constitutives d'un mélange. La liste des technologies mobilisables est longue (technologies de décantation, centrifugation, cristallisation, solvants alternatifs, technologies membranaires, liquides ioniques...) et le choix dépend des niveaux de pureté requis, de la nature des structures moléculaires à préserver, et du niveau de performance environnemental à atteindre.
- La fonctionnalisation, permettant de modifier une molécule ou un assemblage pour lui conférer des propriétés à valeur d'usage ou réactionnelles. Il y a trois voies principales de fonctionnalisation : l'introduction de groupements chimiques, la création ou la modification d'assemblages de molécules, et la création de nouvelles structures.

Les technologies de transformation de la matière peuvent être classées en deux ensembles selon leur effet sur la matière : les mécanismes physiques, et les mécanismes chimiques/biotechnologiques.

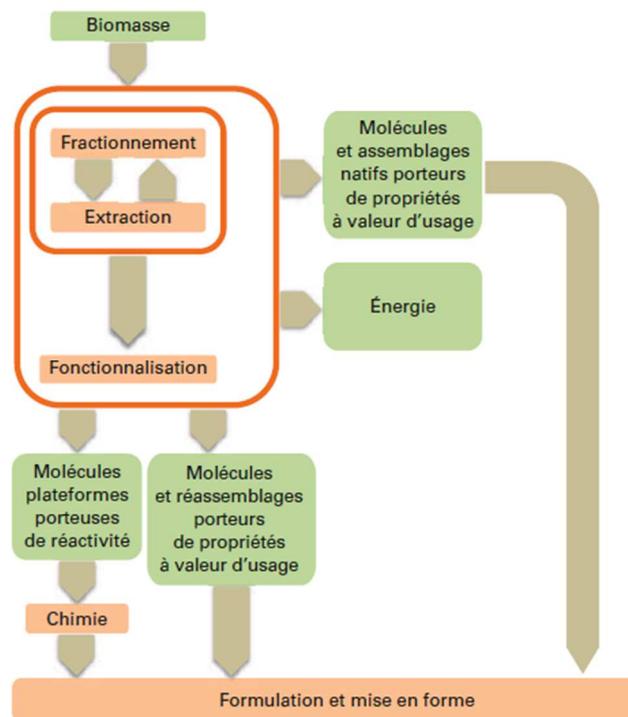


Figure 5 Représentation schématique du fonctionnement d'une bioraffinerie [5]

1.3.2 PANORAMA DES BIORAFFINERIES ET NOTION DE PLATEFORME

Au sein des différentes bioraffineries, les biomasses sont fractionnées en un certain nombre d'intermédiaires clés. Ces intermédiaires, qui ne sont pas nécessairement des composés bien définis mais souvent des mélanges de pureté variable, servent ensuite de plateforme et sont à leur tour transformés et convertis en des produits chimiques finis commercialisables. On distingue ainsi quatre grands types de plateformes de production, correspondant à des types différents de biomasses en entrée, et donc à un type de chimie particulier [25]. Ces plateformes sont les suivantes [237] :

- « Oil platform » : dans les huileries (bioraffineries des corps gras), faisant appel à une chimie spécifique des corps gras, appelée oléochimie
- « Sugar platform » : dans les sucreries et amidonneries, ainsi que dans les bioraffineries lignocellulosiques, faisant appel à une chimie des sucres
- « Syngas platform » : dans les bioraffineries utilisant des déchets organiques qui sont fermentés en anaérobie
- Les bioraffineries lignocellulosiques utilisant des co-produits agricoles ou de bois, développent des procédés thermochimiques de conversion des composants du bois (lignine, cellulose, hémicellulose), en syngaz ainsi qu'en sucres simples qui peuvent ensuite rentrer dans la « sugar platform ».

Plusieurs biomasses peuvent donc mener à la même plateforme, et une même bioraffinerie peut de fait inclure plusieurs plateformes (Figure 6).

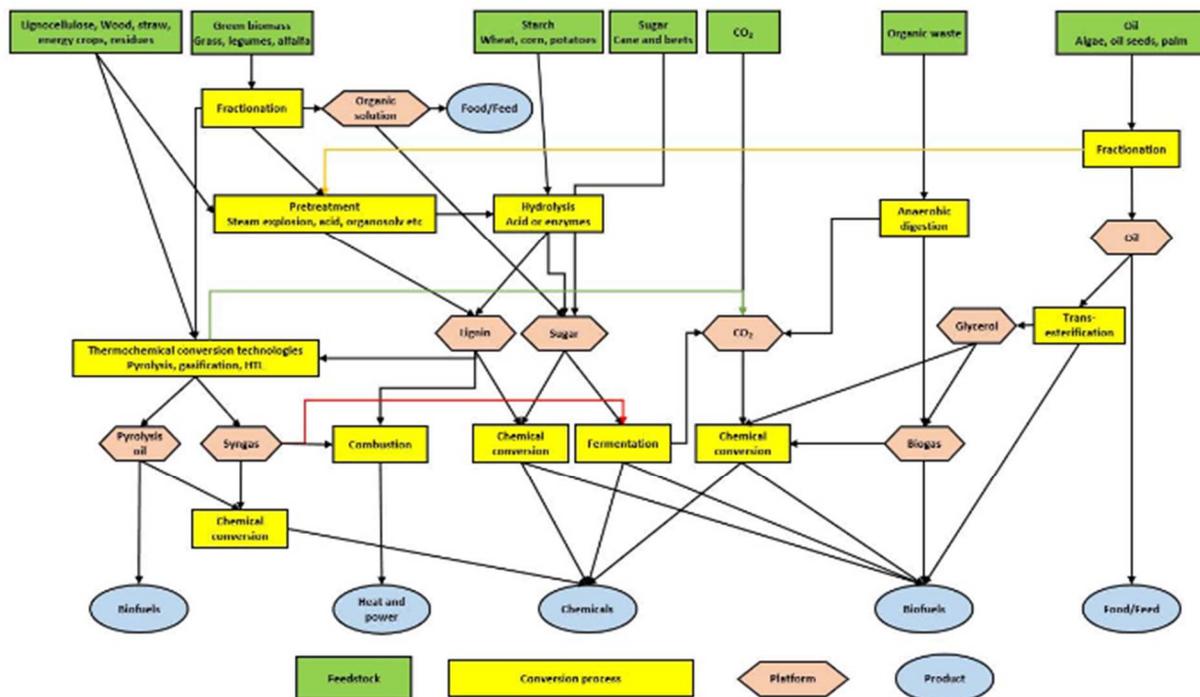


Figure 6 Technologies de conversion de la biomasse et classification des bioraffineries [25]

1.3.3 LES DIFFÉRENTES BIORAFFINERIES

- **La plateforme « sucre » [25]**

C'est actuellement la principale plateforme en termes de volumes pour la production de molécules biosourcées. Les sucres (glucides) sont à la base d'un large ensemble de procédés dans les bioraffineries et sont valorisés dans des filières industrielles bien établies.

Les procédés traditionnels sont basés sur l'utilisation du saccharose, issu des cultures sucrières (betterave, canne à sucre), et du glucose, issu de l'hydrolyse de l'amidon de céréales (maïs, blé). En parallèle, cette plateforme « sucre » est aussi développée dans les bioraffineries dites avancées, utilisant des biomasses lignocellulosiques non alimentaires comme intrants de départ. Dans ce cas, la biomasse subit un premier pré-traitement suivi d'une hydrolyse enzymatique des polysaccharides de paroi végétale (cellulose, hémicelluloses) pour libérer les sucres simples.

Le glucose ou autres sucres libres obtenus sont ensuite des précurseurs pour la synthèse d'un large ensemble d'intermédiaires chimiques et de molécules à propriétés d'usage. Deux approches principales sont utilisées pour cela :

- › La fermentation : utilisation du glucose comme substrat de fermentation par des microorganismes, donnant accès à une variété d'intermédiaires chimiques (alcools, acides organiques, lipides et hydrocarbures), mais aussi à des produits à haute valeur ajoutée (acides aminés, vitamines, antibiotiques, enzymes...).
- › La chimie des sucres : Conversion catalytique des sucres en intermédiaires chimiques d'intérêt. Les sucres peuvent subir des réactions sélectives de déshydratation, hydrogénation, et oxydation pour donner des produits d'intérêt comme des polyols (sorbitol, xylitol), le furfural, et l'hydroxyméthylfurfural, le monoéthylène glycol ou l'acide lévulinique.

- **La plateforme « huile » [25]**

Cette plateforme convertit les biomasses oléo-protéagineuses riches en acides gras et triglycérides. L'industrie oléochimique est un fournisseur majeur de produits biosourcés tels que des savons, des lubrifiants, des tensioactifs ou des émulsifiants.

L'oléochimie s'est développée à la fin du XIXème siècle à partir d'huile de palme, en remplacement partiel de la matière grasse d'origine animale (suif). La présence dans l'huile de palme de chaînes grasses insaturées en a fait une matière de choix pour différentes modifications et fonctionnalisations chimiques. De même, vers le milieu du XXème siècle, l'huile de ricin a ouvert la voie à des développements chimiques d'intérêt. Progressivement, l'oléochimie est devenue une chimie complexe avec de très nombreux débouchés [262].

En proportion, à échelle mondiale, environ 80% des huiles végétales qui rentrent dans les huileries sont destinées à l'alimentation, et les 20% restants servent les applications non alimentaires. Parmi ces dernières, la production de biocarburants (biodiesel) se développe, avec un intérêt croissant au cours des dernières années pour la production d'huiles végétales hydrogénées (Hydrotreated vegetal oil ou HVO, plus de détails paragraphe 5.4 page 101).

En tant que précurseur chimique, les triglycérides, constituants majeurs des oléagineux, sont soit clivés en glycérol et acides gras, soit convertis en esters par transesterification.

Focus sur les procédés dans le secteur de l'oléochimie

L'oléochimie est une technologie ancienne de production de produits chimiques à partir d'huiles végétales qui remonte à l'antiquité avec la production de savon. Elle utilise des approches de transformation similaires à la pétrochimie, du fait de la similitude de composition chimique (chaînes hydrocarbonées peu oxygénées), contrairement à la chimie des sucres. A titre d'exemple, la chimie des esters s'est fortement développée dans les années 1950-1960, et les procédés ont peu évolué depuis.

Les principaux produits de l'oléochimie sont des acides gras, des esters, des alcools gras et du glycérol. Ils sont obtenus par des procédés assez conventionnels d'hydrolyse, d'estérification, de transestérification et d'intraestérification. Ces procédés relèvent la plupart du temps de la chimie catalytique mais peuvent nécessiter l'utilisation d'enzymes (ex : lipase pour l'interestérification).

La production des produits oléochimiques se caractérise par des CAPEX (tours spéciales, chaudières industrielles à haut rendement, systèmes de contrôle complexes) et des OPEX (carburants, vapeur, électricité) très élevés [258]. Les produits de l'oléochimie, et notamment le glycérol, peuvent connaître des fluctuations de prix du fait de la conjoncture économique et politique pouvant impacter leurs débouchés et les marchés visés (carburant vs. industrie chimique). Cependant, cela n'a pas de conséquences sur les procédés de transformation si ce n'est des échelles de production différentes, et supérieures pour le biodiésel.

Contrairement à la chimie des sucres et notamment à la fermentation, les industriels de l'oléochimie ont peu fait état d'avancées majeures depuis les années 2010. Ils sont cependant à l'affût d'éventuelles évolutions réglementaires, notamment en amont de la production d'huiles végétales qui utilise des extractions avec des solvants susceptibles d'être interdits comme l'hexane. Il est envisageable de penser que ces évolutions pourront impacter les procédés aval qui devront être adaptés.

L'emploi des biotechnologies se développe dans le secteur de l'oléochimie. De nombreuses études ont notamment été réalisées depuis une vingtaine d'années pour évaluer l'intérêt d'utiliser des procédés enzymatiques dans l'industrie oléochimique pour réduire l'empreinte environnementale de cette industrie et améliorer sa compétitivité économique (réduction des OPEX et des déchets/co-produits). Les bénéfices économiques du remplacement des méthodes chimiques par des méthodes enzymatiques dans l'industrie oléochimique restent à démontrer, en raison notamment du coût élevé des biocatalyseurs, de leur stabilité dans les procédés et de leur productivité. L'immobilisation des enzymes peut être un levier important à actionner à cette fin.

Les projets européens LIPES et INCITE coordonnés par Oleon montrent le fort intérêt des industriels des corps gras pour le développement de procédés d'estérification et de transestérification enzymatiques alternatifs pour les marchés de commodité et de chimie de spécialité. Les impacts attendus de ces procédés sont l'amélioration de la productivité, du rendement et de la pureté des produits obtenus, la simplification des étapes de DSP en aval, la réduction de l'impact énergétique et environnemental, et l'amélioration de la sécurité des esters pour la santé du consommateur. Ces projets sont toutefois encore à des stades de maturité assez faibles (pilote, démo) [260] [261]. Il est à noter que la famille des lipases est quant à elle utilisée depuis plusieurs décennies dans l'alimentaire pour l'hydrolyse des triglycérides afin de permettre l'interestérification.

Malgré les progrès importants de la biologie de synthèse au cours des dernières décennies, et alors que de nombreuses start-up et groupes industriels travaillent pour développer des projets de production industriels de biomolécules, à partir de preuves de concept au laboratoire, des préoccupations et des doutes émergent au sein de l'écosystème de l'innovation et de la communauté scientifique, sur la capacité réelle de la fermentation à atteindre un niveau d'efficacité, de compétitivité et de fiabilité similaires aux procédés pétrochimiques qu'elle ambitionne de remplacer.

- **La plateforme « lignine » [25]**

La plupart de la lignine sur le marché est un co-produit de l'industrie papetière, sous la forme de lignosulfonates et de lignine kraft. Plus de 95% de cette lignine est encore utilisée en interne dans les bioraffineries papetières pour la production d'énergie. Néanmoins, de nouvelles technologies émergent pour rendre disponible la lignine kraft pour de nouvelles applications comme la production de molécules, de résines et de polymères. Etant donné que la lignine est extraite des biomasses lignocellulosiques en parallèle de sucres, les plateformes lignine et sucres sont intimement liées. Ainsi, un des drivers au développement de la production de dérivés de lignine réside dans la capacité à rendre viable économiquement les bioraffineries lignocellulosiques conduisant à la production de bioéthanol à partir du glucose.

La production de composés à plus haute valeur ajoutée à partir de lignine, comme des aromatiques, des composites et des polymères est perçue comme une opportunité de plus long terme. Le développement de procédés performants et économiquement compétitifs de dépolymérisation catalytique et de conversion de la lignine reste un verrou important à leur développement.

- **La plateforme « huile de pyrolyse » [25]**

Cette plateforme s'applique principalement à des biomasses lignocellulosiques de type co-produits agricoles, forestiers et biodéchets.

La pyrolyse est un procédé thermo-chimique de chauffage de la biomasse en l'absence d'oxygène à des températures élevées (>700°C). L'objectif de la pyrolyse est de dépolymériser la biomasse pour générer comme produit intermédiaire principal une huile de pyrolyse, ainsi que du biochar et du syngaz. Le spectre de produits obtenus dépend de la température du procédé, de la pression et du temps de résidence. L'huile de pyrolyse brute peut être utilisée telle-quelle pour générer de l'énergie mais elle peut aussi entrer dans des voies de conversion via des procédés catalytiques pour produire des composés à plus haute valeur ajoutée. Cette plateforme conduit notamment à la production d'aromatiques (BTX : benzène, toluène, xylène), ainsi que différents acides carboxyliques et des furanes.

L'avantage principal des bioraffineries fondées sur la pyrolyse repose sur la capacité à développer la production à petite échelle et de manière décentralisée d'huile de pyrolyse dans des régions où la biomasse est abondante et facilement accessible. Ensuite, l'huile de pyrolyse est collectée dans des bioraffineries centralisées pour être valorisée et convertie en produits finis et semi-finis.

La plateforme « syngaz » [25]

Le syngaz est un mélange de CO, H₂, CH₄, CO₂ et N₂. Il est produit en chauffant de la biomasse, principalement lignocellulosique ou issue de biodéchets, à des température extrêmes (800-1500°C) en présence d'oxygène par un procédé qualifié de gazéification.

Le syngaz produit peut être utilisé pour la production d'énergie, mais peut aussi, après épuration, être converti par catalyse thermo-chimique, en alcools (méthanol, éthanol), en carburants (diesel Fischer-Tropsch) et en produits chimiques. Enfin, le syngaz peut aussi être utilisé comme substrat pour des procédés de fermentation microbienne pour produire des alcools et d'autres synthons comme de l'acide acétique par exemple.

- **La plateforme CO₂ (biogénique) [25]**

Les projets de capture de CO₂ se développent activement et font l'objet d'investissements importants. En particulier, il est possible d'imaginer la production de molécules biosourcées à partir de CO₂ biogénique issu de procédés de fermentation. Ces projets sont pour l'instant à des stades de maturité assez faibles, mais suscitent des espoirs importants, notamment pour la production d'intermédiaires comme le méthanol.

1.3.4 LE CAS PARTICULIER DES BIOTECHNOLOGIES INDUSTRIELLES POUR LA PRODUCTION DE MOLECULES BIOSOURCEES

- **Depuis des millénaires : la fermentation alimentaire**

L'Homme utilise depuis des millénaires des micro-organismes pour transformer une matière première périssable (lait, raisin, céréales...) en aliments facilement transportables et conservables (fromages, vins, pains...). La pratique, empirique, consistait à utiliser les populations microbiennes naturellement présentes dans l'environnement et à laisser la fermentation se dérouler.

Grâce aux travaux de Louis Pasteur, la fermentation a été expliquée. Il s'agit d'une réaction biochimique qui a lieu sous l'action de microorganismes (INRAe). La fermentation modifie et développe les caractéristiques d'un aliment comme son arôme, son taux d'acidité, sa texture, son aspect extérieur, sa conservation. Au fil des siècles, par ces pratiques, l'Homme a favorisé la sélection de certains ferments. Au XXe siècle, la production de ferments s'est développée, permettant de mieux maîtriser les procédés de fabrication. Les ferments utilisés sont issus de sélections de souches de bactéries, moisissures et levures d'aliments auparavant fermentés empiriquement. Telle est la fermentation traditionnelle.

Aujourd'hui, plusieurs procédés utilisent toujours des fermentations assez simples orientées par un contrôle des conditions du milieu. C'est le cas des procédés de méthanisation par exemple. Il est ainsi possible d'utiliser des souches naturelles présentant des propriétés spécifiques dans des procédés.

- **Depuis près de 50 ans : les biotechnologies**

La fermentation et la biocatalyse enzymatique sont utilisés depuis le XXème siècle pour la production de molécules biosourcées, à partir de substrats de fermentation variés : sucres simples (glucose, saccharose, lactose), glycérine végétale, biomasses complexes lignocellulosiques... On parle dans ce cadre de **biotechnologies industrielles** ou **biotechnologies blanches** pour qualifier le segment des biotechnologies appliqué à la production de molécules biosourcées à des fins industrielles, pour servir des marchés applicatifs multiples comme la chimie, l'alimentaire, les matériaux ou les bioénergies.

Dans les années 1970, les connaissances du métabolisme des cellules vivantes, de la biologie moléculaire et de la génétique cellulaire vont permettre d'utiliser les micro-organismes comme des « usines cellulaires » capables de produire des composés d'intérêt : des médicaments, des composés pour la chimie fine et des filières agricole et alimentaire (acides aminés, enzymes, vitamines...). Le concept d'usine cellulaire s'est ainsi développé, et certains micro-organismes modèles comme *E.coli* ou la levure *S.cerevisiae* sont devenus de véritables plateformes microbiennes. Ces productions se déroulent en milieu confiné dans des fermenteurs. Le composé d'intérêt est obtenu après des étapes d'extraction et de purification.

Les progrès en biologie moléculaire et en génie génétique ont permis de surexprimer des gènes chez des micro-organismes découplant ainsi le potentiel d'une espèce microbienne en transplantant dans son génome une nouvelle voie métabolique pour la faire produire un composé d'intérêt. Ainsi au début des années 1980, le premier médicament ainsi produit, l'insuline, a été commercialisé.

Les technologies fermentaires continuent d'évoluer et de se perfectionner, ce qui a contribué à significativement augmenter les rendements de fermentation et de purification en sortie de fermenteurs, à recourir à des milieux plus concentrés et simplifier les procédés de purification. Toutefois, les changements d'échelle restent très longs, fastidieux et coûteux.

- **Les progrès récents [5] [246]**

Les méthodes modernes de criblage à haut-débit permettent ainsi d'utiliser des robots pour analyser et sonder des « bibliothèques » entières de souches microbiennes, en recourant à la micro fluidique afin de sélectionner celles qui présentent les caractéristiques les plus intéressantes pour la synthèse de la molécule d'intérêt.

L'essor de la bioinformatique, de l'intelligence artificielle (machine learning) et de la modélisation des réseaux métaboliques donnent aujourd'hui accès à de nouvelles perspectives rendant l'ingénierie de souches microbiennes pour optimiser la production de biomolécules possible à assez grande échelle. La mise en œuvre de l'ingénierie métabolique s'appuie largement sur les outils de la génomique, de la protéomique, de la modélisation et de l'édition du génome. Dans le domaine de l'amélioration des plantes, l'INRAe a publié en 2021 sa stratégie en matière d'édition du génome végétal (source INRAe : <https://www.inrae.infrawan.fr/actualites/strategie-dinrae-matiere-dutilisation-technologies-dedition-du-genome-vegetal>)

Tous ces progrès sont résumés dans la Figure ci-dessous.

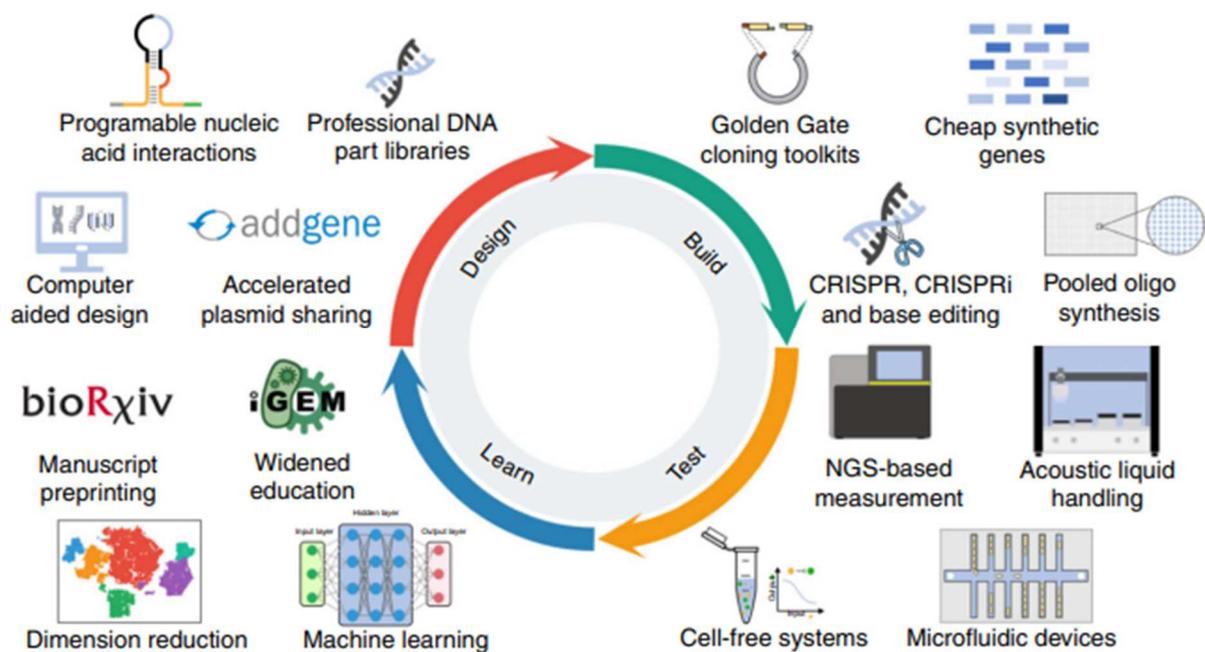


Figure 7 Les nouvelles technologies clés ayant accéléré les cycles de design-construction-apprentissage de la biologie de synthèse au cours de la dernière décennie [246]

- Cette nouvelle façon d'étudier le vivant est appelée « **biologie de synthèse** ». Le comité d'éthique pour la recherche agronomique commun au CIRAD et à l'INRAe a souligné dès 2013 que la diversité de ce nouveau champ de recherches soulève la question de sa définition. Ce comité a retenu la définition suivante : « la conception rationnelle (design) et la construction de nouveaux composants, dispositifs et systèmes biologiques pourvus de fonctionnalités prédictibles et fiables qui n'existent pas dans la nature, et la réingénierie (re-design) de systèmes biologiques existant naturellement, à des fins de recherche fondamentale et d'applications » (source : <https://www.inrae.infrawan.fr/sites/default/files/pdf/5e-avis-du-comite-d-ethique-inra-cirad-36-pages.pdf>). Elle se caractérise par deux aspects : la nouveauté peut porter sur le mode d'assemblage de systèmes existants et/ou sur le composant qui n'existe pas dans la nature.
- **L'intégration des biotechnologies industrielles dans la chaîne de valeur des bioraffineries**

Initialement, le modèle des start-ups de biotechnologies industrielles consiste souvent à développer un procédé pour répondre à un verrou technologique pour la production d'une molécule par voie

fermentaire. La proposition de valeur des biotechnologies réside donc en partie dans sa capacité à rentrer dans la chaîne de valeur de la bioraffinerie.

On peut donc considérer les biotechnologies industrielles comme une brique technologique parmi d'autres (procédés physico-chimiques, chimiques ou thermochimiques), permettant la conversion de biomasses en molécules pour des marchés applicatifs et des applications diverses. Les procédés biotechnologiques fournissent donc un support à différentes étapes dans la chaîne de valeur intégrée de la bioraffinerie [244].

Dans cette chaîne de valeur, les biotechnologies peuvent intervenir dès le premier maillon de la chaîne de valeur, c'est-à-dire dès les méthodes de production de biomasse et de plantes cultivées. En effet, les groupes semenciers ont recours à des technologies de biologie moléculaire et de génie génétique pour améliorer les semences, et utilisent pour cela des produits des biotechnologies comme des enzymes ou des nucléotides. Ensuite, la production agricole au champ nécessite l'utilisation de solutions pour prévenir le développement de maladies et favoriser la croissance des plantes. A ce stade encore, les biotechnologies interviennent puisque les acteurs tendent de plus en plus à utiliser des biointrants (fertilisants, produits de biocontrôle et biostimulants). Une partie de ces produits sont là encore produits par des procédés fermentaires ou de chimie du végétal.

Les biotechnologies industrielles reviennent ensuite lors de la phase de pré-traitement de la biomasse. En effet, les biomasses ligno-cellulosiques complexes doivent être pré-traitées afin d'en extraire les sucres et autres fractions fermentescibles pour un procédé biotechnologique en aval. Il existe classiquement deux grands types de traitement de la biomasse : les traitements thermochimiques par pyrolyse, et l'hydrolyse de la lignocellulose par des acides minéraux ou des cocktails enzymatiques. Les enzymes lignocellulolytiques constituent une approche intéressante, et des chaînes de valeur autour de la production par procédés biotechnologiques d'enzymes dédiées se structurent actuellement. Une autre option prometteuse est le « bio-processing consolidé », dans lequel un même micro-organisme modifié ou non assurerait à la fois le pré-traitement de la biomasse lignocellulosique, puis la production à partir des sucres fermentescibles produits de biomolécules (synthons, bioplastiques...).

Ensuite, des procédés de conversion permettent de transformer les sucres ou substrats en molécules d'intérêt industriel. Pour cela, il est possible d'utiliser des procédés thermochimiques, qui sont assez peu employés car ils nécessitent un fort apport énergétique et sont rarement rentables. Les procédés de conversion utilisant la chimie catalytique et les conversions biotechnologiques par des enzymes ou des micro-organismes connaissent un intérêt croissant.

2. ENJEUX POUR LE DEVELOPPEMENT DE LA CHIMIE BIOSOURCEE

La chimie du végétal et les biotechnologies industrielles constituent un levier pour répondre à plusieurs enjeux stratégiques pour la France et la transition du secteur de la chimie. Il convient de les rappeler avant d'entrer dans l'analyse des flux de biomasse pour la production de molécules biosourcées. Ces enjeux influencent en effet la nature, la taille et le développement des flux considérés dans le cadre de cette étude.

2.1 AMELIORATION DE LA SOUVERAINETE DES APPROVISIONNEMENTS INDUSTRIELS

En utilisant une ressource potentiellement disponible sur le territoire, la chimie du végétal et les biotechnologies industrielles peuvent contribuer à la souveraineté des approvisionnements de la France, en permettant notamment de diminuer les niveaux d'importation de produits pétroliers ou fossiles, matières premières des premiers maillons de la chaîne de valeur de la chimie. Elles peuvent également contribuer à la souveraineté de produits définis comme d'importance vitale 1 par le Haut-Commissariat au Plan :

- Secteur pharmaceutique : fourniture de matières premières ou précurseurs chimiques pour la production de molécules actives ou d'excipients
- Secteur agroalimentaire : production d'intrants (engrais, produits phytosanitaires)

Par ailleurs, la chimie du végétal et les biotechnologies industrielles pourraient contribuer à la souveraineté de secteurs jugés stratégiques, du fait de leur poids économique en France (cosmétique, construction automobile, aéronautique, etc.). Plus généralement, la chimie fournit un très grand nombre de secteurs industriels. La souveraineté de ces filières est difficile à envisager, tant les chaînes logistiques sont complexes et morcelées au niveau mondial. Le développement d'une chimie biosourcée grâce à une matière première disponible localement permettrait de s'affranchir en partie de cette complexité en produisant directement les molécules d'intérêt sur le territoire. Il est ensuite nécessaire de disposer des capacités de transformation pour produire les dérivés afin de desservir l'ensemble des marchés applicatifs.

2.2 REPONSE AUX BESOINS EN MATIERES PREMIERES DU SECTEUR DE LA CHIMIE

Les besoins de la chimie sont actuellement majoritairement pourvus par des matières premières pétrosourcées. Dans un contexte de réduction tendancielle de la ressource en matières premières pétrosourcées et d'exigence de diminution du recours à ces matières pour des raisons climatiques, il existe un fort enjeu de croissance de la substitution au moins partielle de la ressource en carbone pétrosourcée par de la biomasse.

- **Les produits de la pétrochimie**

L'ensemble de la chimie organique repose sur la production de 7 grands intermédiaires [248] :

- **Les intermédiaires oléfiniques : éthylène, propylène et butylène**, qui proviennent du pétrole brut
- **Les aromatiques BTX (benzène, toluène, p-xylène)**, provenant du pétrole brut également

- **Le méthanol**, qui provient du gaz et, dans une moindre mesure, du charbon
- **L'ammoniac**, qui provient du gaz et du charbon

Le marché de la chimie organique est de l'ordre d'un milliard de tonnes de produits chimiques, réparti globalement de la manière suivante :

- 40% de **polymères** (420 millions de tonnes/an)
- 30% d'**engrais** (à partir d'ammoniac, dont la moitié est transformé en urée) (200 millions de tonnes/an)
- 30% pour les **autres produits** (250 millions de tonnes/an)

- **Tendances sur le marché de la pétrochimie**

En 2022, la demande mondiale en pétrole est revenue à celle de 2019, avant COVID. La demande en pétrole pour la chimie est dirigée par le besoin marché en naphta et en éthane.

Axens [248] prévoit une augmentation de la demande en intermédiaires et en oléfines au cours des 5-10 prochaines années (CAGR 0,9%), malgré les pressions environnementales croissantes. Le taux de croissance de la demande devrait s'infléchir légèrement mais il reste relativement important.

En particulier, sur la période 2019-2026 :

- › La demande en gazole va être réduite
- › La demande en diesel va augmenter
- › La demande en éthane, LPG et naphta va augmenter
- › La demande en matières premières pour la pétrochimie va connaître la plus forte croissance : 70% de la demande en pétrole

On constate aussi une augmentation constante de la demande en plastique, malgré le développement de filières de recyclage mécanique et chimique [248].

Les mutations de la pétrochimie mondiale impactent le secteur de la chimie qui représente un de leurs clients importants. En effet, les investissements croissants en Amérique du Nord visant à utiliser les coproduits de l'extraction du **gaz de schiste** pour faire face au **déclin du pétrole conventionnel** depuis que le **pic pétrolier a été atteint en 2008**, ont conduit à des modifications majeures dans l'industrie pétrochimique. Si la valorisation des coproduits de l'extraction du gaz de schiste (éthane) au lieu du naphta issu du pétrole a conduit à une baisse de prix de l'éthylène en Amérique du Nord, elle a conduit également à certaines pénuries pour des molécules qui ne peuvent pas être produites à partir de ces coproduits (molécule avec trois ou quatre carbones ou molécules aromatiques) : **les prix des C3-C4 pétrosourcés ont fortement augmenté en conséquence**. Il s'agit d'une évolution majeure qui représente une opportunité pour les molécules biosourcées. Ces évolutions de la pétrochimie mondiale sont déterminantes pour l'émergence de certaines molécules (molécules aromatiques, molécule en C3/C4 comme l'isobutène, le butadiène) [127][130].

Par ailleurs, à terme, l'électrification du transport automobile léger et les changements d'habitude de mobilité (mobilité douce, covoiturage), nécessaires dans une économie décarbonée et sobre en carbone, vont impacter la demande en essence et remettre en cause le **modèle économique de la raffinerie de pétrole**. En effet, l'ensemble des différentes fractions d'un baril de pétrole doit être valorisé pour rentabiliser le coût de l'extraction et permettre à l'ensemble des valorisations d'être compétitives. Une réduction de la demande en essence risque d'entamer fortement la compétitivité de la chimie pétrosourcée et nécessitera de développer des alternatives plus économiques.

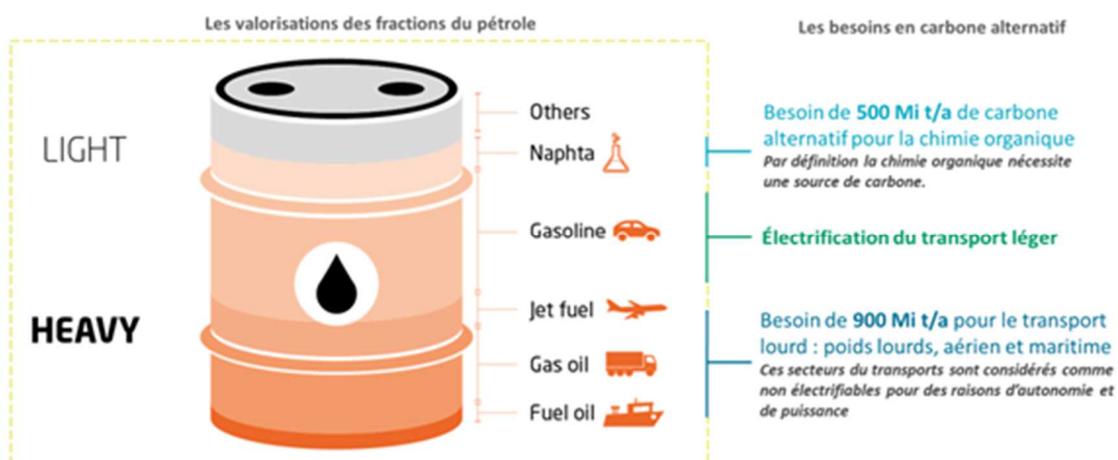


Figure 8 Les valorisations des différentes fractions lourdes et légères du pétrole

Les groupes pétroliers s'adaptent à ces nouveaux drivers, notamment en développant des approches « *crude to chemicals* » (défini dans le paragraphe 1.2.5), qui permet d'envoyer une partie du pétrole brut vers la voie oléfine ou aromatique pour alimenter les plateformes pétrochimiques en synthons à l'origine de la synthèse de polymères, plastiques, fibres synthétiques et autres intermédiaires chimiques dont la demande, contrairement à celle des carburants, continuera d'augmenter [277].

2.3 VALORISATION DES SPECIFICITES DE LA BIOMASSE

La biomasse présente des spécificités d'ordre chimique en comparaison des matières premières pétrosourcées, à commencer par son **niveau d'oxydation accentué des carbones**. Les **différences chimiques intrinsèques** sont un facteur influençant la compétitivité de la biomasse en comparaison aux matières premières pétrosourcées.

Pour le comprendre, il convient de rappeler que trois approches complémentaires sont possibles en chimie du végétal [249] :

- **La reproduction à l'identique de molécules d'origine pétrochimique - l'approche dite « drop-in ».** Ce sont des versions biosourcées de produits pétrochimiques existants. Ils sont chimiquement équivalents aux produits pétrosourcés qu'ils remplacent et permettent donc de réduire les risques industriels et de faciliter l'accès au marché, car ils s'intègrent dans des chaînes de valeur existantes. La pénétration des molécules biosourcées drop in sur le marché est principalement limitée par la compétitivité de coût par rapport à leurs équivalents pétrosourcés.
- **La synthèse de nouvelles molécules pouvant être originales mais qui présentent des fonctionnalités ou des usages similaires aux molécules pétrochimiques**
- **Les nouvelles molécules.** Comme leur nom l'indique, ce ne sont pas des substituts drop-in à des molécules pétrosourcées existantes. Elles sont associées à des risques accrus (résistance au changement des utilisateurs et manque de maturité des chaînes de valeur), mais offrent des

propriétés uniques ou de nouvelles fonctionnalités qui ne peuvent pas être atteintes par des molécules alternatives pétrosourcées. Il s'agit alors d'innovation de rupture.

Pour être compétitifs avec la pétrochimie, les produits biosourcés doivent avoir des propriétés chimiques pouvant être exploitées à profit, ou à défaut offrir des avantages en termes de coût de production [247]. De manière générale, la biomasse représente un coût important dans le coût global des procédés (achat de matière première, CAPEX, logistique et fractionnement de cette biomasse). Toutefois, ce surcoût peut être compensé par les spécificités biochimiques de la biomasse.

Dans le cas des biomasses, en particulier celles riches en sucres, de nombreuses études scientifiques soulignent la pertinence des approches chimiques visant à **conserver au maximum la fonctionnalité chimique de la biomasse** (hétéroatomes autres que carbone et hydrogène), plutôt que de chercher à effectuer des réactions de réduction, qui conduisent à revenir à des hydrocarbures. En d'autres termes, **plus la teneur en oxygène dans la biomasse augmente, plus la valeur ajoutée augmente**. A l'inverse, plus on veut enlever de l'oxygène à la biomasse, plus cela coûte cher et moins le procédé sera compétitif.

L'intérêt à utiliser la biomasse plutôt que des ressources fossiles pour la chimie réside dans :

- L'économie d'atomes (principe de la chimie verte)
- Tirer profit des fonctionnalités (notamment le niveau d'oxydation des fonctions) existantes dans la biomasse par rapport à des synthons pétrosourcés non oxygénés, pour faciliter la réactivité chimique [250]

Le graphique ci-dessous représente le niveau de fonctionnalité (capacité à porter une fonction) de molécules issues de la chimie du sucre et de la pétrochimie en fonction du nombre d'atomes de carbone de la molécule. La distribution obtenue permet de cartographier assez finement le niveau d'exposition de la molécule aux prix du pétrole, et fournit un outil d'aide à la décision pour évaluer la pertinence de développer des voies de production biosourcée.

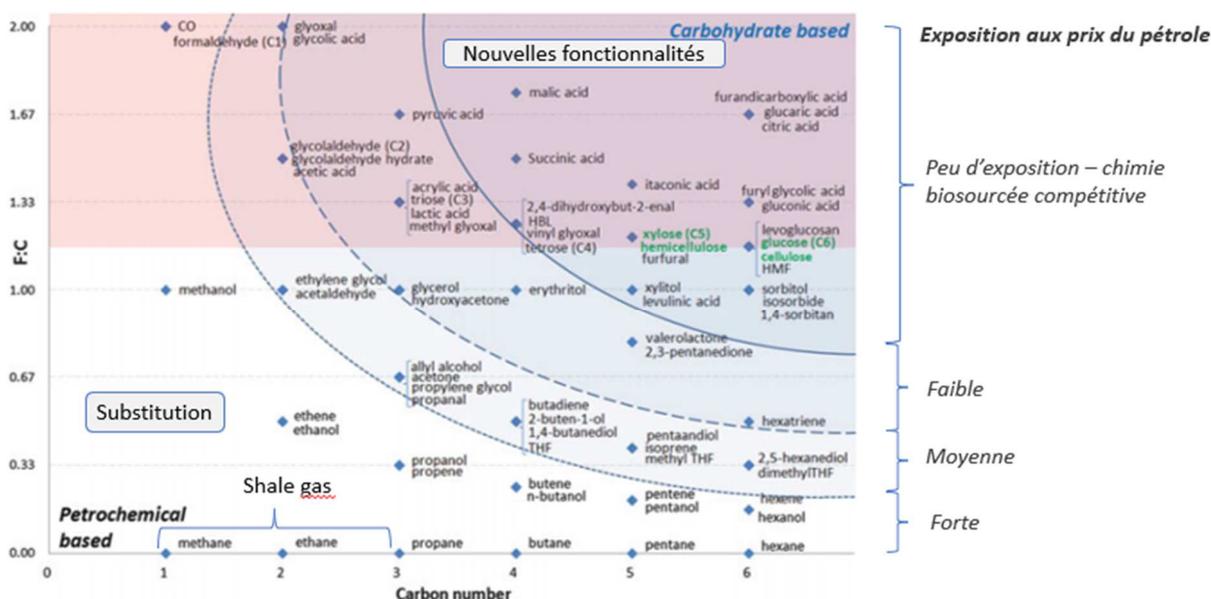


Figure 9 Sensibilité au prix du pétrole de molécules selon leur niveau de fonctionnalité (F) et le nombre d'atomes de carbone [247]

La représentation sous forme de graphique de l'économie d'atomes en fonction du niveau de fonctionnalité des molécules fournit un outil bénéfique pour sélectionner les molécules les plus intéressantes à synthétiser à partir de biomasse composée de sucres, et capables de concurrencer la pétrochimie [247].

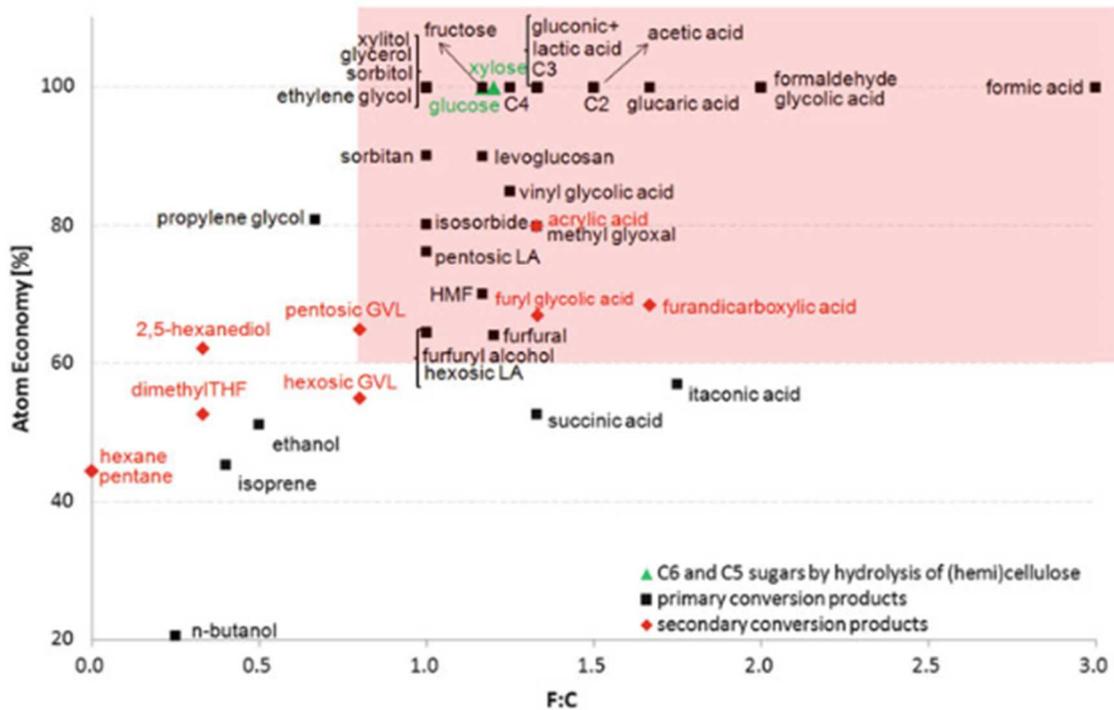


Fig. 11 Atom economy vs F:C plot for common biomass primary products and some derivatives, calculated directly from the pentose or glucose biomass. Cx: resp. x-carbon monosaccharide Data: see Table 3

Figure 10 Graphique représentant l'économie d'atomes en fonction du ratio F : C pour des produits communs dérivés de biomasses riches en sucres. Source [247]

Ce même type de représentation peut aussi permettre d'identifier les biomolécules qui présentent le plus d'intérêt quant à la réduction de l'empreinte environnementale des procédés de synthèse. Globalement, les composés les plus oxygénés peuvent être produits avec des rendements plus élevés à partir de sucres fortement oxygénés, alors que la production de composés fortement réduits requiert des atomes de carbone et d'hydrogène pour éliminer l'oxygène des sucres et conduit ainsi à diminuer le rendement en carbone [253] (Figure).

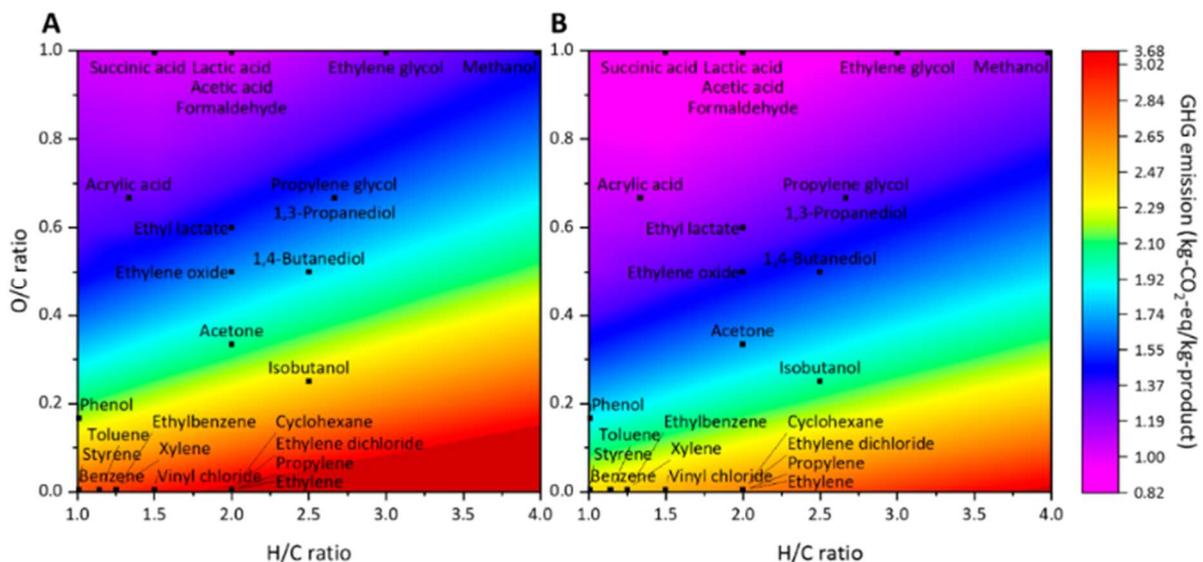


Figure 11 Emissions de gaz à effet de serre pour une molécule biosourcée en fonction de ses ratios atomiques H/C et O/C selon deux hypothèses de séparation difficile (A) et facile (B), pour une conversion de 50% [253]

Les conclusions qui se dessinent de la littérature scientifique indiquent que l'industrie pétrochimique s'est construite sur la production d'alcènes C2-C4 et d'aromatiques comme intermédiaires chimiques, avec des procédés qui ont été très optimisés depuis plus d'un siècle et demi, laissant peu d'opportunités de substitution *drop-in* pour ces molécules. En comparaison, les intermédiaires dérivés de biomasse ont la possibilité d'introduire sur le marché un ensemble de molécules intermédiaires *drop-in* mais plus fonctionnalisés, ou de manière encore plus prometteuse, se positionner sur la conversion d'intermédiaires chimiques en molécules nouvelles avec des performances améliorées ou de nouvelles propriétés.

A cette fin, le DOE (Département of Energy) aux Etats-Unis avait publié en 2004 une méthodologie qui avait abouti à l'identification d'une sélection de 10 molécules pouvant être produites avantageusement à partir de biomasse composée de sucre (Figure) [232]. Cette liste a ensuite été étendue à 14 molécules (ajout de l'acide itaconique, glucarique, du 3-hydroxybutyrolactone, et du 5-HMF) [252]. Cependant, un des critères de sélection des molécules de ces études était leur capacité à servir de plateforme chimique pour la production de dérivés chimiques utilisables en remplacement drop in direct de composés pétrochimiques.

Le concept de « **molécules bio-privilégiées** » (« *bioprivileged molecules* ») a donc été proposé plus récemment, et pourrait devenir un nouveau paradigme utile pour développer non pas des intermédiaires destinés à des substitutions *drop in* mais de nouvelles molécules biosourcées [251]. Les critères de définition d'une molécule bio-privilégiée ne sont pas encore complètement fixés, mais incluent les éléments suivants :

- Intermédiaire chimique pouvant être généré à partir de biomasse mais pas à partir de matières premières pétrosourcés.
- Intermédiaire pouvant être transformé de manière directe en un certain nombre de molécules chimiques d'intérêt.
- La conversion de ces molécules bio-privilégiées doit se faire de manière efficace avec un minimum de réactions successives de conversion, tout en assurant une forte économie d'atomes.
- Doit pouvoir servir d'intermédiaire à la production de nouvelles molécules, fournissant de nouvelles propriétés.

Building Blocks
1,4 diacids (succinic, fumaric and malic)
2,5 furan dicarboxylic acid
3 hydroxy propionic acid
aspartic acid
glucaric acid
glutamic acid
itaconic acid
levulinic acid
3-hydroxybutyrolactone
glycerol
sorbitol
xylitol/arabinitol

Figure 12 Le top 10 des intermédiaires chimiques dérivés de sucres [232]

Des exemples notables de molécules bio-privilégiées incluent l'acide muconique, le 5-HMF et le triacetic acid lactone [251]. Dans le cas du 5-HMF, il est identifié comme un intermédiaire prometteur pouvant être converti en un certain nombre de molécules, à la fois en substitution de molécules pétrochimiques, mais aussi en molécules furaniques avec de nouvelles propriétés chimiques : 2,5-diméthylfurane ou 2,5 FDCA (Figure).

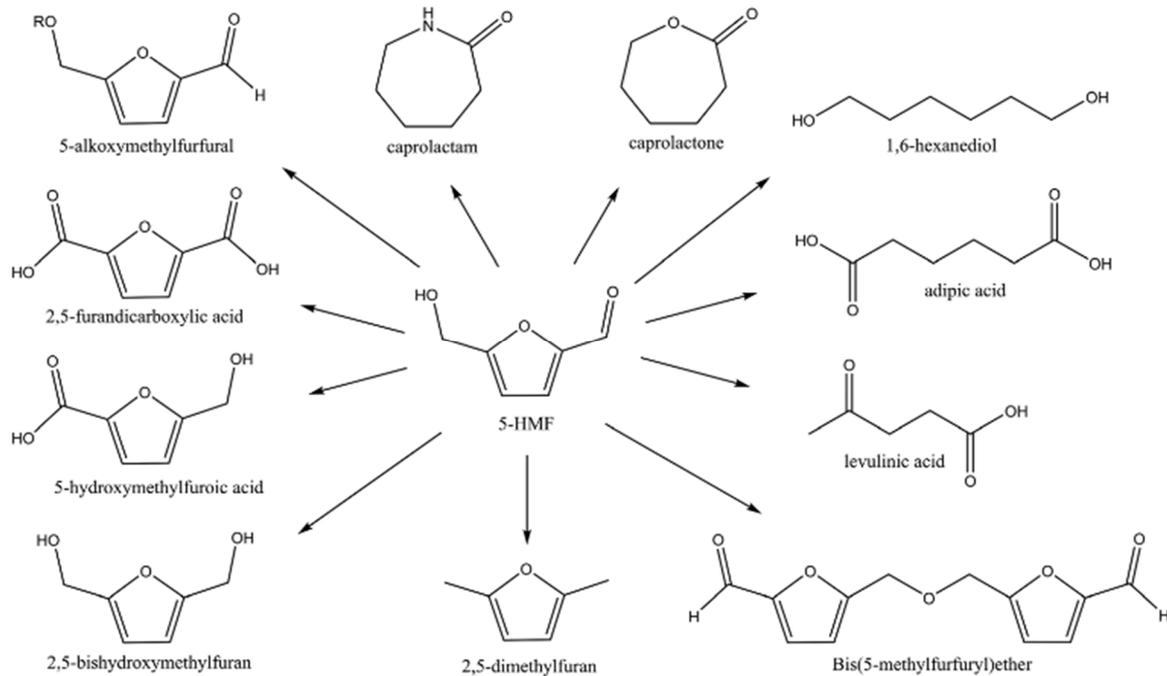


Figure 13 Le 5-HMF, un exemple de molécule bio-privilégiée d'avenir pour la chimie biosourcée [251]

A travers la richesse de fonctionnalités chimiques de la biomasse, par comparaison aux hydrocarbures pétroliers, la chimie du végétal permet d'identifier de nouvelles solutions pour répondre aux enjeux environnementaux des secteurs industriels qu'elle adresse. Cela concerne par exemple, le développement de matériaux ou molécules biodégradables.

2.4 VALORISATION DES EXTERNALITES POSITIVES DE LA CHIMIE BIOSOURCEE

Le développement de la chimie biosourcée et de la bioéconomie en général présente un certain nombre d'externalités positives, notamment environnementales et sociétales, d'intérêt particulier en comparaison à la chimie pétrosourcée.

- **La substitution de molécules préoccupantes**

La production de molécules à partir de biomasse est une voie prometteuse pour substituer des molécules préoccupantes présentant un mauvais profil toxicologique. Le **règlement Reach**, entré en vigueur en 2007 au sein de l'UE, a ainsi conduit au cours des dernières années à identifier parmi l'ensemble des substances chimiques produites ou importées à plus d'une tonne, un certain nombre de **molécules jugées très préoccupantes (SVHC : Substance of Very High Concern)**. Parmi celles-ci figurent des molécules classées CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique), PBT (persistant, bioaccumulable, toxique), VPVB (très persistant, très bioaccumulable), ou ayant un niveau de préoccupation équivalent (perturbateurs endocriniens). De nombreux travaux de recherche ont été initiés à la suite de la publication de cette liste SVHC, et la chimie biosourcée a permis d'apporter des solutions intéressantes,

notamment pour la substitution de phtalates, parabènes, bisphénol A, isocyanates ou encore les silicones [278].

La chimie du végétal peut également offrir des solutions alternatives aux molécules préoccupantes sur lesquelles pèsent une forte pression réglementaire (restriction d'usage, interdiction) et sociétale, comme les produits phytosanitaires ou encore certains agents de polymérisation (bisphénol A, isocyanates). Cette substitution reste malgré tout un défi technologique en raison des performances d'usage et de la compétitivité prix souvent très bonnes de ces molécules.

- **Le retour au sol de certaines fractions des bioraffineries**

L'approche de valorisation de la biomasse dans un concept de bioraffinerie circulaire permet aussi de favoriser le retour au sol de certaines fractions. C'est le cas du procédé développé par Afyren dans sa première usine à Carling. Leur procédé de production d'acides carboxyliques génère un co-produit valorisé comme fertilisant organique riche en potassium.

- **Réduction des émissions de GES et amélioration de l'ACV des molécules**

La chimie biosourcée (biotechnologies industrielles et chimie du végétal) peut contribuer à substituer du carbone fossile par du carbone biogénique issu de la photosynthèse et peut donc contribuer à la réduction de l'empreinte carbone du secteur de la chimie. Le secteur de la chimie est en effet un important contributeur aux émissions de GES en France (25% des émissions liées à l'industrie manufacturière). Le secteur s'est engagé à réduire de 26% ses émissions en 2030 par rapport à 2015 et la chimie biosourcée est clairement un levier identifié par les opérateurs du secteur.

Une étude récente [253] s'est intéressée au potentiel de réduction d'émissions de GES de la production à partir de biomasse d'un ensemble de 25 molécules plateformes et intermédiaires chimiques à larges volumes et à fort intérêt industriel. L'étude a démontré que la production biosourcée permettait de réduire significativement les émissions de GES par rapport à la production pétrosourcée pour 24 des 25 molécules analysées. Sous les hypothèses les plus conservatives (forte consommation d'énergie pour la séparation des molécules), la réduction d'émission peut atteindre 88%, et jusqu'à 94% selon les hypothèses les plus optimistes. Parmi les 25 molécules, l'acide succinique présente le plus fort potentiel de réduction d'émissions, tandis que le méthanol présente le potentiel le plus faible. Globalement, la production à partir de biomasse est la plus pertinente dans l'optique de réduire les émissions de GES si les critères suivants sont réunis :

- La production à partir de ressources fossiles est très énergivore
- La production biosourcée peut se faire avec de forts taux de conversion (rendement, productivité)
- La séparation de la molécule à partir du mélange réactionnel dans le bioréacteur n'est pas trop difficile et coûteuse en énergie.

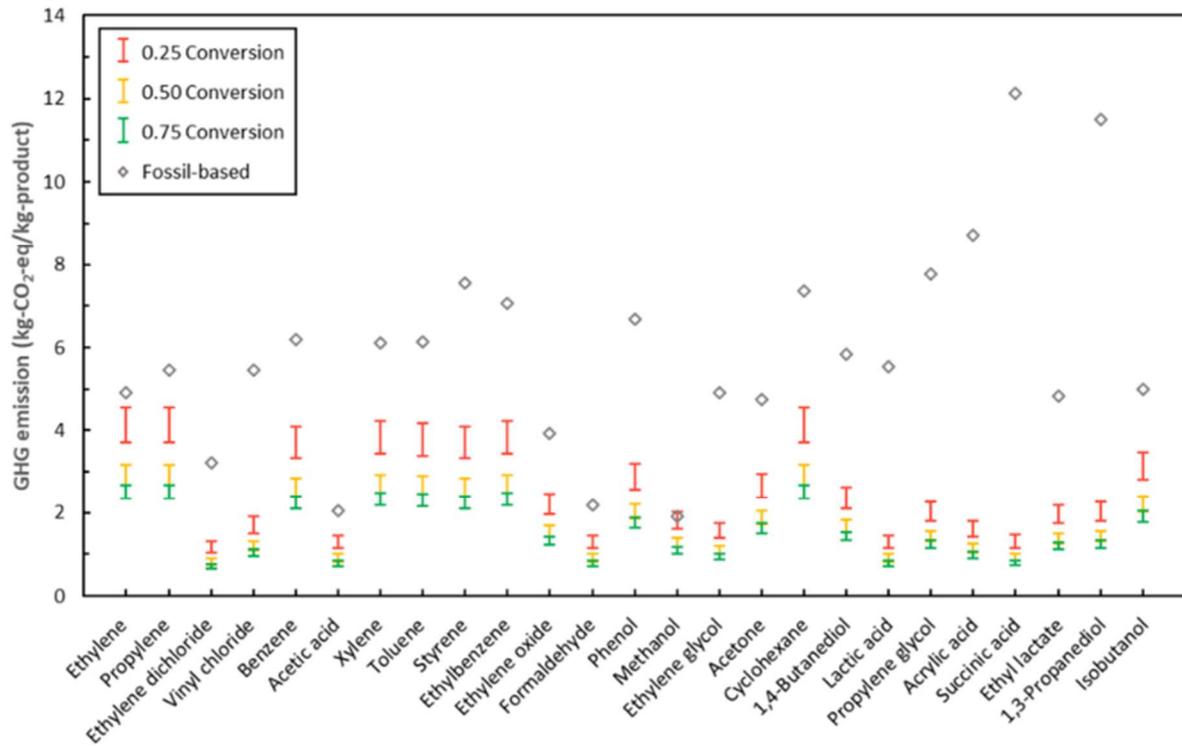


Figure 19 Les émissions de GES de 25 composés pétrosourcés (losanges gris) et de leurs équivalents biosourcés (barres colorées) pour trois niveaux d'énergie requise pour la séparation [253]

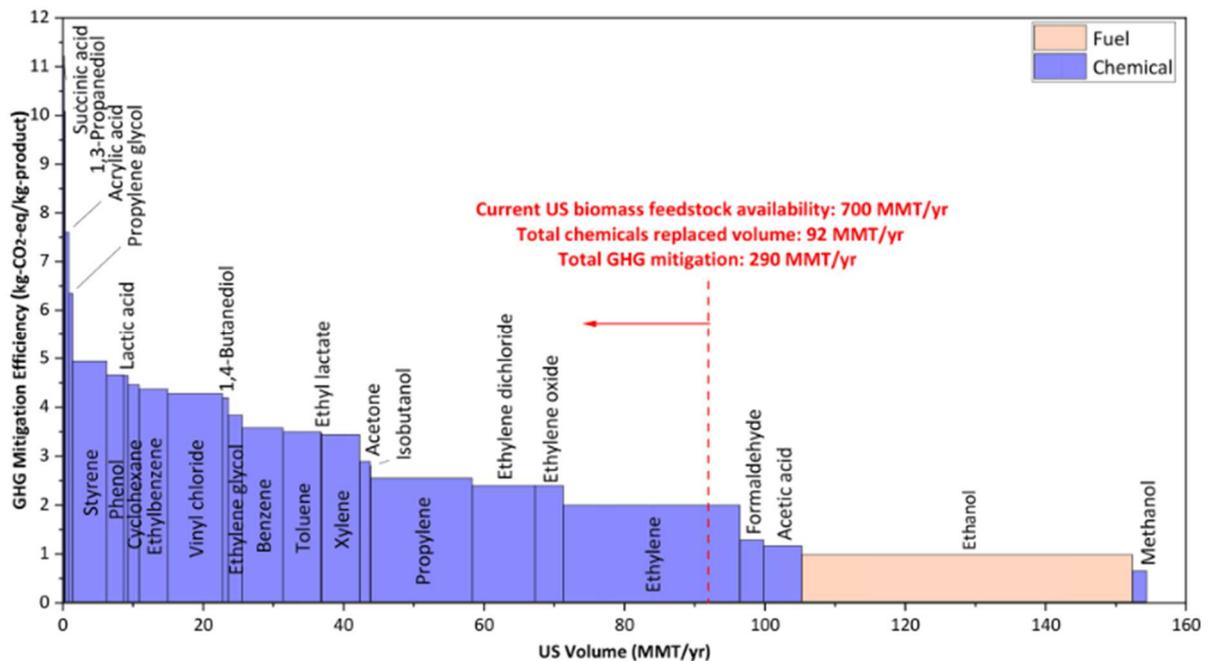


Figure 20 Potentiel de réduction des émissions de GES de 25 molécules chimiques et de l'éthanol 2G aux Etats-Unis [253]

La production biosourcée présente donc un fort intérêt pour réduire les émissions de GES du secteur de la chimie (cf. figure ci-dessus), mais rappelons que la pertinence du développement de procédés à partir de biomasse doit prendre en compte plusieurs paramètres, depuis la durabilité du sourcing en biomasse jusqu'à la séparation-purification du composé. La conduite d'une ACV rigoureuse reste, dans tous les cas, importante.

2.5 DIVERSIFICATION DES VALORISATIONS POUR LES AGRORESSOURCES

La chimie du végétal permet d'envisager le développement de nouveaux débouchés dans un secteur agro-industriel en mutation et *in fine* pour les cultures agricoles qu'elle valorise. Par exemple, le secteur sucrier a été fortement affecté par la fermeture de plusieurs sites de production à la suite de la fin des quotas sucriers en 2017, dans un contexte de surproduction mondiale ayant entraîné une baisse des prix du sucre. De même, le secteur de la transformation des oléagineux a été impacté par les limitations d'incorporation des biocarburants de 1ère génération et connaît également une transition (recherche de meilleures valorisations des tourteaux comme relais de croissance). Le développement d'un nouveau débouché permet donc d'envisager une diversification des débouchés agro-industriels et ainsi de sécuriser leur modèle économique. La chimie du végétal représente également un relais de croissance pour l'industrie chimique, un secteur dynamique (croissance supérieure à la moyenne nationale de l'industrie) et bénéficiant d'une balance commerciale positive (10,2 milliards d'euros d'excédent en 2018).

3. CONTEXTE ACTUEL

3.1 UNE ACCELERATION DES PROJETS INDUSTRIELS DANS LA CHIMIE DU VEGETAL ET DES BIOTECHNOLOGIES INDUSTRIELLES EN FRANCE

Si la pétrochimie a supplanté la chimie du végétal et la carbochimie (chimie de la houille et dérivés) dans les années 70, un regain d'intérêt de la production de molécules à partir de biomasse s'est opéré au début des années 2000. L'étude de 2004 du « Department of Energy » des Etats-Unis, intitulée "Top Value Added Chemicals From Biomass" [232], est ainsi un fait marquant de l'essor de la chimie du végétal. Cette étude, qui sélectionne des molécules plateformes d'intérêt, a en effet inspiré de nombreux développements industriels.

Plusieurs facteurs ont contribué à ce renouveau de la chimie du végétal, notamment :

- La hausse des prix du pétrole du début des années 2000
- La pression réglementaire sur les molécules préoccupantes (REACH 2006) et sur les procédés de chimie à forts impacts environnementaux
- La demande sociétale pour des produits plus vertueux
- Les engagements des industriels de la chimie sur les principes de la chimie verte pour y répondre.

L'essor de nouvelles technologies issues du développement des sciences de la vie est venu supporter ce renouveau. L'ensemble de ces facteurs a donc conduit à de nombreux développements et projets industriels. Ainsi entre 2007 et 2014, en moyenne environ 2 nouvelles molécules biosourcées par an faisaient l'objet d'un projet d'industrialisation et 1,5 nouvelles molécules biosourcées atteignaient le stade pilote.

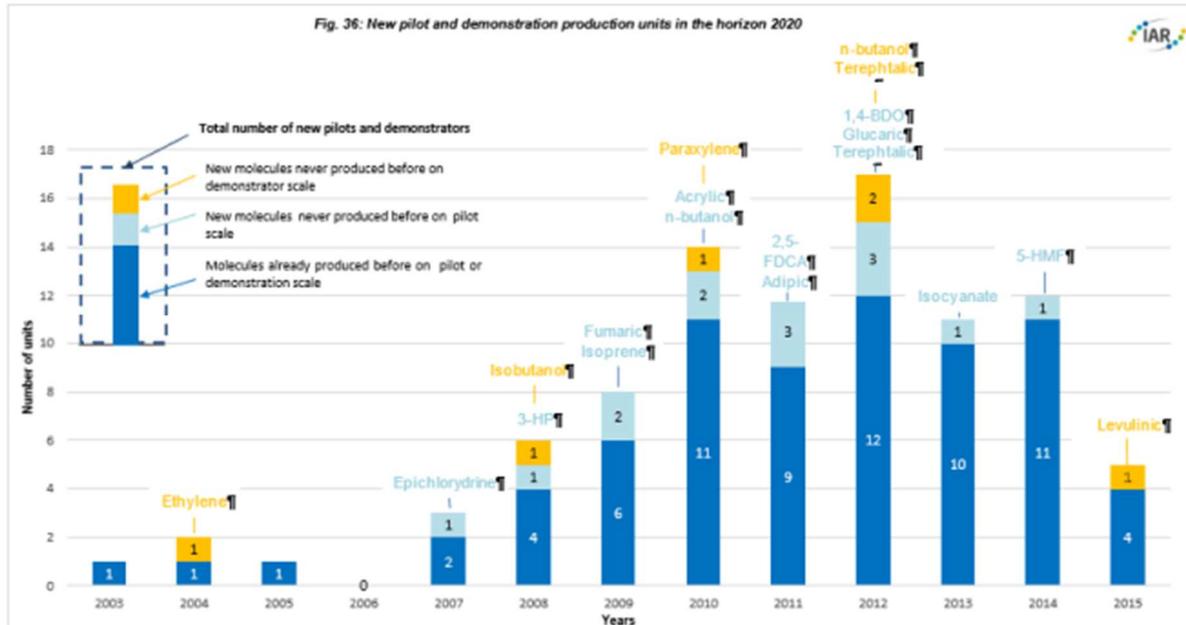


Figure 14 Evolution de la mise en production de biomolécules au stade pilote et démonstrateur dans le monde (2001-2015).
Source : [266]

Toutefois, ce rapide développement au potentiel très prometteur a été fortement ralenti par la chute des prix du pétrole en 2014, notamment causée par un développement des ressources fossiles non conventionnelles et une guerre des prix entre pays producteurs. La conjonction du rétrécissement des perspectives commerciales pour des molécules biosourcées désormais peu compétitives et des très forts besoins en CAPEX pour l'industrialisation de procédés de biotechnologies et de chimie du végétal (en moyenne 100 millions d'euros d'investissement pour une bioraffinerie) [233], ont conduit à de nombreuses faillites de start-up, qui ne sont pas parvenues à traverser la "vallée de la mort" de l'innovation [234].

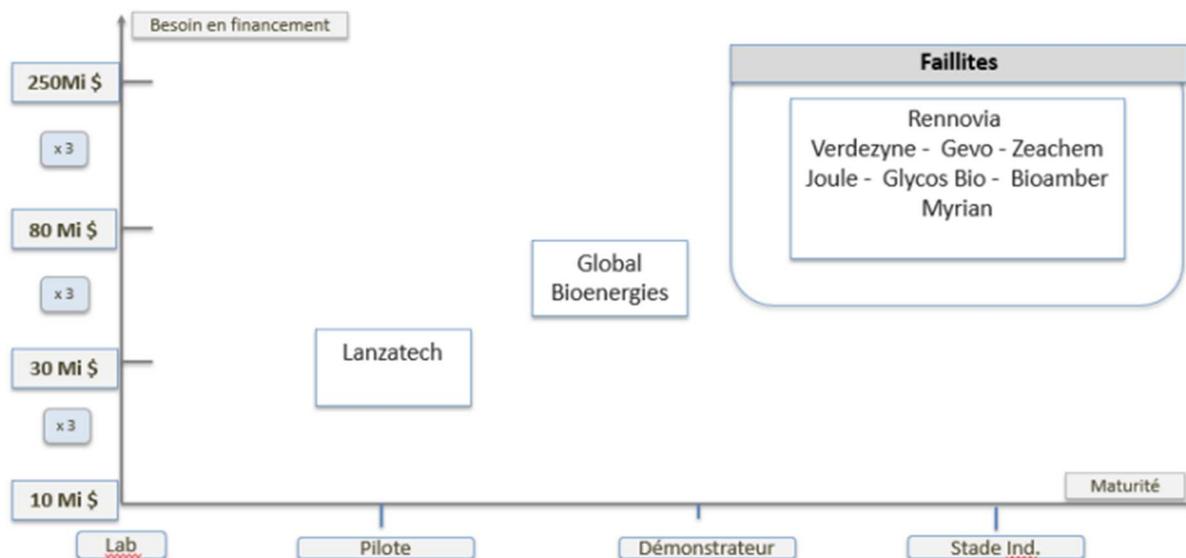


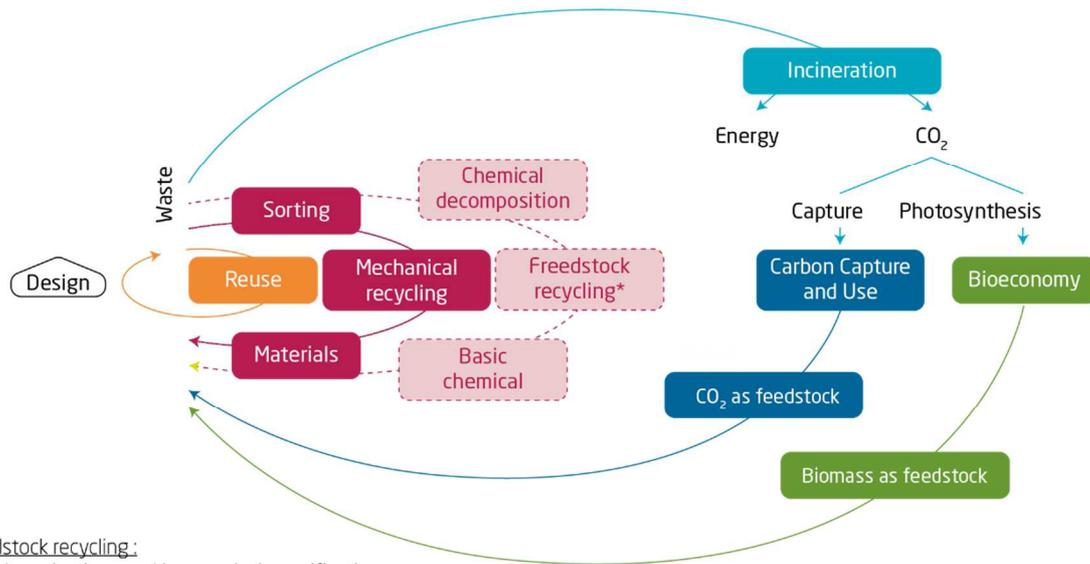
Figure 15 Stade de maturité et besoin de financement d'acteurs de la production de biomolécules en 2014. Source : [267]

Cette crise de la chimie du végétal n'a toutefois pas stoppé tous les développements. Fort d'un nouveau contexte réglementaire et économique et d'un repositionnement des acteurs, de nouveaux projets industriels ont ainsi vu le jour ces dernières années. La demande sociétale pour des produits plus vertueux et la pression réglementaire sur les enjeux environnementaux pour les secteurs de l'industrie chimique ainsi que pour les secteurs applicatifs qu'elle adresse n'ont pas cessé de croître.

De nouveaux facteurs de développement sont également apparus, tels que les mutations de la pétrochimie mondiale. L'essor des gaz de schiste a ainsi déséquilibré l'équilibre offre demande en C3-C4 pétrosourcés, représentant une opportunité pour les molécules biosourcées (plus de détails dans le porter à connaissance).

De manière générale, en plus de contribuer à la diminution des émissions de gaz à effet de serre du secteur, la chimie du végétal contribue à diminuer la dépendance du secteur à une ressource fossile, non renouvelable et dont le stock restant doit être considéré à l'aune des ressources maximales mobilisables pour contenir le réchauffement climatique à +1,5°C d'ici à la fin du siècle [235].

A terme, avec le développement des technologies de recyclage chimique et de la chimie du CO₂, ces autres sources de carbone alternatives trouveront leur place à côté du carbone renouvelable dans une économie « bas-carbone », pour répondre aux besoins en carbone alternatif de l'ordre de 500 millions de tonnes pour la chimie organique.



* Feedstock recycling :
Depolymerisation, cracking, pyrolysis, gasification.
Also : Use as reduction agent in blast furnaces for
steel production

Figure 16 Les sources de carbone alternatives : recyclage mécanique et chimique, capture de CO₂ et photosynthèse [268]

Les acteurs se sont repositionnés pour prendre en compte ce changement de contexte :

- Transfert des efforts de développement vers des **molécules à plus haute valeur ajoutée**, pour des marchés de spécialités (cosmétiques, arômes et parfums, mais aussi enduits, peintures,).
- Focalisation des travaux des chimistes sur les **structures moléculaires tirées de la biomasse, amenant des fonctionnalités inatteignables via la voie pétrole**
- Relance de la recherche en vue d'accroître l'**efficacité** du processus de mise au point des souches et la **compétitivité** des procédés. Cela concerne aussi bien la partie amont et fermentation que l'aval et la purification.

3.2 PANORAMA DES PRINCIPAUX PROJETS INDUSTRIELS FRANÇAIS

Ainsi en France, des projets industriels d'envergure ont vu le jour ces 5 dernières années, tels que ceux présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 Exemples de projets industriels de production de biomolécules ces 5 dernières années en France

Molécule	Acteur	Maturité technologique	Capacité de production	Facteur d'émergence
Isobutène	Global Bioenergies	TRL 7	Dizaine de t/an (2022) 2000 t/an (2025) Dizaines de milliers de t/an (2027)	Demande du secteur de la cosmétique pour des produits biosourcés Hausse des prix de l'isobutène du fait de l'utilisation de gaz de schiste dans l'industrie chimique
Acides organiques à chaînes courtes	Afyren	TRL 8 - 1ère unité industrielle en cours de construction	16 000 t/an	Demande du secteur de la cosmétique pour des produits biosourcés Production plus compétitive à partir de biomasse
1,3-propanediol Acide butyrique	Metabolic Explorer	TRL 8 - 1ère unité industrielle	5 000 t/an (PDO) + 1 000 t/an (AB)	Demande du secteur de la cosmétique pour des produits biosourcés Production plus compétitive à partir de biomasse
Acide glycolique	Metabolic Explorer	TRL 7-8 - 1ère unité industrielle (en cours d'étude)	2 500 t/an	Demande du secteur de la cosmétique pour des produits biosourcés Production plus compétitive à partir de biomasse
Acide polylactique	Total Energies	TRL 9	100 000 t/an (prévu 2023-2024)	Pression réglementaire sur l'usage des plastiques et demande pour des matériaux biodégradables
Butadiène	Michelin	TRL 7 - projet construction 1ère unité industrielle	20 -30 t/an (2020) 100 000 t/an (prévu horizon 5 ans)	Substitution de ressources fossiles et pénurie de C3-C4 (gaz de schiste) Demande pour des matériaux recyclables et biosourcés

Cette liste non exhaustive identifie déjà des capacités de production de plusieurs centaines de milliers de tonnes et pose la question de la capacité à fournir la biomasse nécessaire à la production de ces molécules biosourcées.

ANALYSE

Cartographie des flux de biomasse pour la production de molécules biosourcées et principaux déterminants pour leur évolution

Cette partie « ANALYSE » se concentre les résultats de l'étude.

Pour faciliter la compréhension et fournir des éléments de contexte aux lecteurs, un « PORTER A CONNAISSANCE » décrivant les concepts clés et grands enjeux de la production de molécules biosourcées est fourni dans une autre partie de ce rapport, à partir de la [page 6](#).

1. INTRODUCTION

La production de molécules biosourcées se développe à échelle française et mondiale en réponse à différents enjeux : substitution de la production actuellement pétrosourcée, provoquée par une perspective de disponibilité en pétrole décroissante, mutations du secteur de la pétrochimie, nécessité du secteur de la chimie d'améliorer son bilan de gaz à effet de serre, etc. Elle permet également de produire un certain nombre de molécules, telles que l'éthanol, chimiquement éloignées des hydrocarbures et pour lesquelles la pétrochimie présente moins d'intérêt. A cela s'ajoute d'autres enjeux tels que le développement de la souveraineté des approvisionnements industriels.

En France existe et se développe la production d'une diversité de molécules biosourcées, issues de différentes sources de biomasses et destinées à une multiplicité d'utilisations.

Cette étude a pour objectif de documenter les flux de biomasses nécessaires pour la production de 10-15 molécules biosourcées (communément appelées « biomolécules ») produites par le secteur de la chimie et issues de trois grandes bioraffineries (corps gras, céréales blé-maïs et sucre de betterave). Pour cela, les molécules biosourcées produites en France ainsi que les flux de biomasse nécessaires à leur production ont été identifiés et cartographiés sous la forme de diagrammes de flux qui normalisent les différents produits et sous-produits dans des unités comparables. Ces flux ont ensuite été mis en perspective par rapport aux autres demandes de biomasse et leurs déterminants, notamment énergétiques et alimentaires et aux évolutions à venir sur offre et demande.

L'objectif était ensuite d'identifier les différents déterminants de l'évolution de la production de ces molécules afin d'éclairer d'éventuelles complémentarités ou conflits d'usage à anticiper. Cela doit permettre d'éclairer la capacité française à fournir la biomasse nécessaire à la production de ces molécules biosourcées.

Ces travaux ont aussi permis de tester et valider une méthodologie de cartographie et d'étude des flux, ne pouvant pas présumer *a priori* que suffisamment de données puissent être collectées dans la littérature et auprès des industriels, ce type d'étude n'ayant pas été réalisé jusqu'à présent. Cette étude portant sur un nombre limité de molécules doit également venir prouver la faisabilité d'une telle cartographie qu'il s'agira ensuite d'étendre à la production d'autres molécules.

L'ensemble, qui fusionne deux rapports distincts (« [PORTER A CONNAISSANCES](#) » et « [RAPPORT D'ANALYSE](#) ») constitue un socle informatif destiné aux producteurs de biomasse, industriels de la production de molécules biosourcée ou encore acteurs publics sur la disponibilité en biomasse pour ces utilisations. Les analyses détaillées pour chacune des molécules étudiées sont fournies dans un troisième document.

2. OBJECTIFS DE L'ETUDE ET METHODOLOGIE

La présente étude a pour ambition de documenter les flux de biomasses nécessaires pour la production de 10-15 molécules biosourcées. Cette étude des flux vise à éclairer les objectifs suivants :

- › Identifier et cartographier les molécules biosourcées produites en France ainsi que les flux de biomasse nécessaires à leur production
- › Mettre en perspective ces flux par rapport aux autres demandes de biomasse et aux évolutions à venir sur offre et demande
- › Tester et valider une méthodologie de cartographie et d'étude des flux, ne pouvant pas présumer que suffisamment de données puissent être collectées dans la littérature et auprès des industriels, ce type d'étude n'ayant pas été réalisé jusqu'à présent.

2.1 OBJECTIFS DE L'ETUDE

2.1.1 ECLAIRER LA REPARTITION DES UTILISATIONS DE LA BIOMASSE

La biomasse peut être rassemblée en plusieurs catégories comme présenté dans la Figure 17.

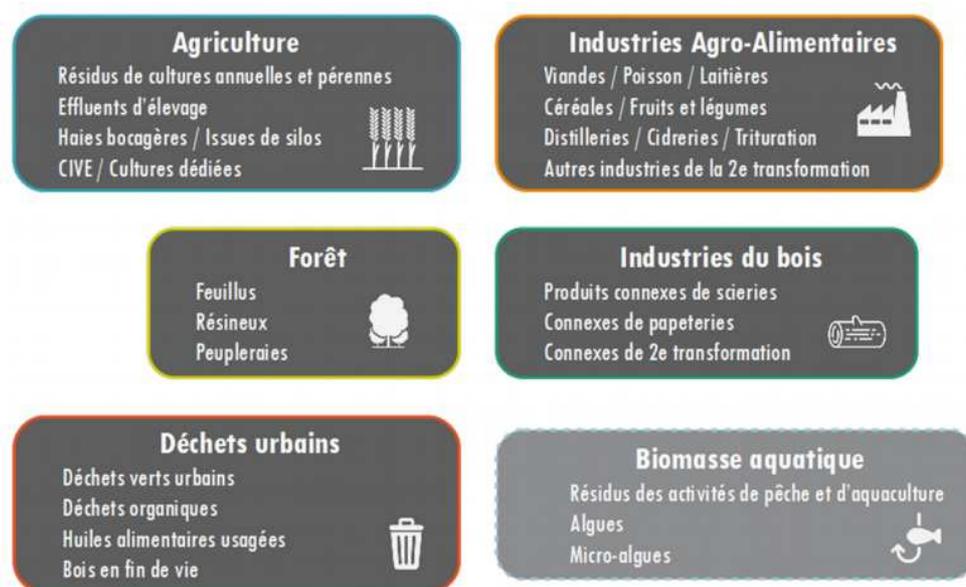


Figure 17 Les grandes catégories de biomasse. Source : Schéma Régional de la Biomasse de la région Pays de la Loire

La biomasse agricole peut provenir de cultures non alimentaires, telles que le miscanthus, ou de cultures alimentaires telles que le colza, la betterave ou le maïs et de leurs coproduits. Ces cultures mobilisent des ressources différentes (eau, foncier, intrant, main d'œuvre...) et leurs produits et coproduits adressent une diversité d'utilisations. La Stratégie Nationale de Mobilisation de la Biomasse a établi une hiérarchie des usages de la biomasse agricole, représentée dans le schéma ci-dessous.

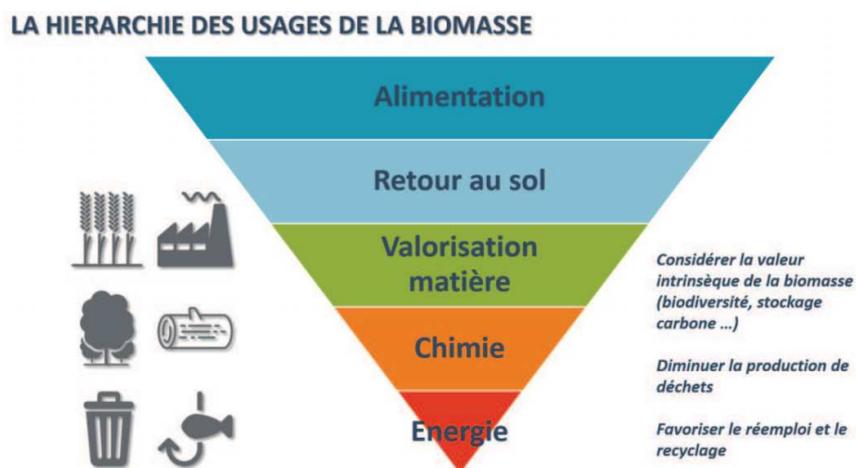


Figure 18 La hiérarchie des usages agricoles définie par la Stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (Schéma issu du Schéma Régional de la Biomasse de Bretagne)

L'essor des nouveaux projets industriels dans la chimie du végétal pose la question de la quantité de biomasse valorisée par ces voies, de sa disponibilité et des potentielles autres valorisations de cette biomasse, notamment alimentaire.

En effet, ces nouveaux développements vont mobiliser une ressource en biomasse qui devra venir d'une augmentation de sa production ou se substituer à une autre utilisation. Toutefois, la production de biomolécules s'insère dans des filières existantes. En permettant de développer de nouveaux débouchés et nouveaux revenus pour ces filières, elle peut contribuer également à sécuriser un modèle économique et améliorer la compétitivité des différentes productions dont certaines ont un usage alimentaire.

Une analyse fine des quantités de biomasse mobilisées, de leur disponibilité et des potentielles autres valorisations est donc nécessaire pour :

- S'assurer des potentiels de développement de la production de biomolécules
- Étudier les potentiels risques et synergies d'usages pour cette biomasse au sein des différentes bioraffineries.

2.1.2 LA NECESSITE D'UNE CARTOGRAPHIE DES FLUX DE BIOMASSE

Fort de ces constats, FranceAgriMer a souhaité mener une étude **visant à cartographier les flux de biomasse dans les filières de production de biomolécules**. Cette étude a pour objectif d'apporter des éléments d'éclairage, pour les acteurs institutionnels et les acteurs opérationnels, sur les **niveaux de volumes de biomasse consommés par la production de biomolécules et d'évaluer les potentiels conflits et synergies d'usage** avec d'autres valorisations et en particulier les valorisations alimentaires en prenant en compte la génération de **coproduits** qui pourraient réutiliser par ces autres valorisations.

Il s'agit concrètement de **produire une cartographie** des filières de production de biomasse et molécules biosourcées qui permette :

- De faire un état des lieux de la production de molécules biosourcées en France
- D'évaluer les besoins en termes de mobilisation de biomasse pour la production de molécules biosourcées
- D'évaluer l'impact en termes de conflits ou synergie d'usage avec d'autres utilisations de la biomasse

En second temps, l'étude devra **analyser les facteurs de développement ou d'émergence de la production de molécules biosourcées** afin d'adopter une vision plus dynamique et prospective sur la cartographie réalisée.

Enfin, cette étude constitue **un test méthodologique** qui permettra de confirmer la possibilité de réaliser une cartographie de cette nature. Elle poserait ainsi les premiers jalons éventuels d'une cartographie élargie à la totalité des molécules biosourcées produites en France et de la biomasse qui leur est consacrée, ensuite mise à jour de manière régulière.

2.1.3 DISPOSER D'ÉLÉMENTS TANGIBLES POUR ALIMENTER LES POLITIQUES PUBLIQUES

Fort des enjeux stratégiques auquel la chimie du végétal et les biotechnologies industrielles permet de répondre, la France s'est engagée dans une politique volontariste de soutien à ce secteur.

Ainsi a été adopté un **Plan Bioéconomie national** de 2018 à 2020, issu des travaux conduits par les ministères en charge de l'agriculture, de l'environnement, de l'économie et de la recherche, ainsi que des contributions de l'ensemble des parties prenantes. Il s'inscrit dans le chantier visant à relancer la **création de valeur en développant la valorisation de la biomasse pour la production d'énergie et de produits biosourcés**. FranceAgrimer est partie prenante du déploiement de ce Plan Bioéconomie et a créé une **Commission Thématique Inter-filières Bioéconomie**, une instance de concertation entre l'administration et les acteurs des filières de la bioéconomie qui vise à appuyer la mise en œuvre du plan d'action.

Pour 2021, le CTI bioéconomie s'est fixé les objectifs suivants :

- Consolider et enrichir l'Observatoire National des Ressources en biomasse (ONRB).
- Elaborer des indicateurs de performance de la bioéconomie
- Appuyer la mise en œuvre des politiques publiques de la bioéconomie.
- Accompagner la mise en application de la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse,

En septembre 2020, le premier ministre a annoncé les grandes lignes des stratégies d'accélération (quatrième Programme d'investissements d'avenir) à l'occasion de la présentation du plan France Relance. À travers ces stratégies d'accélération, il s'agit d'identifier les principaux enjeux de transition socio-économique de demain et d'y investir de façon exceptionnelle et massive dans une approche globale (financements, normes, fiscalité...). **L'une des Stratégie d'accélération retenue porte sur les « produits biosourcés et carburant durable »** et est en cours d'élaboration

Par ailleurs, **la Commission européenne a reconnu la bioéconomie comme un des neufs objectifs de la future Politique Agricole Commune**. Chaque déclinaison nationale de la PAC devra donc inclure une **stratégie de promotion de la bioéconomie qui utilisent les outils de la PAC**. Alors que les négociations de cette future PAC sont en cours, le gouvernement français doit de positionner sur cet objectif et anticiper les futures mesures à prendre au niveau national.

Enfin, le **partenariat public-privé « Bio-based Industries Joint Undertaking »** entre la Commission européenne et un consortium d'industriel visant à financer des projets innovants dans le domaine de la bioéconomie s'est achevé en 2020 (3,7 milliard d'euros dédiés entre 2014 et 2020). Un nouveau partenariat public-privé est en cours de négociation, le « Circular biobased Europe ». Le gouvernement sera amené à se positionner et participer aux négociations à travers le Conseil Européen et des groupes consultatifs d'Etat-Membres.

Ainsi, pour résumer, il y a 3 cadres stratégiques dans lesquels s'inscrivent les enjeux liés à la mission:

- **La stratégie bioéconomie**, portée à l'échelle française en partie par le ministère de l'Agriculture et de la Forêt
- **La stratégie d'accélération « produits biosourcés et carburant durable »**
- **Les négociations actuelles de la future programmation PAC**, qui sera ensuite retranscrite au niveau national, avec a priori des nouveaux outils pour le soutien à la bioéconomie (éco-dispositifs, MAE, etc.) et une plus grande subsidiarité permise pour les Etats Membres.

Dans ce contexte, FranceAgrimer va être fortement attendu pour orienter et supporter le déploiement de ces différentes initiatives. L'enjeu est donc, grâce à cette étude, de disposer d'éléments tangibles pour alimenter les politiques publiques.

Aujourd'hui peu de données sont disponibles sur les volumes de biomasses utilisés pour la production de biomolécules. Une première évaluation a été réalisée dans le cadre de la stratégie nationale de mobilisation de la biomasse (2016) sur la base de l'étude « Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions aux horizons 2020 et 2030 » réalisée par l'ADEME en 2015.

Données en kt	2018	2023	2023	2030
Saccharose	245	300	300	557
Produit amylicés (y compris besoin papier-carton, estimé stable sur toute la durée à 270 kT)	315	320	320	446
Huiles (uniquement huiles disponibles sur le territoire national)	145	215	215	654
Fibres dérivés et charges pour autres matériaux (hors textile)	201	271	271	1009

Figure 19 Evaluation des ressources en biomasses utilisées pour la chimie et les matériaux biosourcés, SNMB, 2016

Toutefois, cette étude est peu précise sur le périmètre étudié et les biomolécules concernées et donne peu d'élément qualitatif sur le développement de la chimie du végétal et les biotechnologies industrielles. Par ailleurs de nouveaux projets industriels ont vu le jour depuis 2015 et une **actualisation** des évaluations est devenue nécessaire.

Par ailleurs, l'**Observatoire National des Ressources en Biomasse (ONRB)**, outil de suivi des ressources en biomasse ayant pour objectif d'identifier et de quantifier les ressources disponibles et leurs emplois afin d'anticiper d'éventuelles concurrence d'usage, **ne prend pas en compte les valorisations à travers la production de biomolécules**. Certains coproduits de fort intérêt pour les biotechnologies industrielles comme les mélasses de betterave n'y sont par ailleurs pas étudiés.

2.2 METHODOLOGIE

2.2.1 PERIMETRE DE L'ETUDE

L'étude se concentre sur le blé, le maïs, les betteraves, le colza et le tournesol. Elle étudie ainsi les bioraffineries suivantes :

- Amidonneries – éthanoleries de blé et maïs. L'étude ne porte pas sur l'amidonnerie de pois ou de pommes de terre. Dans la suite du rapport, le mot « amidonnerie » est employé pour désigner l'amidonnerie des céréales.
- Sucrieries – éthanoleries de betteraves
- Industries des corps gras pour la partie concernant le colza et le tournesol

Bien qu'il s'agisse d'une utilisation importante en volume des produits de ces trois bioraffineries, l'étude ne porte pas sur les biocarburants (bioéthanol et biodiesel), déjà étudiés par ailleurs.

La liste des molécules biosourcées étudiées n'est pas exhaustive et ne représente pas la totalité des molécules biosourcées produites en France sur la base de ces biomasses. Le choix et la liste des molécules étudiées est détaillé au paragraphe 2.2.3 page 44.

2.2.2 APPROCHE METHODOLOGIQUE

L'étude se déroule en 3 temps et commence par le choix des molécules à étudier.

La phase suivante mobilise une **étude bibliographique importante de près de 250 ressources** (publications, brevets, articles de presse...) permettant de procéder à une analyse détaillée de la production de chaque molécule. Bon nombre des ressources bibliographiques (en particulier brevets) étant peu explicites pour des raisons de stratégie industrielle, cette analyse nécessite d'une part une triangulation des données provenant de différentes sources et d'autre part la confirmation d'experts.

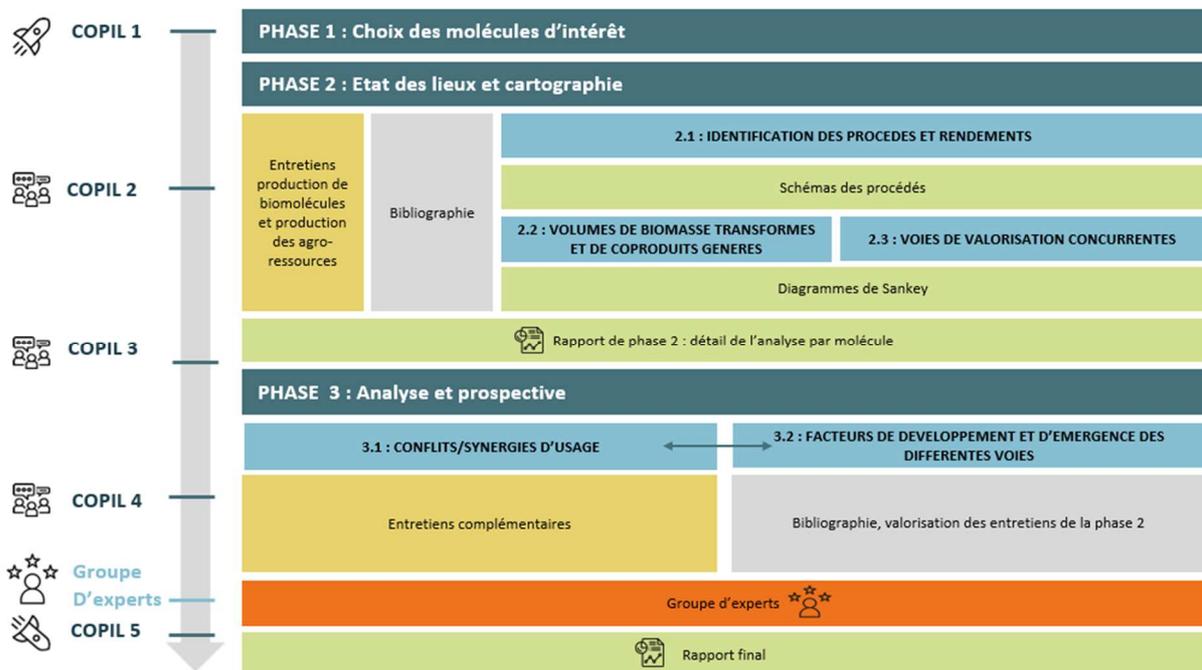


Figure 20 Schéma du déroulé méthodologique de l'étude.

Ce matériau a donc ensuite être confronté aux experts de la production des molécules biosourcées ou des agro-ressources transformées mobilisés via **une série d'une trentaine entretiens** ainsi qu'aux membres du comité de pilotage de l'étude. Ces entretiens viennent ainsi compléter et valider les

éléments rassemblés et donnent lieu à la production d'un **rapport d'analyse détaillée par molécule**, en annexe de ce rapport.

Le contenu de cette analyse, en particulier les rendements, couplés à une analyse de diverses bases de données permettent de réaliser la **cartographie des flux sous la forme d'un diagramme de Sankey**. La méthodologie employée pour cette partie de l'étude est détaillée en annexe du rapport. Il est à noter que les données collectées pour l'analyse rétrospective s'arrêtent souvent en 2020. Elles ne témoignent donc pas de la situation actuelle.

L'étude se termine par une prise de recul sur cette cartographie représentative de la situation actuelle devant identifier les **conflits et synergie d'usage** ainsi que les **facteurs de développement de la production de molécules biosourcées**. Elle réunit un **groupe de vingt experts** venant apporter une vision dynamique sur les diagrammes, un élargissement de la réflexion aux autres biomasses et molécules biosourcées hors du champ de l'étude ainsi qu'un regard critique sur l'ensemble du travail réalisé.

2.2.3 CRITERES DE CHOIX DES MOLECULES

Les molécules étudiées ont été choisies selon la logique représentée sur la Figure 21.

Un recensement de la production de molécules biosourcées française la plus exhaustive possible a d'abord été réalisée. Elle fait état d'un nombre de projets importants, avec des niveaux de maturité très variables. Certains projets en sont au stade R&D et cherchent à valider leur preuve de concept alors que d'autres en sont au stade industriel depuis plus de 10 ans. Ils mobilisent en conséquence des volumes de biomasses très différents.

L'**objectif** de l'étude est de **cartographier des flux de biomasse** destinés à la production de molécules biosourcées pour une **douzaine de molécules représentatives**. Elle **ne vise pas l'exhaustivité** mais cherche à cartographier et documenter les principaux **flux pouvant mobiliser de la biomasse** d'origine agricole et à en estimer les volumes en jeu **relativement aux autres utilisations**. L'étude s'est ainsi concentrée sur des **molécules produites sur le territoire français**, utilisant des cultures dans le périmètre des **espèces pré-définies** par la commission ayant commandité l'étude (céréales, betterave et oléagineux) produits sur le territoire national, avec des niveaux de maturité technologiques (TRL) **supérieurs à 8**, ce qui correspond à un "système réel achevé et qualifié par des tests et des démonstrations») et mobilisant des **volumes supérieurs au millier de tonnes**.

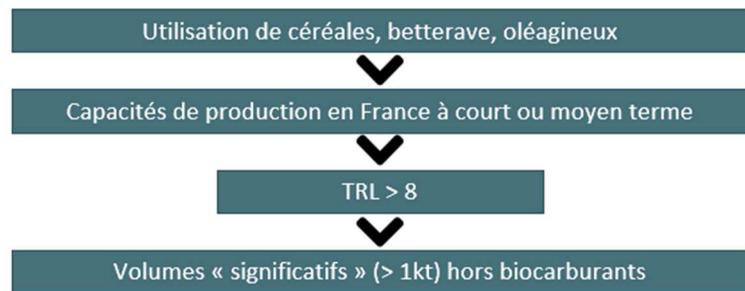


Figure 21 Processus de choix des molécules étudiées

3. PRODUCTION FRANÇAISE DES MOLECULES BIOSOURCEES ETUDIEES ET BESOINS EN BIOMASSE

3.1 LISTE DES MOLECULES ETUDIEES

Le raisonnement détaillé dans le chapitre précédent aboutit à la liste ci-dessous.

	Molécules	Acteurs
Sucrierie - éthanolerie	Acide glutamique	Ajinomoto (site de Nesle)
	Acides aminés	Metabolic Explorer (site d'Amiens, ex Ajinomoto Eurolysine)
	Isobutène	Global Bioénergies
	Acides organiques	Afyren
	Bétaïnes	Tereos, Dupont Nutrition Bioscience
Ethanolerie	Ethanol	Tereos, Cristal Union
	1,3 butadiène	Michelin
Amidonnerie - Ethanolerie	Amidon	Tereos, Roquette, ADM
	Sorbitol et principaux dérivés	Tereos, Roquette
Industrie des corps gras végétaux	Glycérol / Glycérine	Avril, Valtris
	1,3 Propanediol	Metabolic Explorer
	Esters d'acide gras et autres acides gras fonctionnalisés	Avril / Oléon / Valtris / Stéarinerie Dubois

La liste de biomolécules comporte majoritairement des molécules biosourcées issues des grandes filières ou bioraffineries métropolitaines. Elles sont obtenues par des **procédés chimiques ou des procédés biotechnologiques en place à l'échelle industrielle ou préindustrielle**. Leurs utilisations visent des marchés divers allant des matériaux à la cosmétique, mais aussi l'industrie chimique en tant que synthons pouvant être transformés.

Seule **une molécule au TRL < 8 a été ajoutée** à la liste compte tenu des volumes importants d'utilisations de biomasse qu'elle pourrait représenter à court terme : **le 1,3 Butadiène** produit par Michelin.

Les productions de molécules à des stades TRL élevés mais dans des volumes faibles et qui resteront faibles n'ont pas été retenues car l'étude s'est concentrée sur les utilisations de biomasses les plus significatives, capables d'interagir avec les autres demandes à terme. Il s'agissait notamment de la plupart des molécules à haute valeur ajoutée qui, bien qu'elles génèrent beaucoup de valeur, représentent de très faibles volumes de biomasses consommés : phycocyanines produites par FermentaIlg, acide hyaluronique produit par Givaudan / HTL biotechnologies, Pigments produits par Pili...

Les choix réalisés reflètent la situation actuelle et court terme (5 ans) des productions de biomolécules. Il est cependant possible que la conjoncture économique fasse évoluer et puisse potentiellement stopper certains développements en cours ou en faire émerger de nouveaux. Précisons que cette étude a avant tout pour but de tester la possibilité de cartographier de tels flux, et de définir un cadre méthodologique qui permettra de traiter les molécules qui apparaîtront au fur et à mesure du développement de la bioéconomie en France.

3.2 DIVERSITE DES MATIERES PREMIERES UTILISEES

La production des molécules détaillées dans le tableau ci-dessus mobilise des ressources en biomasse provenant de céréales, betteraves ou plantes oléagineuses entrantes dans la bioraffinerie. Plus en détail, on distingue trois grandes catégories de matières premières.

- **Les matières premières contenant des molécules et assemblages natifs porteurs de propriétés à valeur d'usage.** Il s'agit des matières premières contenant le composé d'intérêt devant uniquement en être extrait. Le procédé consiste à les extraire sans les modifier chimiquement. C'est le cas des **bétaïnes** contenues dans les betteraves et l'amidon.
- **Les molécules plateforme porteuses de réactivité pour la chimie catalytique.** Elles sont utilisées pour leurs propriétés physico-chimiques permettant la production de la molécule d'intérêt par chimie catalytique. Il s'agit de molécules issues de première transformation de la biomasse permettant de concentrer et isoler la matière première : **triglycérides** pour la production de glycérol ou d'acides gras, **amidon** pour la production de sorbitol (via le glucose), **éthanol** pour la production de 1,3 butadiène.
- **Les sources de glucides et d'énergie pour la fermentation,** c'est à dire les matières premières apportant du **carbone** aux microorganismes pour la production de molécules d'intérêt par **voie fermentaire**. Il s'agit **principalement de sucres**, sous forme de glucose issu de céréales ou de saccharose issu de betterave, mais également de **glycérol** provenant de l'industrie des corps gras (biocarburants notamment). Il existe une diversité de types de matières premières permettant l'apport de carbone aux microorganismes qui divergent notamment sur :
 - › **La nature de la molécule.** Les bioraffineries françaises permettent la production de deux sucres pouvant être utilisés par les microorganismes : (1) le **saccharose**, extrait par cristallisation du sucre de betterave et le **glucose**, produit par hydrolyse de l'amidon. Le saccharose est un disaccharide (un fructose et un glucose) et n'est pas métabolisable par tous les microorganismes, certains ne sachant pas l'hydrolyser puis isomériser le fructose en glucose, sucre à 6 carbone métabolisable. Quant au **glycérol**, molécule à 3 carbones, il provient de l'industrie des corps gras.
 - › **Le niveau de pureté.** Cela est particulièrement prégnant pour les matières premières issues du procédé de cristallisation du sucre de betterave. Ce procédé industriel, qui vise à concentrer le saccharose par cristallisation, produit en parallèle une fraction qui concentre davantage les autres composés de la betterave tout en laissant des sucres résiduels (Egouts pauvres 1 dits EP 1 », EP2, mélasse). Ainsi, la mélasse, produit de la troisième cristallisation, contient le sucre dit « non extractible » et les autres composés de la betterave. Cela peut présenter l'intérêt d'apporter la diversité des nutriments hors sucre contenus dans la betterave aux microorganismes sans avoir à les ajouter au milieu de fermentation. A l'inverse, le contrôle du milieu est moins fort et cette matière première peut contenir des inhibiteurs de fermentation. C'est également le cas du glycérol qui peut être apporté aux microorganismes à des niveaux de puretés très variables.

L'ensemble de ces matières premières consommées pour la production des molécules biosourcées étudiées est détaillé dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 Molécules étudiées, procédé de fabrication et matière première mobilisée.

Bioraffinerie	Molécules	Procédés	Matière première utilisée
Sucrierie - éthanolerie	Acide glutamique	Fermentation	Sucres
	Acides aminés	Fermentation	Sucres
	Isobutène	Fermentation	Sucres
	Acides organiques	Fermentation	Sucres ou glycérol pour l'acide butyrique
	Bétaïnes	Extraction	Betteraves
Ethanolerie	Ethanol	Fermentation	Sucres
	1,3 butadiène	Chimie catalytique	Ethanol
Amidonnerie - Ethanolerie	Amidon	Extraction	Albumen de céréales
	Sorbitol et principaux dérivés	Chimie catalytique	Amidon
Industrie des corps gras végétaux	Glycérol / Glycérine	Chimie catalytique	Triglycérides
	1,3 Propanediol	Fermentation	Glycérol
	Esters d'acide gras et autres acides gras fonctionnalisés	Chimie catalytique	Triglycérides

3.3 PROCÉDES, RENDEMENTS ET AUTRES CRITÈRES DE PERFORMANCE

Afin d'estimer les volumes de biomasses consommés pour la production de chaque molécule, une étude approfondie des **rendements de transformation de la biomasse en molécule biosourcée** a été réalisée.

L'étude se focalise sur le **rendement massique** de la molécule cible, obtenue à partir de la biomasse d'origine, quels que soient les procédés chimiques et biotechnologiques mis en jeu. Ce rendement massique est le ratio entre une tonne de la molécule cible et la quantité de biomasse ou de la fraction valorisable (en tonnes) nécessaire pour son obtention.

Dans un concept de bioraffinerie, ce résultat global est mis en perspective avec un bilan massique de transformation. En effet, il arrive qu'une tonne de biomasse conduise à plusieurs molécules cibles d'intérêt, ayant chacune un rendement massique de production.

La Figure 22 présente une synthèse des rendements observés lors de cette étude. L'intégralité de l'analyse des rendements par molécule étudiée est disponible dans l'annexe du rapport.

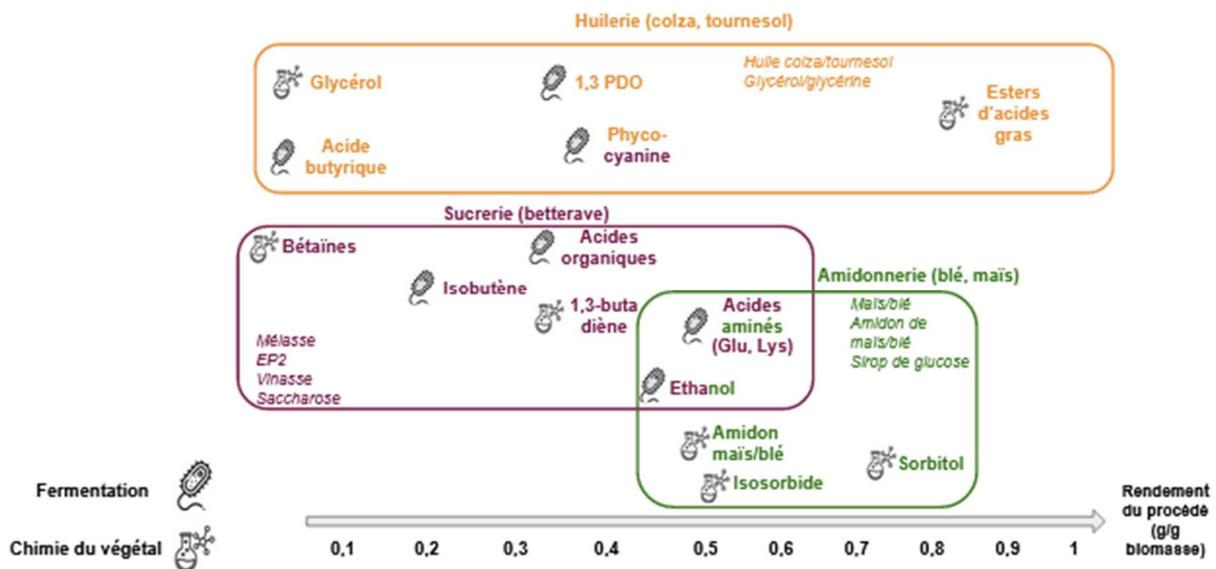


Figure 22 Synthèse des rendements obtenus pour les différentes biomolécules de l'étude

En ce qui concerne la production des molécules étudiées issues de corps gras, les rendements sont ceux de la réaction d'**estérification** qui transforme un triglycéride et un alcool en une molécule de glycérol et trois esters d'acides gras. **Le rendement massique de l'huile aux esters est proche de 100% et celui de production du glycérol est de 10%.**

Metex est un acteur pionnier en France dans l'industrialisation d'un procédé de fermentation pour la production de 1,3 PDO et d'acide butyrique à partir de matière première issue de l'oléochimie (la glycérine). Cette réaction transforme 2,5 t de glycérine industrielle brute en 1 t de 1,3-PDO et 0,25 t d'acide butyrique [107, 108].

Pour la production de molécules par chimie catalytique, le rendement de transformation strict, hors Down Stream Processing (DSP), est dicté par la stoechiométrie des réactions chimiques, détaillées dans le rapport d'analyse par molécule.

Pour la production de molécules par fermentation, comme l'illustre la Figure 22, le rendement de transformation strict, hors Down Stream Processing (DSP), varie entre 0,2 et 0,5 et est limité par plusieurs facteurs parmi lesquels peuvent être cités :

- **La stœchiométrie** de la réaction chimique de transformation de la biomasse en molécule biosourcée. Par exemple, si une réaction de fermentation est génératrice d'un coproduit (ex : cas d'un ou plusieurs carbones de la molécule réactive étant transformé en CO₂), le rendement de production du produit sera nécessairement plafonné.
- **Le rendement des enzymes**, qui peut faire l'objet d'améliorations grâce à diverses techniques de R&D biotechnologiques.
- **Le métabolisme primaire des souches**, qui doit être assuré tout au long de la fermentation et consomme de la biomasse

Encadré : les limites à l'amélioration des rendements en fermentation

Les rendements des procédés de fermentation sont généralement compris entre 30-66% et limités notamment par la seconde loi de la thermodynamique (principe d'entropie), car les cellules vivantes produisent de la chaleur pour compenser la réduction d'entropie nécessaire pour maintenir des compartiments cellulaires [257]. L'inconstance de l'ingénierie du vivant conduit certains auteurs à spéculer sur les limites ultimes de la biologie de synthèse [256] [257]. En effet, même si on optimise les souches microbiennes pour orienter leur métabolisme vers la production de la molécule d'intérêt par des approches d'ingénierie métabolique, il faut néanmoins s'assurer que la cellule conserve ses capacités de réplication et qu'elle puisse assurer l'ensemble des fonctions physiologiques nécessaires à sa croissance. La notion d' « usine cellulaire » ou de « châssis microbien » a donc ses limites, et même si les souches industrielles modifiées peuvent être jusqu'à deux fois plus efficaces pour la réplication que des souches sauvages, il y a une efficacité maximum de production que l'on ne pourra dépasser [257].

Il doit être souligné que les procédés de fermentation sont plus souples que les procédés chimiques à une variabilité de la composition de la biomasse de départ (modulo la résilience des souches microbiennes utilisées).

La rentabilité de la production de molécules biosourcées ne doit pas uniquement être considérée au regard du rendement massique. La **séparation dans le post-traitement (DSP)** est à prendre en compte pour certaines biomolécules. En effet, pour chaque type de procédé, **les rendements globaux sont dépendants des étapes de post-traitements** (« Down Stream Processing ») nécessaire à l'obtention de la molécule cible ayant une pureté suffisante pour son utilisation. Cette étape peut être à l'origine de pertes de rendement conséquentes.

Dans certains cas, le coût de ces étapes de séparation et de purification est supérieur à celui du procédé de production fermentaire. Les besoins de pureté peuvent imposer une séparation poussée, d'autant plus avec des biomasses 2G ou moins purifiées.

De manière générale, dans les biotechnologies industrielles, des progrès importants ont été réalisés en biologie de synthèse et en ingénierie métabolique [246], ce qui a permis de lever des verrous et d'améliorer considérablement les titres de production de biomolécules (g/L), ainsi que les productivités (g/L/h), sans augmenter les coûts associés à l'Upstream processing. En revanche, ces titres plus élevés sont aussi généralement associés à des lots (« batch ») avec plus d'impuretés, ce qui nécessite des capacités de séparation et de purification accrues (DSP)

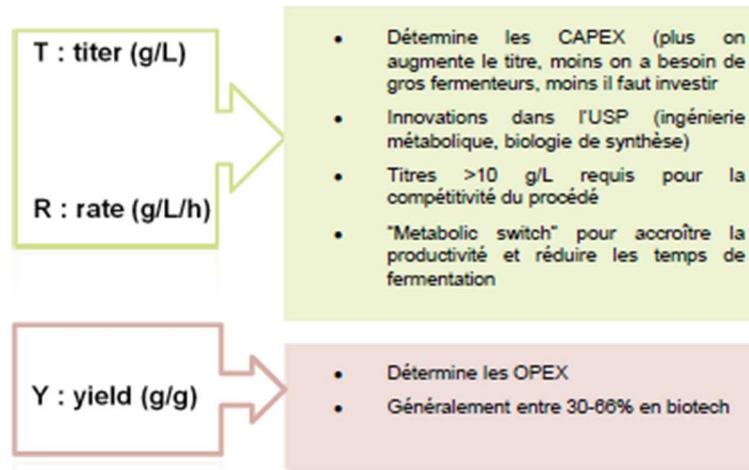


Figure 23 L'industrie de la fermentation s'intéresse à trois paramètres pour évaluer la rentabilité d'un procédé (auteurs, d'après entretiens)

En résumé, comme l'illustre la figure ci-dessus, la rentabilité d'un procédé dépend en réalité de trois facteurs :

- Le rendement massique
- La concentration ou titre en lequel la molécule est produite
- La vitesse de production

3.4 CAPACITES ACTUELLES ET ANNONCEES POUR LEUR PRODUCTION

Les capacités de production actuelles identifiées et annoncées ont été reportée dans le tableau ci-dessous. Pour les molécules étudiées, de fortes croissances de production sont annoncées par les acteurs des biotechnologies tels que METEX et Global Bioenergies. Ils représentent ainsi un appel potentiel de biomasse significatif. La plus forte croissance est annoncée par Michelin qui prévoit l'installation d'un site de production de 100kt de butadiène biosourcé à horizon 2029, qui serait produit à partir de bioéthanol issu de la fermentation de sucres d'amidon ou de betterave, la voie lignocellulosique n'étant pas encore industrialisée en France et sa faisabilité technique et économique reste à démontrer.

		Situation actuelle		Situation à prévoir	
		kt de biomolécule	Commentaire	kt de biomolécule	
Michelin	1,3 butadiène	0,02	Stade démonstrateur, de 20 à 30t	100	dont éthanol 2G (2029)
Global Bioenergies	Isobutène	1	Production d'isododécane pour cosmétique (2024)	31 à 50kt	pour commodités et jetfuel
Metex	PDO et Acide butyrique	5	PDO	20	PDO
		1	Acide butyrique	4	Acide butyrique
Ajinomoto	Acide glutamique	60	Glutamate monosodique		
Metex	Acides aminés	100	En particulier Lysine		
Afyren	Acides organiques	16			
Esters d'acides gras et acides gras fonctionnalisés		> 27	Chiffre probablement surestimé		
Glycérol		> 100 (2018)	Variable proportionnellement à la variation de production de biodiesel		
Amidon		~ 3 000	1 250 de maïs et 1 750 de blé		
Sorbitol		> 20	Chiffre sous-estimé		

Figure 24 Capacités de production actuelles et annoncées pour la production de molécules biosourcées étudiées

3.5 UTILISATIONS DE BIOMASSE POUR LA PRODUCTION DES BIOMOLECULES ETUDIÉES

Ce chapitre vise à restituer les volumes de biomasses consommés pour la production de chaque biomolécule. Compte tenu de la diversité des biomasses utilisables et de la capacité potentielle de certains producteurs de molécules à passer d'une biomasse à l'autre, il est **nécessaire de disposer d'une unité permettant de comparer différentes biomasses et différentes biomolécules**. En conséquence, nous convertirons tous les flux en masse de carbone afin d'obtenir une base comparative exploitable pour le lecteur.

Tableau 4 Part du carbone dans la masse molaire de différentes molécules

Molécule étudiée	% de C dans la masse molaire
Ethanol	52%
Glucose	40%
Glycérol	39%
Saccharose	42%
Acide oléique	77%
Isobutène	86%
Acide glutamique	41%
1,3 propanediol	47%
1,3 butadiène	89%
Lysine	49%
Esters d'AG	77%
Acide butyrique	55%
Cellulose et amidon	44%

Trois étapes ont permis la réalisation du diagramme ci-dessous qui représente les utilisations de carbone pour la production de molécules biosourcées.

1. Les **tonnages de chacune des molécules biosourcées produites** ont été estimés grâce aux ressources bibliographiques et aux entretiens réalisés avec les acteurs.
2. **La quantité de biomasse nécessaire à leur production** a été déduite de l'analyse des rendements, retrouvés dans la littérature scientifique ou dans des brevets. L'ensemble des paramètres de calcul utilisés sont disponibles dans l'annexe à ce rapport détaillant l'analyse pour chacune des molécules.
3. Enfin, il a été décidé de **convertir l'ensemble des tonnages** de biomasse mobilisée (en matière sèche) et de molécule biosourcée produite (en matière sèche) en **tonnes de carbone** selon les paramètres ci-dessous.

Ce diagramme permet de constater qu'à ce jour, **ce sont surtout les utilisations du carbone sous forme de sucres (saccharose ou glucose) qui dominent pour la production des molécules biosourcées étudiées** (flèche bleue). La production de molécules biosourcées issues de l'industrie des corps gras représente une minorité des utilisations de carbone à destination de la production de molécules biosourcées (flèches rouges).

En ce qui concerne l'utilisation des sucres, **les principales utilisations concernent pour l'instant la production des acides aminés**, historiquement implantée en France et dorénavant principalement réalisée par METEX et Ajinomoto. Afin de réaliser ce diagramme, il a été fait l'hypothèse que le site d'Amiens ne produisait que de la lysine.

**Bilan des utilisations de matières premières agricoles pour la production des biomolécules étudiées
(données disponibles au 17 novembre 2022)**

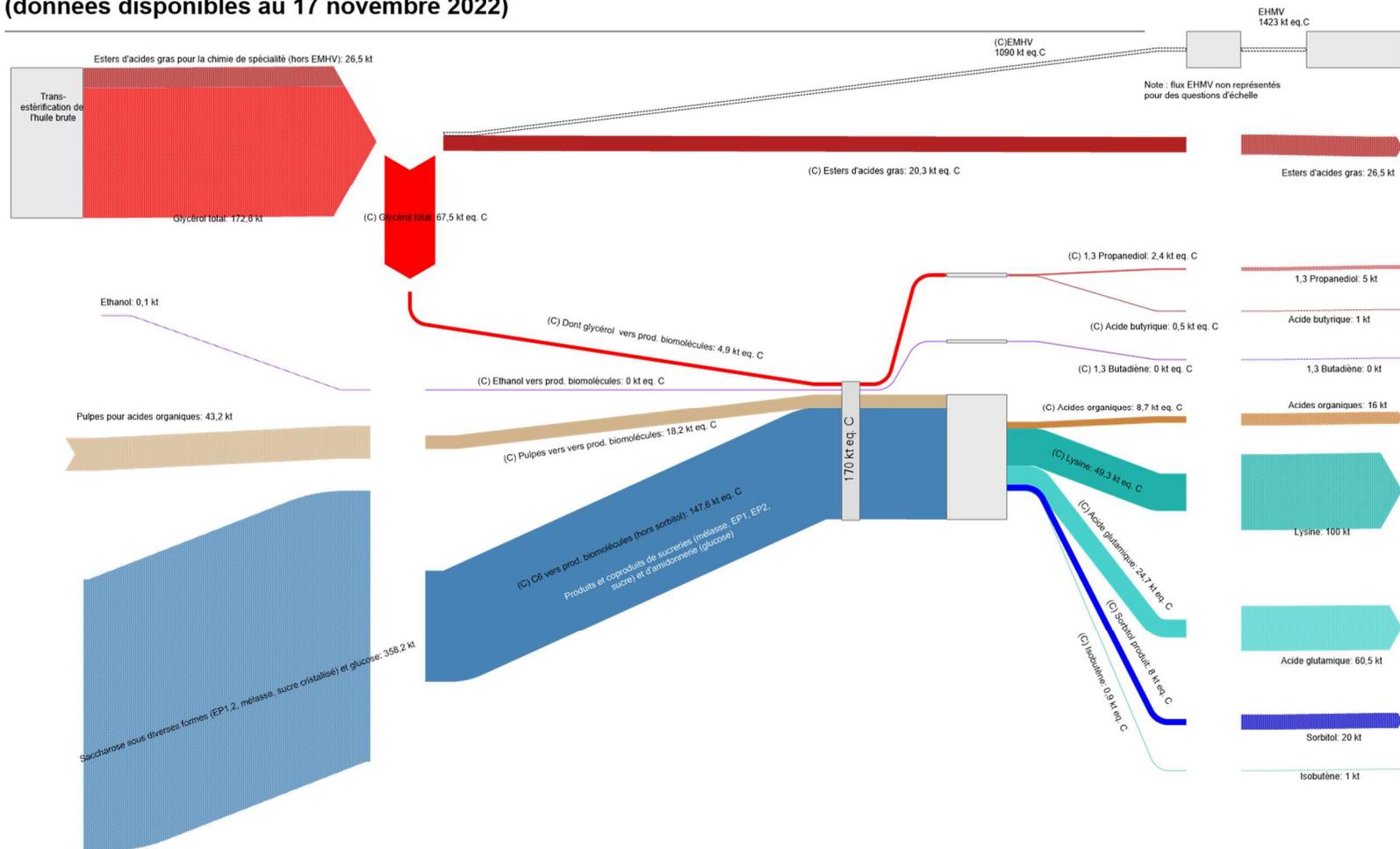


Figure 25 Bilan des utilisations de matières premières agricoles pour la production des biomolécules étudiées (données disponibles au 17 novembre 2022)

4. MISE EN PERSPECTIVE PAR RAPPORT AUX AUTRES UTILISATIONS DES BIOMASSES ETUDIÉES

Connaissant les volumes de biomasse mobilisés pour la production de biomolécules, il s'agit maintenant de tenter de répondre aux questions suivantes :

1. Quel est le **poids des consommations de matières premières pour la production de molécules biosourcées** par rapport aux **autres utilisations** des produits et co-produits des bioraffineries (alimentation humaine et animale, énergie, etc.) ?
2. Quelles sont les **perspectives d'évolutions de ces différentes utilisations** par rapport aux évolutions attendues sur la consommation de biomasse pour la production de molécules biosourcées ?

4.1 BIORAFFINERIE DES CORPS GRAS (COLZA ET TOURNESOL)

PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Un **déclin de la production de biodiesel** à moyen terme est envisagé par les acteurs du secteur compte tenu de la fin annoncée de la vente de véhicules légers neufs à moteurs thermiques en 2035. Le biodiesel représente actuellement la majeure partie des utilisations d'huile (2/3 à ¾ selon les années).

Dans ce contexte, l'étude a mis en évidence :

- Une **dynamique de recherche d'applications à haute valeur ajoutée** (nouveaux marchés de la chimie et cosmétique) -> volumes plus faibles et de **segmentation** (ex : bas carbone, non OGM...)
- De **potentiels relais** de l'utilisation des huiles végétales vers l'**aviation**, les transports lourds (**jetfuels, HVO**) et une diversité de marchés valorisant le **mass-balance** (ex : bionaphta pour polymères)

8% du glycérol produit en France est utilisé pour la production des molécules étudiées. Il existe un **risque de diminution de la ressource** française en glycérol corrélée à la baisse de production du biodiesel. Un recours à l'importation est possible mais il existe un risque de sensibilité aux fluctuations des marchés mondiaux

Les esters d'acides gras et acides gras de spécialité représentent une **part très faible des utilisations**. Les industriels plutôt rassurants quant au fait que cette utilisation continuera à être servie

 L'étude n'a **pas identifié de tensions à court terme** pour cette bioraffinerie mais des interrogations sur la **disponibilité en glycérol à moyen terme**. Le secteur de la chimie biosourcée est plutôt perçu par les acteurs du secteur comme un relai de marché à celui de l'énergie.

4.1.1 PRODUCTION FRANÇAISE DE COLZA ET TOURNESOL

La production française de colza et tournesol occupe respectivement 1 486 et 581 kha en moyenne olympique sur les campagnes 2015-16 à 2019-20 (source : Agreste). Le colza est principalement cultivé dans la moitié Nord de la France alors que la production de Tournesol est concentrée au Sud de la Loire dans le quart Sud-Ouest et de manière plus minoritaire dans le Nord Est.

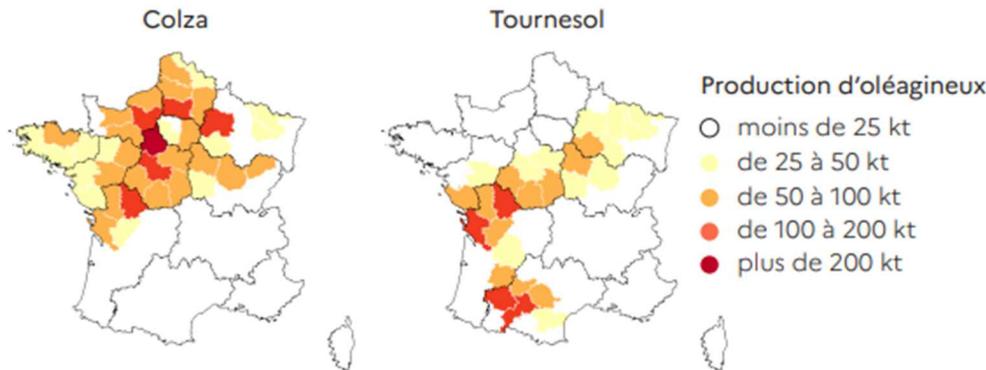


Figure 26 Production d'oléagineux par département, campagne 20/21. Source : [Fiche filière oléagineux](#).

La production de colza est 4,2 fois supérieure à la production de tournesol. Elle est en baisse depuis la campagne 2016-17 (années successives de conditions de semis dégradées) comme cela peut se voir sur la Figure 27 et les experts interrogés ne prédisent pas de croissance de sa production. La production de tournesol est relativement plus stable et dans une dynamique légèrement haussière depuis la campagne 2018-19 (Figure 27).

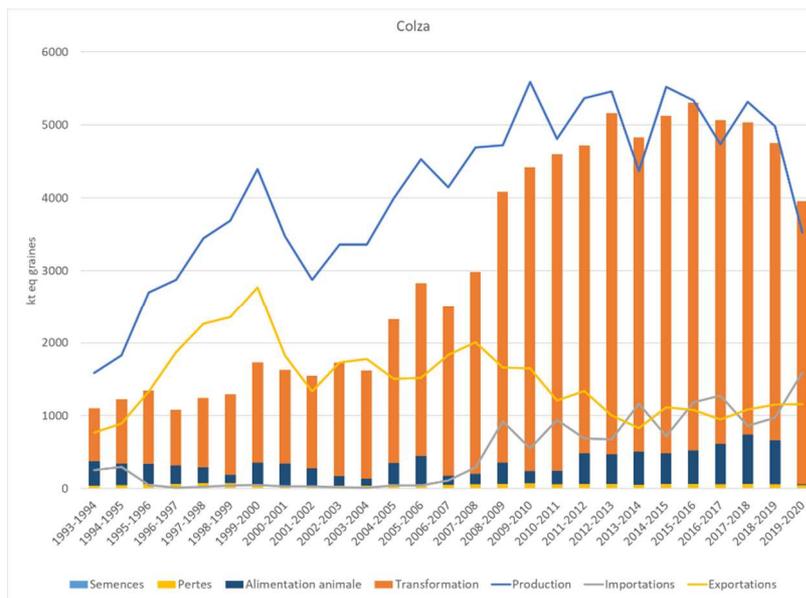


Figure 27 Evolution de la production, des importations et des utilisations de colza françaises. Source : Bilans de

La production d'oléagineux est très sensible aux politiques incitatives à la production de biocarburants. La Figure 27 permet à ce propos de visualiser la croissance importante entre la moitié des années 2000 et la moitié des années 2010.

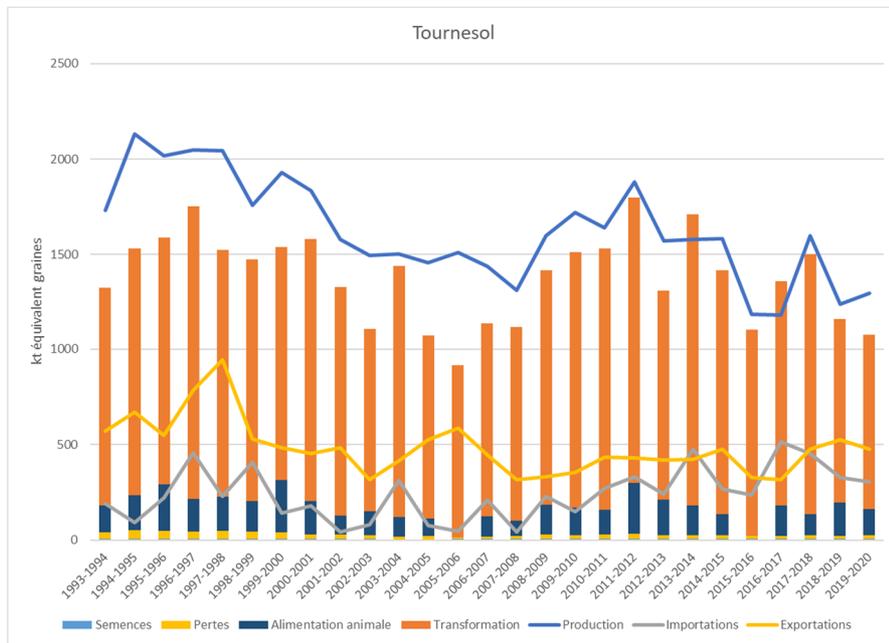


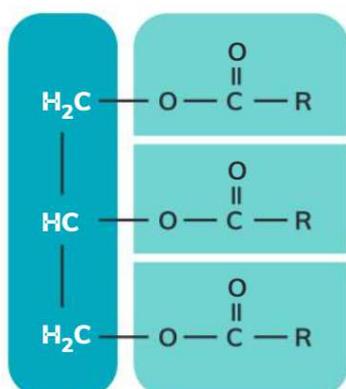
Figure 28 Evolution de la production, des importations et des utilisations de tournesol françaises. Source : Bilans de campagne FranceAgriMer.

Ce sont deux productions de commodités, dont la production transite par des infrastructures logistiques importantes notamment portuaires. Un certain nombre d'entre elles, dont les principales sont représentées sur la Figure 29, triturent le colza et le tournesol.



Figure 29 Principaux sites de trituration en France. Source : [Terres Univia](#)

4.1.2 ÉLÉMENTS DE COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DE LA BIORAFFINERIE



• Produits de la bioraffinerie

Le diagramme représenté en Figure 31 détaille les flux liés à l'utilisation du tournesol et du colza en trituration. Cette étape génère deux produits principaux :

- **Le tourteau**, fraction qui concentre les protéines de la graine, valorisée en alimentation animale. La croissance de sa production depuis les années 2005 a permis d'améliorer l'autonomie protéique française. Il existe des initiatives de valorisation du tourteau de colza en alimentation humaine bien que cela reste naissant et marginal en volume.
- **L'huile**, essentiellement constituée de triglycérides et valorisée pour l'alimentation humaine ou l'oléochimie dont l'application est détaillée ci-contre.

Figure 30 Schéma d'un triglycéride avec la partie glycérol en bleu foncé et la partie acides gras en bleu clair. R représente la chaîne carbonée. Source : Stéarinerie Dubois.

Les huiles sont, pour une petite partie des utilisations, valorisées en oléochimie. Cette science très ancienne a pour objectif de **transformer les corps gras animaux ou les huiles végétales en molécules chimiques**, telles que des alcools gras, des acides gras, des esters plus ou moins complexes, entrant dans de multiples applications telles que les savons, les lubrifiants, les tensio-actifs, les agents de rhéologie, et bien d'autres applications. Par exemple, Valtris-Champlor a débuté son activité de chimie des esters pour la production de plastifiants et lubrifiants dans les années 1960.

Depuis le début des années 1990, grâce au développement des technologies et notamment à la transposition dans le domaine des huiles et corps gras de technologies préalablement développées pour la pétrochimie (comme la métathèse par exemple), cette science évolue pour produire des **molécules de plus en plus complexes**, et notamment des **intermédiaires de synthèse qui entrent dans la préparation de polymères** (par exemple des acides dimères, ou des diacides, qui sont modifiés -ou pas- en diols ou diamines ou autres molécules bifonctionnelles de type amino-acides).

En pratique, l'huile de colza et tournesol est majoritairement destinée à deux voies :

- **L'estérification** : l'adjonction d'un alcool, le méthanol (de synthèse), aux **triglycérides** permet la production par estérification de biodiesel (Ester Méthylique d'Huile Végétale, EMHV) assortie d'une production de **glycérol**. Cette même estérification peut être réalisée pour produire des **esters d'acides gras de spécialité**, pour des utilisations en chimie. Le méthanol peut alors être remplacé par un autre alcool. Cette utilisation reste toutefois minoritaire comparée au biodiesel à échelle française.

La production d'esters d'acides gras et d'acides gras de spécialité repose sur la transformation par estérification d'acides gras qui diffèrent par la longueur de leur chaîne carbonée et le nombre d'insaturation. Les graines d'oléagineux ont des profils en acide gras différents selon l'espèce et la variété (ex : tournesol oléique, tournesol linoléique, colza, colza érucique, cameline, ricin...) qui permettent la production d'acides gras de spécialité et esters d'acides gras différents.

- **Le raffinage**, permettant la production d'huile alimentaire. Cela représente la majorité des utilisations d'huile de tournesol mais une minorité des utilisations de l'huile de colza (< 15%).

- **L'impact du soutien à la production de biodiesel sur la bioraffinerie [264]**

L'évolution de l'industrie des corps gras en France a notamment **suivi l'essor de la production du biodiesel** à partir des années 1990. L'industrie des corps gras a connu une période de croissance à partir de 2003 et la mise en place de la réglementation communautaire sur les biocarburants. Celle-ci a été renforcée en 2009, dans le cadre du « paquet énergie », par l'introduction d'une directive énergie renouvelable, avec un objectif obligatoire d'incorporation de 10% dans les carburants à l'horizon 2020. Cependant, le débat européen sur l'impact du changement d'affectation des sols indirect (CASI) en 2013 a conduit la commission européenne à proposer de **plafonner les carburants issus de cultures 1G à 5%**, ce qui a fortement remis en cause le développement du biodiesel et a été un coup de frein aux investissements, ce qui par voie de conséquence a réduit aussi l'offre en glycéline et contribué à la hausse des prix de cet intermédiaire.

- **Focus sur la valorisation du glycérol**

La valorisation de la glycéline issue de la transestérification des huiles illustre le besoin pour les industries des corps gras de développer la production de molécules nouvelles et non des molécules *drop in*.

Au tournant des années 2010, la glycéline, co-produit de la production de biodiesel, a suscité un fort intérêt comme plateforme pour la production par des approches chimiques et biotechnologiques d'un large ensemble de molécules. Cependant, hormis le projet de biotechnologies porté par Metex (production de 1,3-PDO et d'acide butyrique par fermentation de glycéline), le développement de cette plateforme a connu des désillusions industrielles (projet d'épichlorhydrine de Solvay, acide acrylique d'Arkema). La cause principale étant d'avoir visé la production de molécules *drop in* dont la synthèse biosourcée présente peu d'intérêt (molécules jugées préoccupantes, faible compétitivité économique du procédé biosourcé). Les travaux actuels visent plutôt la production de nouvelles molécules, présentant un réel intérêt (toxicité réduite, empreinte environnementale améliorée, performance technique accrue, apport de fonctionnalités), qui justifierait un vrai « green premium » sur les marchés applicatifs.

- **Complémentarité des produits de la bioraffinerie**

Encadré : la stratégie de Champlor

Champlor cherche à créer de la valeur sur ses marchés cibles historiques : huile de colza alimentaire (riche en omega 6 et 9, plus intéressante que la palme ou le soja), et tourteau de colza issu de la trituration comme co-produit riche en protéines pour l'élevage. La demande des filières élevage locales pour ce tourteau riche en protéines, garanti non OGM, avec une bonne traçabilité et un caractère local est assez importante et différencie vraiment Champlor de ses concurrents.

Parallèlement, Champlor souhaite identifier les opportunités de croissance à venir :

- Ils sont positionnés assez fortement sur la coproduction de protéines de colza pour l'alimentation humaine
- Ils travaillent sur des projets de R&D pour mieux valoriser leurs co-produits tels que les lécithines (émulsifiants, compléments alimentaire) et les stérols (compléments alimentaires)

Sur le volet biodiesel, Champlor a une stratégie de positionnement sur des segments de marché où la qualité du colza est recherchée. Ils ont moins les moyens d'aller concurrencer des gros acteurs avec de très fortes capacités de production, en particulier depuis que les quotas sont tombés, car les volumes à fournir ont dû être de plus en plus importants : ce sont les esters méthyliques d'acides gras (FAME) de palme et soja qui ont pu fournir les gros volumes pour la production du biodiesel.

4.1.1 DIAGRAMME DES UTILISATIONS

Bioraffinerie des corps gras (moyenne olympique des campagnes 2015-2016 à 2019-2020)

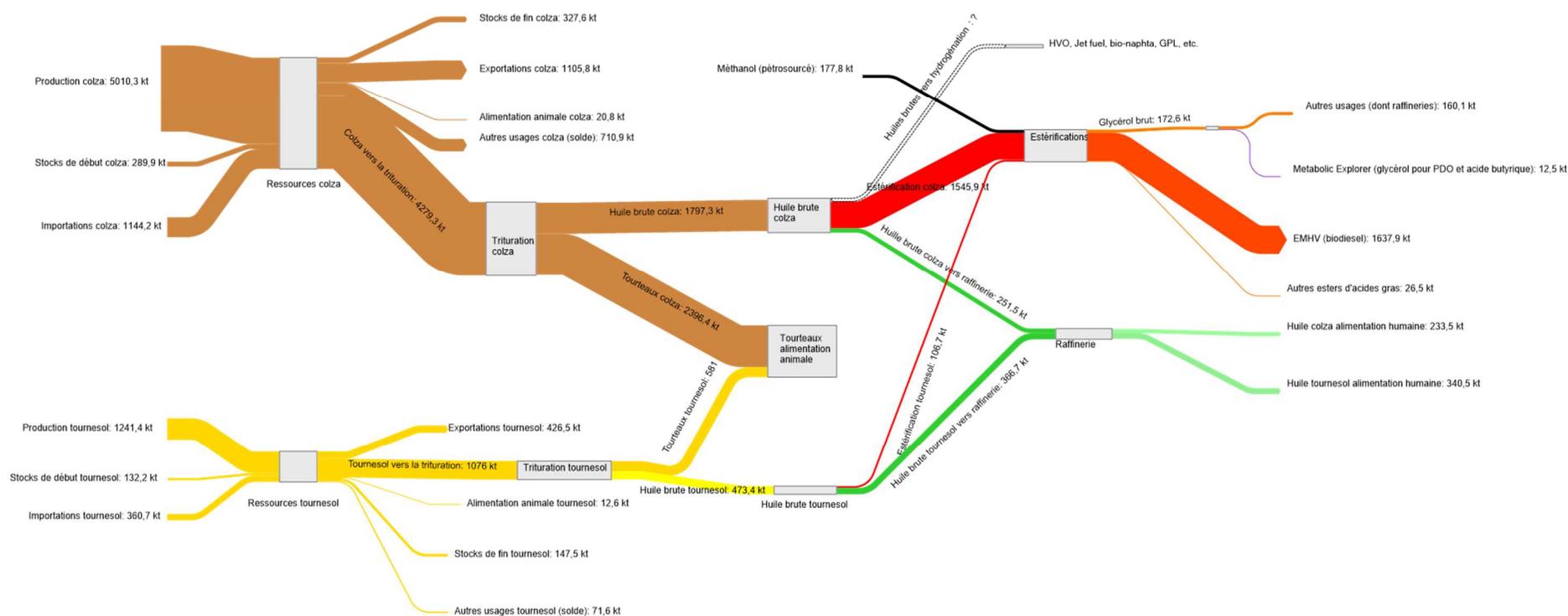


Figure 31 Bioraffinerie des corps gras. Flux exprimés en milliers de tonnes de matière sèche, hors flux d'importation de produits transformés.

4.1.2 FOCUS SUR LES PRINCIPALES BIOMOLECULES

La bioraffinerie des corps gras produit deux grands types de molécules biosourcées étudiées dans le cadre de cette étude, tous deux issus de l'estérification de l'huile :

- **Les esters d'acides gras et acides gras de spécialité**, dont la production s'est avérée difficile à estimer. Les principaux producteurs sont Oleon, filiale belge du groupe Avril disposant de 5 sites à l'échelle de l'Europe et produisant environ 25 kt d'esters et dérivés, et dans une moindre mesure la Stéarinerie Dubois (production minimale de 1,5 kt, pouvant en réalité s'élever à 5 kt). Ces esters peuvent être produits à base de triglycérides issus d'autres oléagineux que le colza ou le tournesol, ainsi que, dans le cas d'Oleon, à partir de graisses animales (suif).

Encadré : la stratégie de sourcing en biomasse d'Oleon

Le sourcing en biomasse d'Oleon, leader européen et mondial de l'oléochimie racheté par Avril en 2008, pour la fabrication d'esters et dérivés est international. Le plus gros sourcing d'Oleon reste les graisses animales (suif), recherchées pour leurs acides gras saturés à longue chaîne.

La palme représente aujourd'hui le plus important sourcing végétal, avec 20% de l'approvisionnement.

En France et en Europe, les usines s'approvisionnent essentiellement en colza et en tournesol, recherchés pour leur teneur en acides gras à longue chaîne, en particulier C16 et C18 (acides oléique, stéarique, palmitique). Parallèlement, Oleon recherche d'autres sources plus marginales, qui fournissent des acides gras particuliers (ricin, lin) à chaîne courte (coco, palmiste), ou à chaîne très longue (tournesol oléique, colza érucique).

- **Le glycérol**, qui est un polyol à trois atomes de carbone. Il s'agit d'un co-produit de la réaction de transestérification entre un alcool et les triglycérides d'une huile (on obtient environ 100 kg de glycérol pour 1t d'esters). Il peut être raffiné pour une utilisation de ses propriétés en cosmétique, pharmaceutique, alimentaire, chimie industrie. Il peut également constituer un substrat de fermentation, comme c'est le cas pour l'unité de METEX produisant du 1,3 propanediol et de l'acide butyrique en base glycérol (plus de détails dans le chapitre glycérol de l'annexe à ce rapport présentant l'analyse détaillée par molécule). Elle constitue ainsi une alternative aux molécules à 6 carbones pour la fermentation. Les procédés sont en revanche peu versatiles et il est difficile de modifier le substrat pour passer de 3 à 6 carbones ou inversement.

Le glycérol destiné à cette utilisation en fermentation représente moins de 10% de la production française totale.

Le glycérol utilisé en fermentation et la production approximée d'esters d'acides gras et acides gras de spécialité représentent 2% du total des huiles estérifiées. Le reste est destiné à la production de biodiesel et de glycérol.

4.1.3 GRANDES TENDANCES ET FORCES MOTRICES DE L'INDUSTRIE DES CORPS GRAS

- **Les conséquences à prévoir de la fin prévue des véhicules légers à moteur thermique**

La fin prévue de la vente des véhicules thermiques (transport léger) risque d'affecter la production d'EMAG à long terme et de la faire décliner. L'incorporation de biodiesel est par ailleurs plafonnée à échelle européenne. A ce jour, il existe une incertitude sur l'existence de marchés de substitution pour toute l'huile. Il existe toutefois une interrogation sur le report des huiles vers le transport longue distance, ne mobilisant alors pas nécessairement de réaction d'estérification. **Cela interroge en**

conséquence la disponibilité en glycérol, car la baisse de la production de biodiesel pourrait induire une baisse proportionnelle de la production de glycérine.

L'extension des applications des esters méthyliques d'acides gras à la chimie de spécialité sur des segments apportant plus de valeur (lubrifiants, solvants, décapage..) pourra constituer un substitut de marché pour les industriels bien qu'il ne soit pas du même ordre de grandeur en volume.

Ils se positionnent d'ores et déjà à la recherche de « premium » sur le biodiesel, sur des segments de marché où la qualité du colza est recherchée. Depuis que les quotas sont tombés, il est plus difficile d'aller concurrencer les EMAG de palme ou de soja, donc ils misent sur le **développement de filières**, notamment bas carbone (Ex : [Oleoze](#) de Saipol).

- **Le développement de projets de R&D et d'éléments de différenciation**

Différents drivers animent l'évolution globale de la bioraffinerie des corps gras. Le premier d'entre eux est la volonté de **réduction de l'empreinte carbone et d'amélioration de l'ACV** de leurs produits (sourcing de méthanol alternatif au pétrosourcé).

De plus, les industriels **développent de nouveaux procédés, notamment biotechnologiques**. L'intérêt des multiples tentatives de développement technologiques est qu'elles ont permis de commencer à aborder de nouvelles technologies pour le secteur de l'oléochimie, qui permettent aux oléochimistes d'élargir le champ des possibilités. Cela est d'autant plus pertinent lorsque l'on part de molécules possédant différents sites réactionnels telles que celles présentes dans les huiles de colza et de tournesol. L'usage des biotechnologies dans l'industrie des corps gras pourrait être envisagée dans trois domaines d'activité principaux :

- **La production d'huile par voie fermentaire.** De nombreux travaux à partir de levure ont été menés, pour développer des huiles pour biocarburants ou comme matière première pour la chimie
- **La bioconversion d'huile (ou d'acides gras ou d'esters) en molécules d'intérêt**
- **La transformation de glycérol en molécules complexes**

Toutefois, de même que chez les amidonniers et les sucriers, il y a une certaine **frilosité de la part des agro-industriels à investir dans des start-ups de biotechnologies**. Ce phénomène s'explique probablement par les investissements que cela représente, le risque technologique et l'incertitude lié au manque de maturité des chaînes de valeur pour les biomolécules issues de ces procédés. Dans la même veine, le transfert est actuellement limité pour des investissements de recherche faits aux Etats-Unis sur certaines biomasses comme le soja, aux cultures de colza-tournesol (ex : projets d'éthoxylation d'huiles). Les investissements très élevés, nécessaires au développement de ces programmes de recherche, empêchent en effet les acteurs français d'aller seuls sur ce type de projets d'envergure.

Bien qu'il y ait des développements récents et des tentatives d'apport de valeur ajoutée grâce à une valorisation plus intégrée de co-produits (distillats de désodorisation, huiles acides, condensats de désodorisation...) et au développement de procédés biotechnologiques (conversions enzymatiques et bioconversions/fermentation pour la production de molécules à moyenne-haute valeur ajoutée comme des anti-oxydants), **les unités de trituration et raffinage des graines oléagineuses sont encore loin de s'apparenter au degré de fractionnement des amidonneries de blé ou de maïs.**

- **L'amélioration de la complémentarité des différents produits de la bioraffinerie.**

Il existe une forme de séparation entre alimentation et chimie qui pourrait être atténuée afin de penser les valorisations comme un continuum de valeur. Par exemple, améliorer la valorisation des différentes fractions du colza (protéines pour la nutrition, chimie biosourcée, esters, glycérine) permettrait aux industriels français de se différencier par rapport aux pays concurrents. On peut également supposer

qu'une amélioration des valorisations des fractions favoriserait une plus forte valeur ajoutée au niveau agricole également. En ce sens, on observe des projets de R&D pour avoir une approche de **valorisation plus intégrée des co-produits** (lécithines, stérols, distillats de désodorisation...).

De même, les acteurs sont dans une démarche de consolidation des marchés historiques par la **production huiles alimentaires de qualité supérieure par rapport aux huiles de palme et de soja** (richesse en oméga 6 et 9). Cela concerne également les **tourteaux à destination de l'alimentation animale**. Sur ce marché, un axe de différenciation consiste notamment à améliorer la **traçabilité** des filières locales avec des tourteaux plus qualitatifs (qualité des protéines) et garantis sans OGM. **La garantie sans OGM est un facteur différenciant également le glycérol français**, qui rencontre une demande croissante en cosmétique mais aussi en biotechnologies (cas de METEX).

Enfin, on observe le développement de l'utilisation de glycérol en tant que plateforme chimique, présentant une opportunité d'amélioration de la valeur ajoutée sur cette fraction. Ce développement est cohérent avec une demande croissante : époxydes (construction, automobile), acide acrylique, propylène-glycol, 1,3 propanediol. La glycérine a toujours un intérêt pour les applications historiques (cosmétique, alimentaire, pharmaceutique, applications techniques) mais les prix ont explosé donc le marché stagne. Ce n'est plus un produit stratégique pour les leaders du marché, qui a longtemps permis de faire de la marge sur la fabrication de biodiesel.

- **Les tentatives d'incursion sur le marché des huiles issues d'oléagineux non cultivables en France.**

Les huiles de colza et tournesol sont **riches en acides gras polyinsaturés**, ce qui limite le développement de nouvelles applications de spécialité au-delà des applications traditionnelles dans les lubrifiants. Ce propos est toutefois à nuancer car les polyinsaturations constituent des zones de fonctionnalisation, permettant la production de certaines molécules d'intérêt. **Leurs profils en acides gras (longueur des chaînes carbonées) ne permettent par ailleurs pas de disposer d'un panel d'acides gras suffisamment vaste à échelle nationale pour adresser la totalité des utilisations des acides gras**. Cela les empêche de déloger, par exemple, le soja ou la palme pour certaines applications nécessitant des fonctionnalités particulières. Cela contribue également à limiter les incorporations sur des marchés à haute valeur ajoutée comme la cosmétique. Les acteurs de la cosmétique attendent par ailleurs un *story-telling* intéressant et privilégient des huiles atypiques.

Un autre driver important pour les oléochimistes français est de **réduire leur dépendance au sourcing en huile de palme, coco et ricin**, afin de réduire l'empreinte écologique de leurs produits. La composition des huiles de tournesol et colza étant très différente de celle de l'huile de palme et de coco, les oléochimistes ne pourront pas substituer complètement ces huiles importées (car les huiles de colza tournesol ne contiennent pas de C12-C14). Un des leviers est là encore de recourir aux biotechnologies industrielles (C-investissement récent de 120 M\$ entre Unilever et Genomatica pour développer des alternatives à l'huile de palme pour la production d'ingrédients cosmétiques par voie biotechnologique [263])

4.2 BIORAFFINERIE DU SUCRE DE BETTERAVE

PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Les poids de la production de sucre cristallisé (60% de la MS des jus bruts) et de l'éthanol (15 à 20% des utilisations de la betterave dont 35 à 40% est valorisé en biocarburants) sont significatifs dans les utilisations de la betterave.

Les **arbitrages sur le mix produit réalisé dans les sucreries éthanolerie sont difficiles à anticiper** et très variables d'une année sur l'autre : sucre, EP1, EP2, mélasse, éthanol.

Les **perspectives sur l'offre en betteraves sont incertaines** : fin des néonicotinoïdes, changement climatique, cours du sucre...

Les **utilisations des produits de la bioraffinerie sont croissantes notamment en fermentation** (dont levurerie, biotechnologies, éthanol chimie)

Le secteur des biotechnologies dispose d'une capacité à utiliser du carbone issu de céréales (glucose parfois même préféré à la mélasse) à la différence du secteur levurier. Celui-ci annonce des croissances « modestes » de la production française de molécules biosourcées (hors 1,3 butadiène base éthanol).

Une **baisse des disponibilités en pulpes** est à prévoir compte tenu de l'essor de la **méthanisation**

 Une **asymétrie offre / demande est à anticiper pour cette bioraffinerie. Le secteur de la levurerie en particulier est affecté** par la baisse des disponibilités en mélasse française.

4.2.1 DYNAMIQUES DE LA PRODUCTION FRANÇAISE DE BETTERAVES

La production française de betteraves mobilise 423 000 ha (2020) soit **3% de la surface en grandes cultures françaises**. Elle se situe principalement dans le Nord de la France (Figure 32), à proximité d'outils industriels dont le nombre est en baisse tendancielle, marqué par la fermeture de quatre outils depuis 2019 notamment en Normandie et dans le Puy de Dôme. La filière française compte aujourd'hui 21 sucreries appartenant principalement à deux groupes sucriers : Tereos et Cristal Union.

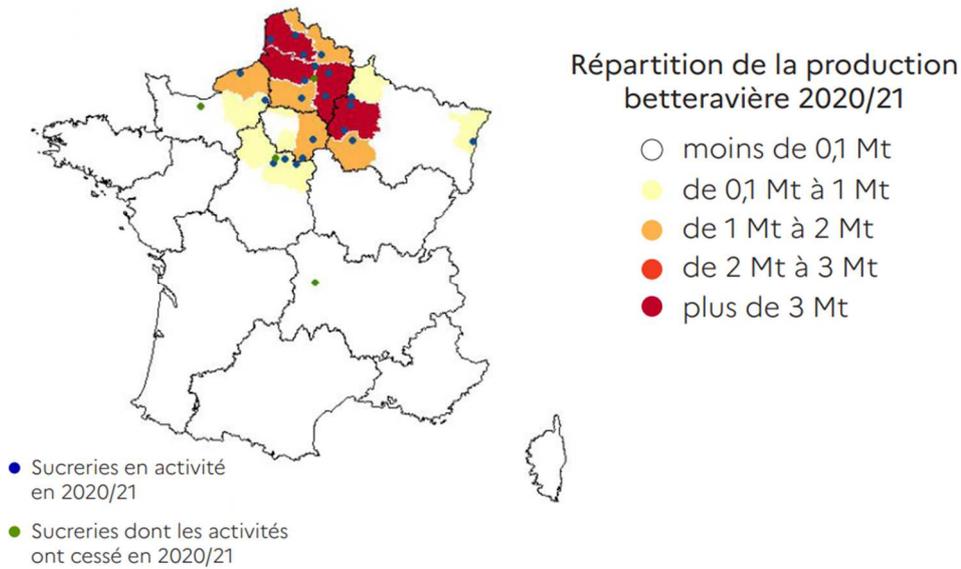


Figure 32 Répartition de la production betteravière 2020/21. Source : [Fiche filière sucre](#)

La production de betteraves, historiquement variable entre 30 et 35 Mt eq betteraves à 16°, a subi lors des six dernières années de **forts à-coups** (Figure 33).

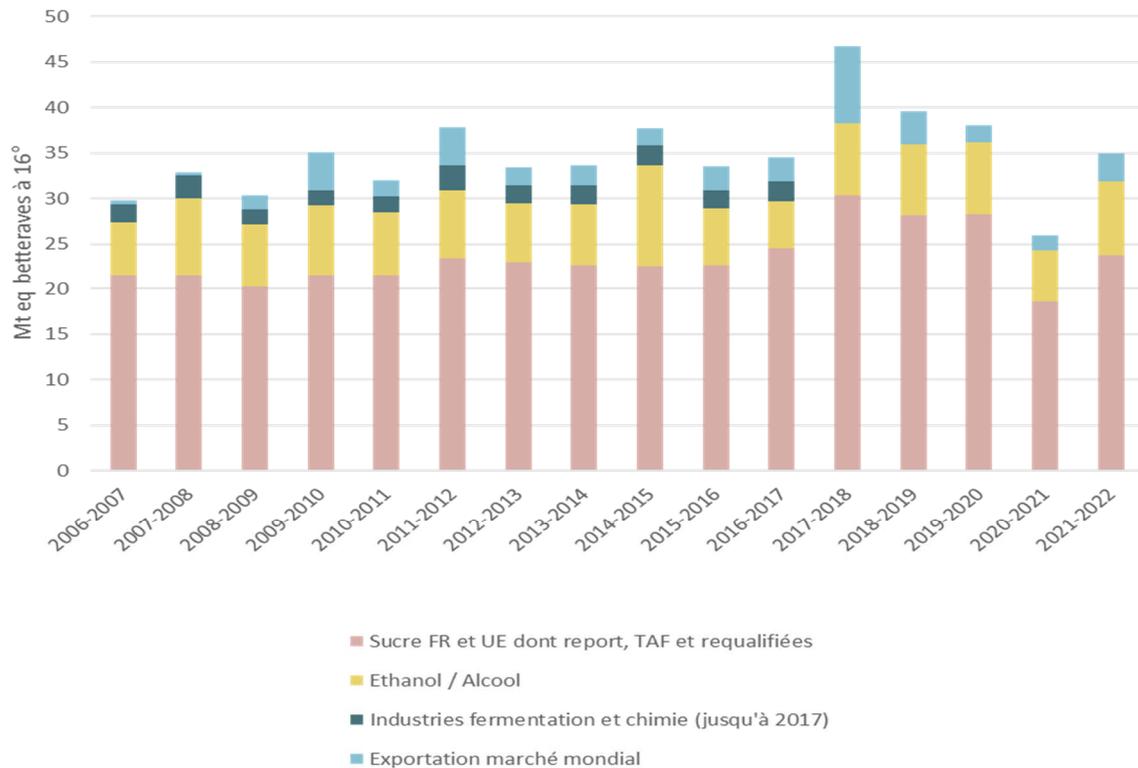


Figure 33 Evaluation de la production et des utilisations de la betterave française. Source : CGB.

Bien qu'ils soient provoqués par divers facteurs agronomiques et économiques, deux se distinguent par la force de leur impact sur la production.

Premièrement, l'arrêt du système européen de quotas de production le 1er octobre 2017, qui a provoqué une libéralisation du secteur et une augmentation des surfaces cultivées et de la production, bien visible sur la campagne 2017-2018 (+21% en 1 an). En parallèle, le marché mondial du sucre est devenu excédentaire, notamment grâce à des rendements exceptionnels en Inde. Ces 2 phénomènes ont généré des excédents d'offre et une baisse du prix du sucre qui a fortement impacté la filière française et l'a contrainte à rationaliser ses sites de production (fermetures de sucreries).

Deuxièmement, la culture de la betterave est vulnérable au développement de certaines maladies, ravageurs et adventices dont la gestion fait souvent appel à des traitements phytosanitaires, à une fréquence soutenue en comparaison d'autres grandes cultures. L'IFT total moyen avec adjuvant est parmi les plus élevés et s'élève à 20,2 d'après l'enquête pratiques culturales 2017, du même ordre de grandeur que celui de la pomme de terre à 20,1 mais significativement supérieur aux autres grandes cultures pour lesquelles il se situe entre 3 et 7 en moyenne. La betterave souffre en particulier des **virus de la jaunisse de la betterave**, transmis par des pucerons. La lutte contre ce puceron s'opère grâce à l'utilisation d'insecticides de la classe des **néonicotinoïdes**. La dynamique réglementaire visant à diminuer l'utilisation de pesticides a affecté les néonicotinoïdes, interdits en France le 1^{er} septembre 2018 pour le danger qu'ils représentent pour les pollinisateurs. Suite à des difficultés agronomiques majeures provoquant de fortes baisses de rendement (62 t/ha en 2020/21 contre 82t/ha en moyenne quinquennale), la filière betterave bénéficiait d'une dérogation de 3 ans (loi de décembre 2020) afin de rechercher des solutions alternatives pour la gestion de ce virus. En janvier 2023, la Cour de justice de l'Union européenne a toutefois jugé que la France ne pouvait déroger à cette interdiction. Le 7 mars 2023, la direction de Tereos a annoncé la fermeture de la sucrerie d'Escaudœuvres.

Compte tenu des points suscités, il n'est plus question de croissance et la production française de betteraves tend à se stabiliser au niveau d'avant quotas, malgré des cours du sucre en hausse à l'échelle mondiale (Figure 34).



Figure 34 Les cours mondiaux du sucre blanc. [Source](#)

4.2.2 ELEMENTS DE COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DE LA BIORAFFINERIE DU SUCRE

Le procédé d'extraction du sucre consiste en une série de cristallisations, produisant d'une part du sucre cristallisé et d'autre part, une fraction appauvrie en sucres.

- Le jus vert peut être adressé en première cristallisation ou en fermentation éthanologique. Elle produit du sucre cristallisé et du Sirop de Haute Pureté (SHP) ou Egout Pauvre 1 (EP1)
- Le SHP peut être adressé en seconde cristallisation ou en fermentation éthanologique. Elle produit du sucre cristallisé et du Sirop de Basse Pureté (SBP) ou Egout Pauvre 2 (EP2) dont la teneur en sucre est de 40%.
- Le SBP peut être adressé en troisième cristallisation, en fermentation éthanologique ou vendu pour être fermenté. Elle produit du sucre cristallisé et de la mélasse, qui contient 48% de sucre mais celui-ci n'a pas pu être extrait par le procédé industriel. La mélasse est donc ensuite valorisée en fermentation ou en alimentation animale.
- La mélasse peut être adressée en fermentation éthanologique ou vendue.

L'ensemble des liquides contenant des sucres (jus vert, EP1, EP2, mélasse), y compris des mélanges de jus, peuvent être fermentés dans une éthanolerie produisant de l'éthanol.

La cartographie des flux de la sucrerie nationale se heurte au fait que les sucreries opèrent au cours de chaque campagne des arbitrages pour ajuster le nombre de cristallisation réalisées. Cela leur permettant d'ajuster leur mix produit (sucre / EP2 / mélasse / éthanol) aux cours mondiaux du sucre, de l'éthanol et de l'énergie nécessaire à la cristallisation.

Ainsi, sans agréger les données des industriels, il est impossible de connaître la part du sucre initialement contenu dans la récolte en betteraves française qui est transformé via 3 cristallisations.

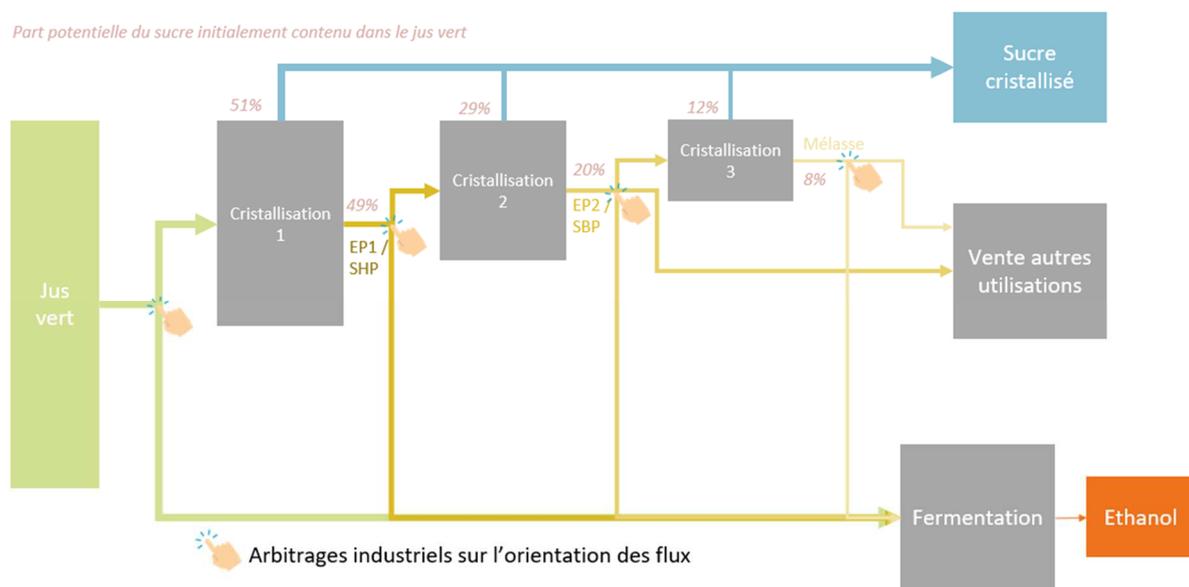


Figure 35 Schéma de la succession d'arbitrages industriels potentiels dans une sucrerie

La cartographie produite n'est donc pas détaillée à ce niveau.

4.2.1 DIAGRAMME DES UTILISATIONS

La bioraffinerie du sucre en France (moyenne olympique des campagnes 2015-2016 à 2019-2020)

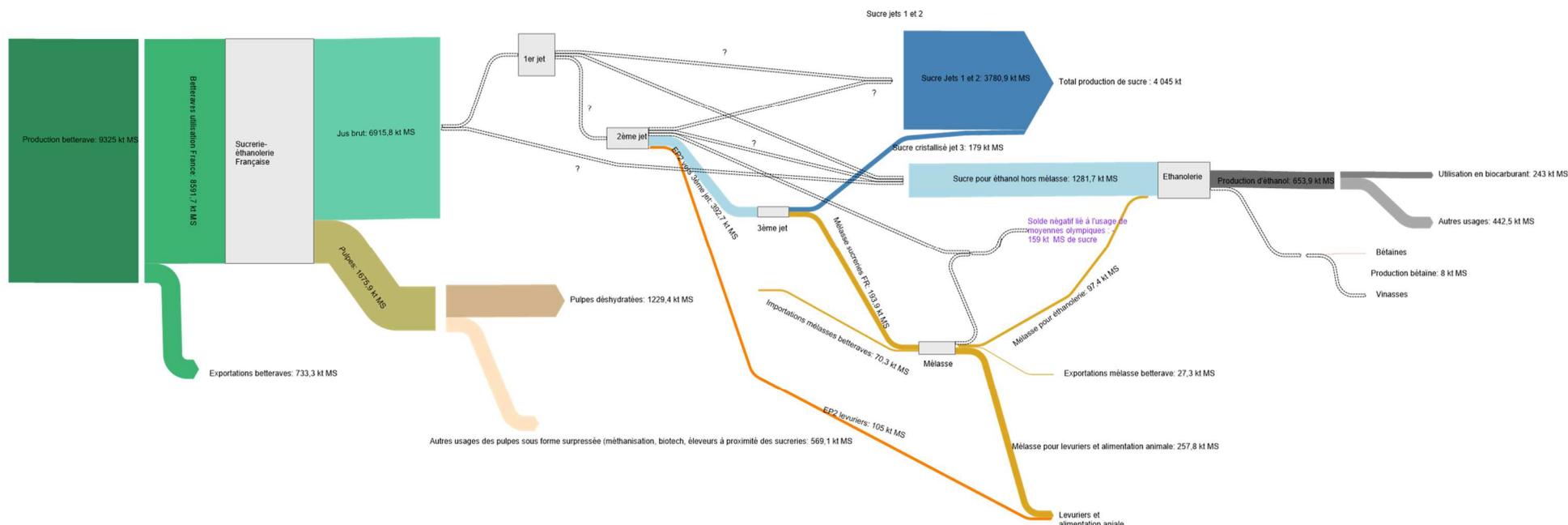


Figure 36 La bioraffinerie de la sucrerie-éthanolerie. Flux exprimés en tonnes de matière sèche, hors flux d'importation de produits transformés à l'exception de la mélasse.

Ce diagramme met en évidence la diversité des produits de la bioraffinerie : sucre cristallisé, pulpes de betteraves, EP1, EP2, mélasse, vinasses, éthanol. Le sucre cristallisé demeure le principal produit. En effet, les sucres cristallisés obtenus représentent environ 60% de la matière sèche des jus bruts et la production de sucre blanc de betterave commercialisée s'élève à 4 Mt (moyenne olympique des campagnes 2015-2016 à 2019-2020, données Prodcum) alors que la production française est de 4,7 Mt dans le rapport d'activité de la CGB. Cette valeur est en effet difficile à estimer pour les raisons suivantes :

- L'impossible reconstitution des flux d'EP1, d'EP2 et de mélasse vers la production de sucre ou d'éthanol en raison du secret statistique et des changements perpétuels d'arbitrage entre les fractions en fonction des cours du sucre et de l'éthanol.
- Les possibles biais au niveau des stocks réalisés et du pas de temps considéré, certains chiffres étant exprimés par campagne alors que d'autres le sont en années civiles

Le diagramme montre le **poids significatif de la production de l'éthanol biocarburant** parmi l'ensemble des autres utilisations. Il constitue, selon les années, 15 à 20% des utilisations de la betterave.

Un calcul du solde entre le contenu théorique de la récolte française de betteraves et la somme des utilisations identifiées hors industries des biotechnologies révèle, **quelle que soit la source statistique mobilisée** pour la production de sucre, **un solde théorique négatif pour cette bioraffinerie, alors que les consommations pour les biotechnologies n'ont pas encore été comptabilisées. La consommation de ces dernières doit être nuancée car elles pourront aussi, pour la majorité, utiliser du carbone issu de céréales (glucose).**

L'offre en betterave étant dans une phase de stabilisation, et les différentes demandes plutôt en croissance, une asymétrie entre offre/demande est possible à court terme pour la bioraffinerie du sucre. Dans tous les cas, les marges de manœuvre semblent faibles sans faire appel à de l'import. Ce sujet a d'ailleurs fait l'objet de communications régulières de la part du secteur de la production de levure, ce dernier étant très dépendant de la production de mélasse¹.

¹ Communiqué de presse de la Chambre Syndicale Française de la Levure, 8 juin 2020. Alerte de la filière française de la levure : pour son développement en France, l'industrie de la levure demande un accès sécurisé à ses matières premières.

4.2.2 FOCUS SUR LES PRINCIPALES MOLECULES BIOSOURCEES

Les principales molécules biosourcées étudiées dont la fabrication utilise les produits de la sucrerie comme matières premières sont majoritairement des **produits de fermentation** : **acides aminés, acides organiques, isobutène, éthanol**.

Pour un certain nombre d'entre elles, la souche est capable de métaboliser le glucose issu d'amidonnerie au lieu de saccharose issu de sucrerie. Il existe donc une forme de **versatilité** des microorganismes à ce niveau, qui, si elle est complétée d'une versatilité du procédé, peut conférer à l'ensemble de la production de molécule la possibilité de changer de matière première. C'est le cas par exemple du procédé de production de l'isobutène de Global Bioenergies² (plus de détail dans l'annexe à ce rapport détaillant l'analyse par molécule, chapitre Isobutène).

D'après les experts, la production d'acide glutamique est d'ailleurs plutôt utilisatrice de glucose que de saccharose.

Un focus peut être porté sur la fermentation réalisée par **Afyren** pour la production d'acides organiques. Elle présente la particularité de pouvoir **fermenter les glucides** (sous forme de sucre et de cellulose) **contenus dans les vinasses et les pulpes de betterave** et les transformer en molécules à plus haute valeur ajoutée. Elle valorise ainsi des produits de la sucrerie jusque-là principalement destinés à l'alimentation animale ou à la méthanisation pour les pulpes et à la fertilisation pour les vinasses (plus de détail dans l'annexe à ce rapport détaillant l'analyse par molécule, chapitre Acides organiques).

Une dernière molécule étudiée est **la bêtaïne, molécule extraite de vinasse de betterave**. Le procédé d'extraction présente l'intérêt de très peu modifier la matière première ce qui permet son entière valorisation ultérieure, malgré l'extraction de bêtaïnes. Une seule unité produit de la bêtaïne en France, il s'agit du site de Tereos d'Origny-Sainte-Benoîte, qui en produit 8 kt par an (plus de détail dans l'annexe à ce rapport détaillant l'analyse par molécule, chapitre Bêtaïnes).

4.2.3 GRANDES TENDANCES ET FORCES MOTRICES

Plusieurs freins au développement des bioraffineries de sucre de betterave ont été mis en évidence dans les paragraphes précédents :

- Interdiction en Europe de produits phytosanitaires (néonicotinïdes) sans solutions alternatives associés à des problématiques agronomiques de maladie et ravageurs (jaunisse virale)
- Controverse sociétale sur une culture à fort IFT.
- **Baisse des disponibilités en mélasse en lien avec l'impact de la hausse du coût de l'énergie sur le troisième jet.**

Par ailleurs, en octobre 2022, l'Union européenne a entériné le premier accord sur un texte du paquet climat européen, qui prévoit **l'interdiction des ventes de voitures et véhicules utilitaires légers neufs à essence et diesel, ainsi que des hybrides d'ici à 2035** [270]. Cet accord représente un changement

² [Global Bioenergies adapte son procédé Bio-Isobutène au saccharose – Global Bioenergies \(global-bioenergies.com\)](https://www.global-bioenergies.com)

potentiellement important pour le modèle économique des sucreries-éthanoleries, puisqu'il induit une **perspective de diminution de la demande en bioéthanol à usage carburant**, qui représente environ 62% de la production totale d'éthanol en France [39].

La bioraffinerie du sucre de betterave dispose toutefois de plusieurs leviers potentiels pour anticiper cette diminution de la demande en bioéthanol carburant, et trouver de nouveaux relais de croissance :

- La **demande du secteur de la levurerie** qui demeure soutenue.
- **Le développement de l'utilisation de l'éthanol technique** comme synthon pour la chimie, pour les produits ménagers, en pharmacie, en cosmétique ou en parfumerie. Sur certaines applications de spécialité en cosmétique, il existe en effet une opportunité de **différenciation et d'apport de valeur** sur des marchés de niche en développant des gammes d'éthanol certifié biologique, ce qui correspond à une demande croissante des consommateurs [17][25].
- **La production d'éthanol peut être détournée vers des applications en chimie du végétal**, comme pour la production de 1,3-butadiène, par le procédé développé par Michelin. Toutefois, les capacités de production annoncées de la future usine (100 kt/an, projet BioButterFly) impliqueront une consommation très importante de bioéthanol en amont, qui pourrait représenter 20% de la production totale. Le développement de projets industriels d'une telle ampleur devra donc s'accompagner d'études prospectives afin d'identifier d'autres sourcing d'éthanol de 2ème génération pour compléter l'approvisionnement.
- La demande en croissance pour les marchés de la fermentation, en particulier la levurerie (fermentation de précision) et les biotechnologies.
- **La construction de nouveaux partenariats d'approvisionnement en co-produits (mélasses, EP2, pulpes, vinasses) avec des acteurs du secteur des biotechnologies.** A l'heure actuelle, les industriels des biotechnologies fermentaires, consomment de faibles volumes de co-produits de l'industrie sucrière. A titre d'exemple, Afyren consomme des vinasses et mélasses de betterave, mais celles-ci proviennent essentiellement d'Allemagne, tandis que Metabolic Explorer et Ajinomoto utilisent un mix de biomasses pour la production d'acides aminés, provenant de sucreries (EP2, mélasses), mais surtout d'amidonneries-glucoseries. Des partenariats notables ont toutefois été établis au cours des dernières années entre des sucriers et des start-up de biotechnologies industrielles, à l'image de l'accord entre Cristal Union et Global Bioenergies, établi depuis 2015, pour la production d'isobutène [271]. La résilience d'un certain nombre de procédés de fermentation à un changement de la source de glucides utilisée peut avoir une influence sur la demande des acteurs des biotechnologies pour les co-produits de la betterave sucrière. Plusieurs industriels réfléchissent ainsi à se tourner vers des sources alternatives de glucides, en raison des augmentations importantes que la mélasse a subi dernièrement. Parmi les gisements considérés figurent notamment le corn steep liquor et les mélasses de canne à sucre.

4.3 BIORAFFINERIE DE L'AMIDON DE CEREALES

PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS

Les disponibilités en maïs et en blé ne sont à ce jour pas limitantes

- L'alimentation animale (environ la moitié) et les exportations (50% du blé et 34% du maïs) représentent de fortes part des utilisations
- L'amidonnerie-éthanolerie représente respectivement 12 et 16% des utilisations des ressources en blé et maïs (production, importations et stocks)
- L'éthanol représente 4% des utilisations dont une majorité est valorisée en biocarburants (80% pour le blé, 100% pour le maïs)

Une demande qui pourrait s'orienter vers des applications à plus forte valeur ajoutée :

- Le marché de l'éthanol énergie (> 80% des utilisations de l'éthanol de céréales) est en croissance à court terme (E85) mais pourrait se contracter à long terme avec la fin annoncée des ventes de véhicules neufs à moteurs thermiques.
- Des relais de marchés potentiels existent pour l'éthanol en tant que plateforme pour la chimie (ex : projet de Michelin sur le 1,3 butadiène, polymères...)
- Un report potentiel de la fermentation vers le glucose pourrait s'opérer en lien avec la baisse de la disponibilité en mélasse.

 L'étude n'a pas mis en évidence de tensions sur la ressource en produits issus d'amidonnerie-éthanolerie à court ou moyen terme. Il existe de fortes marges de manœuvres pour les différents types de transformation en arbitrant les flux. Les capacités de production du glucose peuvent évoluer à la hausse (déblocage de capacités de production) afin de pourvoir aux besoins croissant de la fermentation (biotechnologies), à la différence de la mélasse.

4.3.1 PRODUCTION FRANÇAISE DE CEREALES

Le blé et le maïs constituent 74% de la production française de céréales (respectivement 53% et 21%). Leur production est répartie sur toute la France hormis le Sud-Est et recouvre respectivement 40% et 12% des surfaces cultivées en grandes cultures.

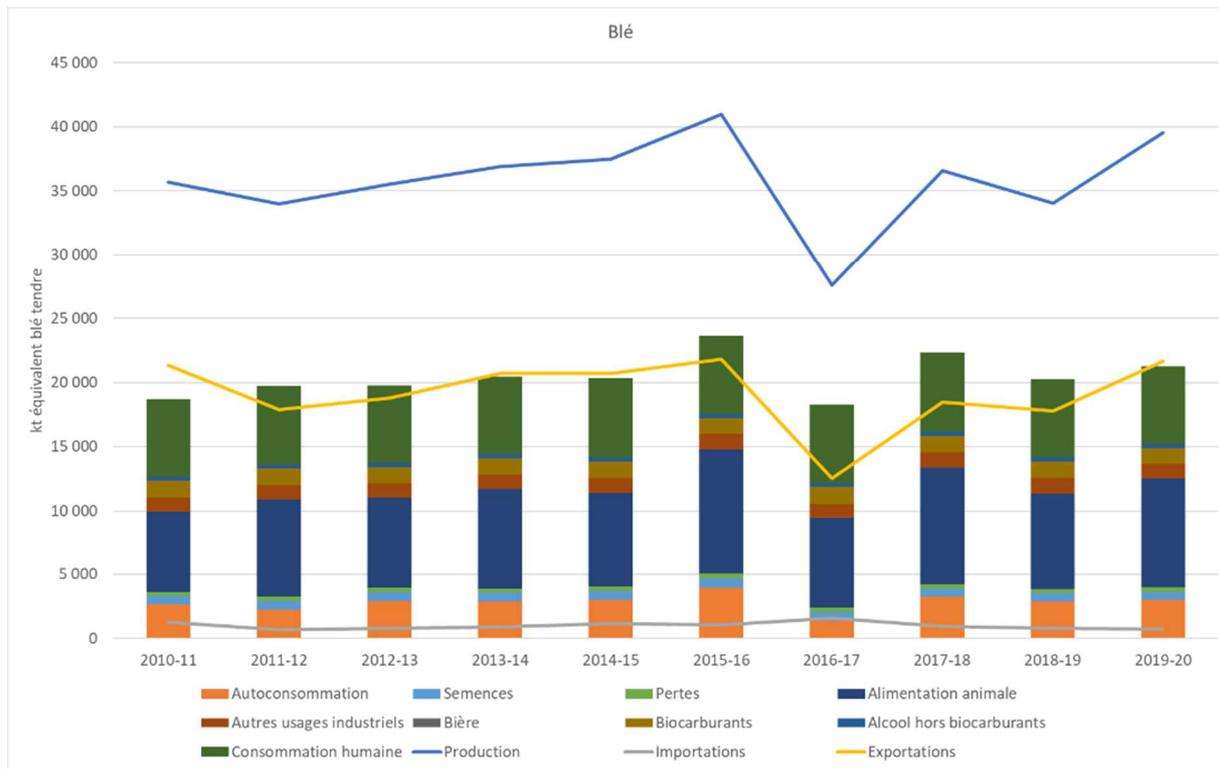


Figure 37 Production, importations et utilisations du blé français, par campagne. Source : bilans de campagne FranceAgriMer

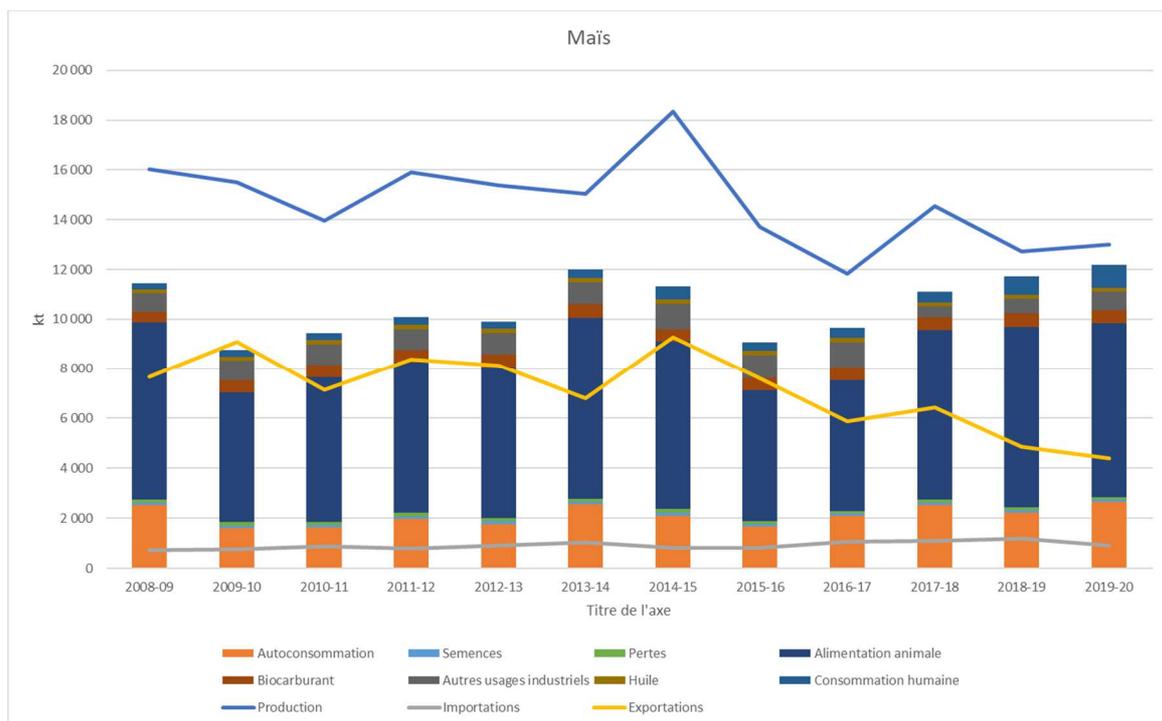


Figure 38 Production, importations et utilisations du maïs français, par campagne. Source : bilans de campagne FranceAgriMer

En tendance, les **surfaces** cultivées en blé sont relativement **stables** aux alentours de 5 Mha, à la différence du maïs dont les surfaces sont en légère baisse. Le début des années 2000 marque la **fin d'une période de plusieurs dizaines d'années de croissance des rendements** céréaliers. La croissance,

selon les espèces considérées, est ralentie sinon à l'arrêt, en conséquence de différents facteurs parmi lesquels figure le changement climatique. Celui-ci induit par ailleurs une variabilité accrue des rendements, comme cela est visible sur les figures ci-dessous.

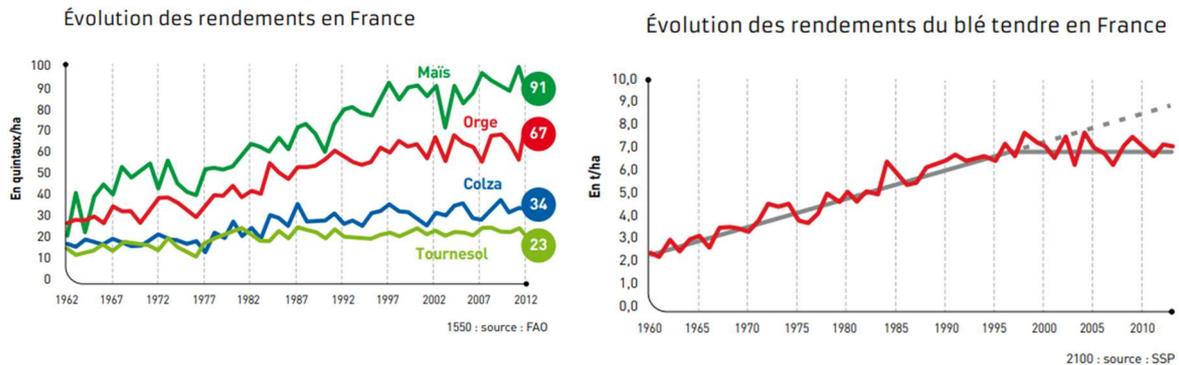


Figure 39 Evolution des rendements en grandes cultures en France. Source : Revue_Chambres-agriculture_1031_2014_Rendements_Grandes_Cultures.pdf

La production française de céréales, malgré un plafonnement des rendements, est relativement stable et à des niveaux élevés. Elle est répartie à l'échelle du territoire métropolitain, ce qui limite le risque d'affectation de la récolte par un aléa climatique à échelle nationale. De plus, en comparaison de la betterave, le blé et le maïs grain sont des productions agricoles primaires de commodités, pour lesquelles il existe des canaux d'importation et d'exportation établis et importants. Un déficit de production nationale pourrait être compensé par cette voie à la différence de la betterave dont la bioraffinerie est plus dépendante d'une production locale.

D'un point de vue plus prospectif, la production de maïs grain française bénéficie sur plus du tiers de ses surfaces de l'irrigation (Statistique Agricole Annuelle 2020), permettant de forts rendements. L'augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse et les controverses sociétales montantes concernant les usages de l'eau peuvent constituer une limite à la production de maïs nationale. La production de blé, comme pour les autres grandes cultures mobilise (hors bio) des intrants de synthèse dont l'utilisation pourrait être diminuée dans les années à venir pour des raisons économiques (ex : prix des engrais en hausse d'un facteur 3 en deux ans) et sociétales portées par des projets de réglementation (diminution de l'utilisation des engrais azotés de synthèse prévu par la loi Climat Résilience. Absence de réhomologation de certains produits phytosanitaires). Cela pourrait avoir un impact sur les rendements et les surfaces cultivées.

Toutefois, il est à noter que la production est actuellement principalement destinée à l'exportation (50% de la production de blé et 34% de la production de maïs) et à l'alimentation animale (Figure 37, Figure 38). En cas de baisse de la production nationale, des arbitrages entre les différentes utilisations pourrait s'opérer à la marge.

4.3.2 ELEMENTS DE COMPREHENSION DU FONCTIONNEMENT DE LA BIORAFFINERIE

L'amidonnerie et l'éthanolerie de céréales sont considérées simultanément compte tenu de la similitude du procédé de transformation initial des céréales et du fait que certaines unités de production couplent production d'amidon et d'éthanol. Le grain de céréales est broyé ce qui permet l'extraction, plus ou moins poussée, d'amidon (Figure 40).

Au sein de l'amidonnerie, l'objectif peut être double : l'extraction et la purification du polymère, l'amidon, ou son hydrolyse sous forme de glucose (glucoseries).

- **Historique [1] [4]**

La production industrielle de l'amidon a débuté au XIXème siècle et s'est développée au XXème siècle. Le développement de l'utilisation d'enzymes dans les procédés a permis de rendre l'amidon utilisable comme matière sucrante, ce qui a largement contribué à l'extension de cette industrie. Aux Etats-Unis, l'utilisation de l'amidon est très différente : une grande partie est utilisée pour fabriquer du bioéthanol et des sirops de glucose riches en fructose, deux applications qui ont également contribué à l'essor de l'industrie amidonnière.

- **Typicité des amidonneries-glucoseries [1] [4]**

Il existe deux types principaux d'amidonnerie en France : base blé et base maïs. Les autres types d'amidonnerie rencontrées sont davantage qualifiées de féculerie (pommes de terre, pois).

Chaque matière première (maïs, blé, féculer) nécessite une suite d'opérations et des technologies de transformations propres. Les opérations de séparation reposent essentiellement sur les différences de densité des parties ou des composants de la matière première.

Concernant le maïs, il est séché après récolte pour assurer sa conservation et son utilisation tout au long de l'année. Ensuite, l'extraction par voie humide permet d'obtenir une meilleure séparation des constituants : trempage, broyage/dégermage, broyage/tamissage, raffinage/séparation, puis séchage [4][6][7][8].

Pour le blé, il s'agit d'une activité de meunerie en tête, puis la pâte de farine est raffinée et séparée pour concentrer ensuite les fractions protéiques et l'amidon, qui sera partiellement hydrolysé en sirop de glucose. Il reste de ce procédé une fraction soluble qui sera aussi valorisée. Dans une éthanolerie, le principe est le même, et le glucose obtenu est ensuite fermenté pour produire du bioéthanol.

Toutes les fractions de l'amidonnerie sont valorisées :

- › Le **son de blé** est valorisé en nutrition animale, et participe à l'équilibre économique de la bioraffinerie puisqu'il se vend à 65-70% du prix du blé.
- › Le **gluten** se valorise dans l'industrie agro-alimentaire pour des applications en biscuiterie, dans les analogues de viande, et sous forme native pour donner de la force à des farines ou dans des applications en nutrition.
- › Les **solubles de blé** sont valorisés de différentes manières. La fraction riche en fibres et gommes est vendue pour l'alimentation animale, la fraction riche en protéines et amidon est hydrolysée en sucres. Le **sirop de glucose** obtenu peut être vendu à une unité de production de bioéthanol.
- › **L'amidon** est également bien valorisé pour différentes applications : il est souvent séché pour des applications alimentaires et industrielles (l'application dans les papiers-cartons est la principale application industrielle. La demande est très cyclique). Selon la demande des marchés, une partie plus ou moins conséquente de l'amidon sera hydrolysée en sirops de glucose.

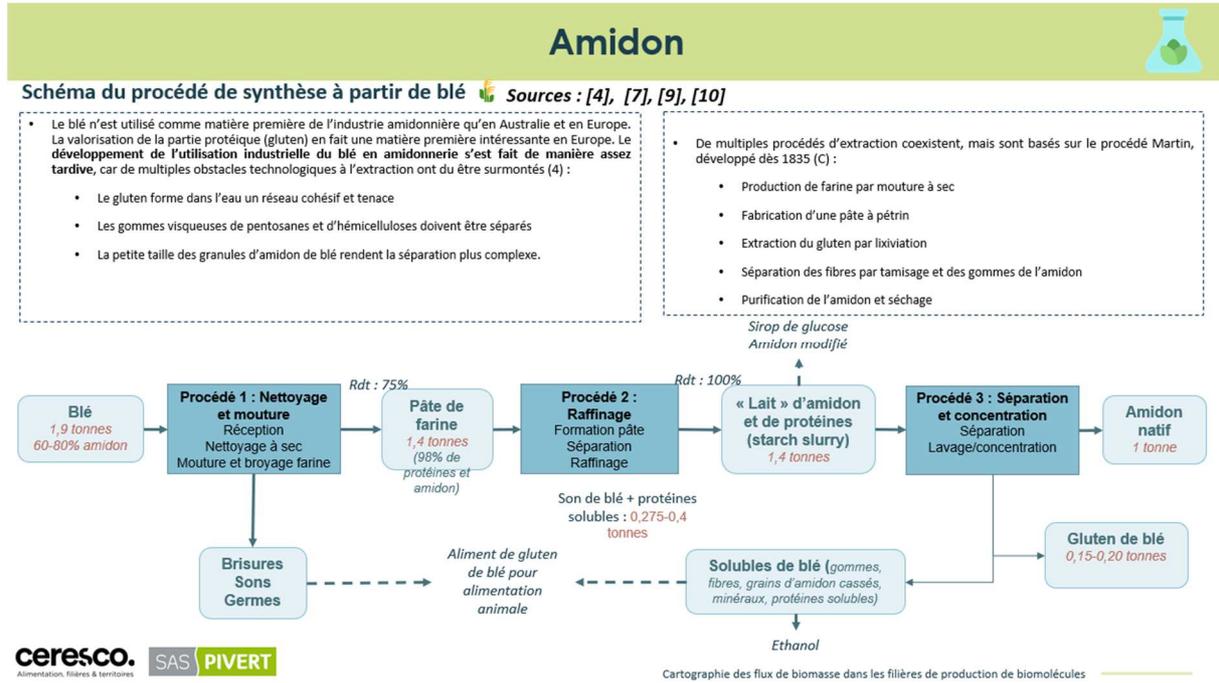


Figure 40 Schéma du procédé de synthèse de l'amidon à partir de blé. Plus de détails dans l'annexe de ce rapport, chapitre Amidon

L'amidonnerie est une industrie lourde qui utilise des tonnages importants de matière première (25 Mt de matière première dans l'UE en 2020) et des CAPEX/OPEX très importants. C'est de fait une industrie très concentrée puisque 5 groupes assurent plus de 85% de la production totale européenne. Parmi eux, Roquette est le premier groupe français et 2nd groupe européen de production d'amidon et de produits amyliques. Tereos est quant à lui le 3^{ème} groupe européen en termes de production d'amidon. Les unités de production traitent quotidiennement des volumes de matières premières compris entre quelques centaines de tonnes et plusieurs milliers/dizaines de milliers de tonnes pour les plus grosses unités. Les usines travaillent en continu et toutes les opérations utilisent des matériels d'extraction et de purification modernes de grosse capacité, et souvent très automatisés.

Ces unités de production visent à séparer au mieux chacun des constituants de la matière première (enveloppe cellulosique, matières grasses, protéines, amidon) et à isoler l'amidon pur, qui sera utilisé tel quel ou transformé pour devenir amidon modifié, amidon précuit, maltodextrine, sirops de glucose, polyol, et autres produits dérivés. Le prix de l'amidon dépendra du prix de la matière première et de sa richesse en amidon ainsi que de la valorisation de tous les co-produits obtenus lors de son extraction : les calculs de rentabilité des différentes filières utilisent ainsi la notion de Net Wheat Cost ou Net Corn Cost. L'amidonnerie est considérée comme un modèle de bioraffinerie en matière de valorisation intégrée de l'ensemble de ses co-produits.

Concernant la production d'éthanol, suivant le niveau d'extraction d'amidon, le coproduit, riche en glucides (sous forme la plus polymérisée en amidon ou moins polymérisée tels que les solubles de blé ou de maïs) peut être destiné à une fermentation éthanolique.

Il en résulte une multiplicité de produits possibles, illustrés sur la Figure 43, permettant de valoriser chaque fraction de la graine isolée par le procédé : amidon sous forme native et modifiée, glucose, solubles, gluten, sons, éthanol, produits de la transformation du glucose (ex : sorbitol).

Les unités de production concernées se situent principalement dans le Nord et l'Est de la France (Figure 41 et Figure 42), à l'exception de Vertex Bioenergie située dans les Pyrénées Atlantique. Cette éthanolerie est l'unique unité productrice d'éthanol de maïs en France et utilise à elle-seule un peu plus de 500 kt de maïs soit environ un quart du maïs destiné à l'amidonnerie-éthanolerie.



Figure 41 Localisation des amidonneries de Roquette, Tereos, Cargill et Chamtor sur le territoire français [2], y compris amidonneries de pommes de terre et pois.

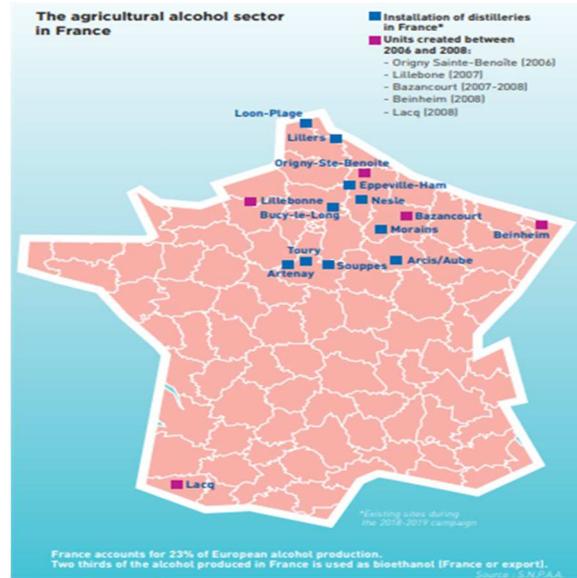


Figure 42 Localisation des éthanoleries françaises (y compris éthanol de betteraves). Source : [39]

Comme l'illustre la Figure 42, bon nombre d'éthanoleries françaises se sont construites à la fin des années 2010 et ont contribué à l'augmentation de la production de bioéthanol françaises notamment issu de céréales. Une partie importante du bioéthanol de céréales est utilisée en biocarburant : environ 80% de l'éthanol de blé et 100% de l'éthanol de maïs alors que ce chiffre est plutôt de 35 à 40% pour la betterave.

4.3.3 DIAGRAMME DES UTILISATIONS

Amidonnerie (moyenne olympique des campagnes 2015-2016 à 2019-2020)

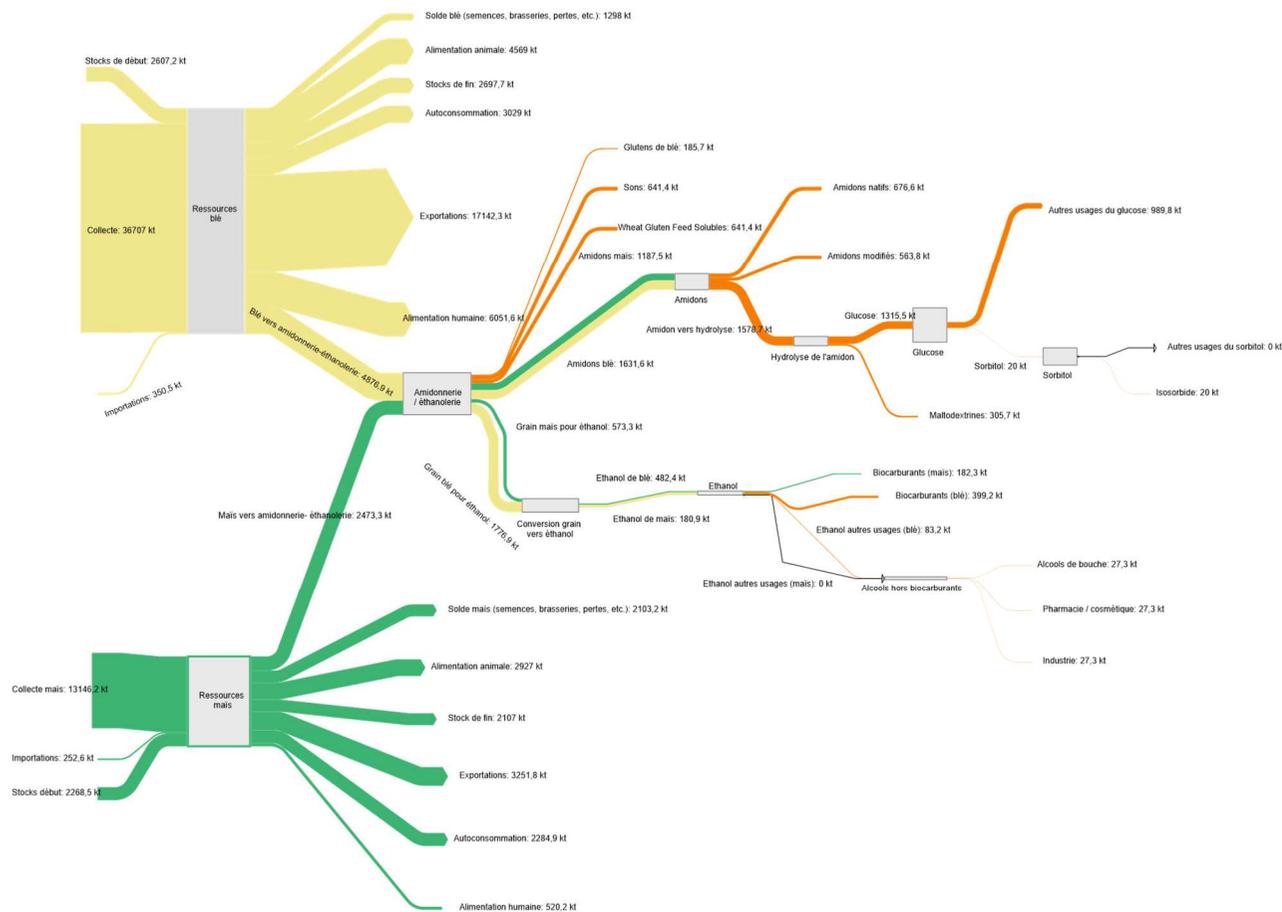


Figure 43 Bio Raffinerie de l'amidonnerie – éthanolerie. Flux exprimés en milliers de tonnes de matière sèche, hors flux d'importation de produits transformés.

4.3.4 FOCUS SUR LES PRINCIPALES BIOMOLECULES

Parmi les molécules étudiées issues de cette bioraffinerie figurent l'éthanol, l'amidon et le sorbitol, dérivé du glucose. L'amidonnerie-éthanolerie valorise une fraction minoritaire des ressources en blé et maïs françaises (Figure 44).

	Blé	Maïs
Volume (<i>moyenne olympique sur 5 ans</i>)	4 877 kt	2 473 kt
Part des utilisations des ressources (<i>production, importations et stocks</i>)	12%	16%
Utilisation en amidonnerie	64%	77%
Dont amidon natif*		24%
Dont amidon modifié*		20%
Dont produits de l'hydrolyse*		56%
Utilisation en éthanolerie	36%	23%

Figure 44 Utilisations de blé et maïs de l'amidonnerie éthanolerie française. Source : calculs CERESCO détaillés en annexe et * chiffres USIPA 2020.

Notons que des molécules biosourcées produites à partir de sucre pourraient théoriquement, par voie fermentaire, être issues de cette bioraffinerie de l'amidon si la souche et le procédé le permettent (cf. **versatilité** décrite dans le paragraphe 4.2.2, page 69). A ce propos, il existe une marge de manœuvre intéressante pour la production de molécules biosourcées issues de fermentation au niveau de l'augmentation de la production de glucose. S'agissant d'un des principaux produits de l'amidonnerie, les outils industriels disposent de capacités de production activables (bien qu'elles ne soient pas infinies) et pourraient par ailleurs réaliser un certain nombre d'investissement pour les augmenter si la demande se confirme. C'est une information d'intérêt compte tenu du niveau de disponibilités en produits de la bioraffinerie du sucre décrit au paragraphe précédent. Il faut toutefois noter qu'une glucoiserie a récemment fermé ses portes, et que la valeur de la production du glucose et sirop était en baisse entre 2012 et 2019 au point de se faire dépasser par le gluten, bien qu'elle constitue un produit plus important en volumes (Figure 45). La tendance est différente au moment de la publication de ce rapport où le prix du glucose atteint plus de 800 €/t début 2023.

Les calculs et les experts mobilisés n'ont pas mis en évidence de tensions observées sur la ressource en produits issus d'amidonnerie-éthanolerie. Ils s'accordent pour constater l'existence de **relatives marges de manœuvres** pour les différents types de transformation en **arbitrant les flux**.

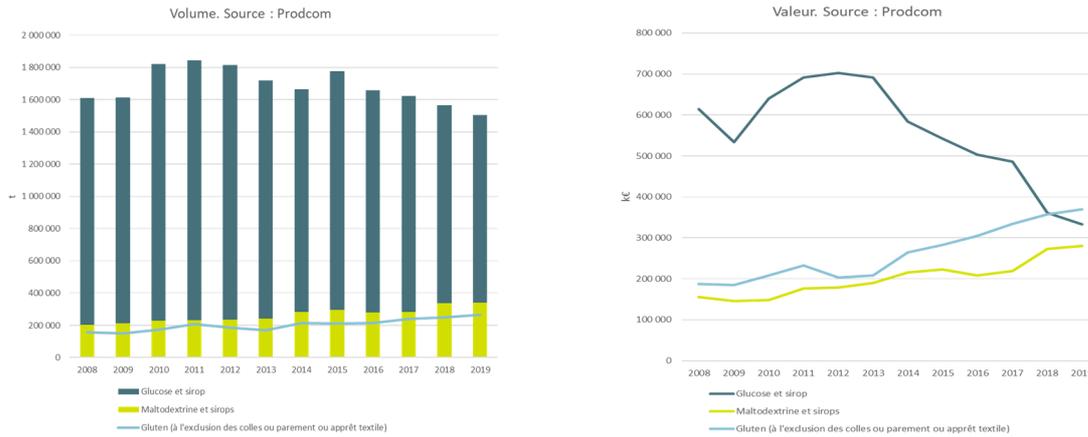


Figure 45 Evolution des produits commercialisés de l'amidonnerie française en volume (gauche) et en valeur (droite).
Source : Prodcoum

Un questionnement concerne toutefois **l'éthanol**, qui représente 4% des utilisations de cette bioraffinerie, dont une majorité est actuellement valorisée en biocarburants. Il existe en effet une **demande potentiellement très forte en éthanol** pour la production de molécules biosourcées, en particulier le **1,3 butadiène** pour lequel une usine est en cours de construction par Michelin près de Bordeaux. L'industriel annonce en effet une production de 100 kt de 1,3 butadiène, qui mobiliserait une ressource en éthanol de 250 kt soit environ 20% de la production française actuelle (alcools de céréales et de betterave).

Il est à noter que la production de sorbitol indiquée (20 kt) est minorée faute de donnée plus précise ayant pu être collectées.

4.3.5 GRANDES TENDANCES ET FORCES MOTRICES DE L'AMIDONNERIE

Les entretiens, le groupe d'expert mobilisé et l'analyse documentaire réalisée ont mis en évidence les tendances suivantes pour l'évolution de l'amidonnerie de céréales française.

- La **baisse de la part de matière première destinée à l'éthanolerie** allant de pair avec la fin prévue de la vente **des véhicules à moteurs thermiques pour le transport léger**. Cette tendance pourrait être atténuée par une **hausse des utilisations de l'éthanol comme molécule plateforme pour la chimie** (exemple de l'utilisation d'éthanol de Michelin)
- Une **baisse de la consommation de papier** induite par la numérisation de l'économie, qui vient diminuer l'utilisation d'amidon pour cet usage. A ce jour, ce phénomène est toutefois occulté par le boom du e-commerce, provoquant une **hausse des utilisations de l'amidon en cartonnerie**.
- La croissance des utilisations de **sirop de glucose issu des solubles de blé et de l'hydrolyse de l'amidon** par les industriels de la fermentation.
- **L'intégration de la production de molécules biosourcées par les acteurs des amidonneries-glucosereries.**

Encadré : partenariats entre amidonniers et start up de biotech

Les entretiens réalisés ont souligné le nombre limité de partenariats stratégiques ou de joint venture entre des amidonniers et des start-ups de biotechnologies industrielles. En témoigne le retrait de Roquette neuf ans après l'accord de joint-venture conclut avec Metex en 2005 pour la production de L-Met. Parmi les raisons potentielles des échecs et de la frilosité des industriels figure le fait que malgré les compétences apportées par l'amidonnier à la start-up (capacités logistiques pour la mobilisation et le pré-traitement de la biomasse, capacités de production et équipements industriels), les amidonniers n'ont souvent pas la maîtrise de la valorisation sur les marchés applicatifs des molécules, ce qui peut être un frein à l'établissement de partenariats. Plusieurs échec récents (JV avec DSM pour la production d'acide succinique [265]) ont généré une réticence de la part des amidonniers à investir dans des start-ups de biotechnologies. La stratégie semble désormais plutôt d'investir plus tardivement dans la montée en échelle, lorsque le risque technologique perçu est plus faible et que les marchés, les chaînes de valeur et les chances de succès commercial des molécules sont plus sécurisés. Souvent, les grands groupes sont assez réticents à investir dans de jeunes start-up car ce sont des cultures très différentes (décalage culturel, de maturité). C'est difficile pour les amidonniers de lancer car les projets en biotechnologies consomment une part significative en volume du glucose produit (en France, on produit environ 500 kt/an de glucose et un projet d'industrialisation biotech en consomme environ 20 kt/an).

De ce fait, les amidonniers ont globalement davantage opéré un positionnement stratégique vers le marché des protéines végétales que vers la chimie biosourcée au cours des dernières années.

- Les entretiens montrent que les amidonniers cherchent globalement sortir des applications de commodité du glucose (alimentaire) et aller vers des molécules dérivées à plus haute valeur ajoutée, tels que les polyols. On peut par exemple citer la croissance des utilisations en pharmacie du sorbitol. Il y a aussi une nette tendance à développer de nouvelles applications non alimentaires pour l'amidon, entre autres dans le domaine de la construction, des phytosanitaires ou comme liant de substitution aux liants pétrochimiques.

4.4 POIDS RELATIFS DES PRODUCTIONS DE MOLECULES BIOSOURCEES

4.4.1 DISPONIBILITES TOTALES EN CARBONE

La totalité de la ressource française en carbone représentée par la production, les importations et les stocks des cultures étudiées (blé, maïs, betteraves, colza, tournesol) s'élève à **41 Mt de carbone**.

Les calculs précédemment développés permettent de calculer que la part de ce carbone actuellement dédiée à la production des molécules biosourcées étudiées parmi la totalité du carbone disponible est de **0,5%** soit une part faible de la ressource. La progression annoncée de la production de ces molécules biosourcées ferait progresser ce pourcentage à 1% (Figure 46).

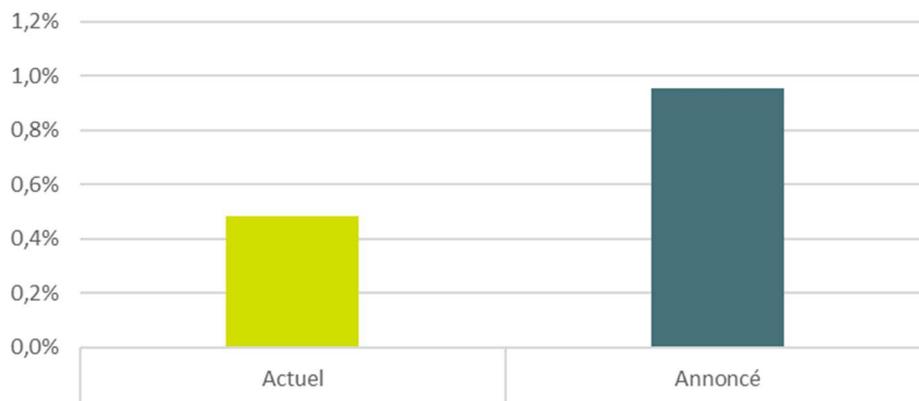


Figure 46 Parts actuelle et annoncée de l'utilisation de ressource en carbone pour la production des molécules biosourcées étudiées, exprimées en % de carbone.

Cette utilisation pour des biomolécules est encore plus faible que celles représentées sur la figure ci-dessus, parmi lesquelles figurent à plus de 1% les biocarburants et la production de sucre raffiné.

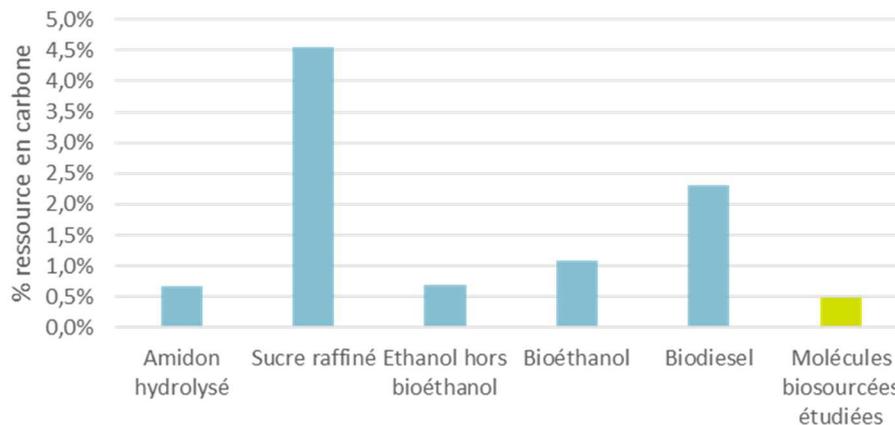


Figure 47 Part de la ressource en carbone représentée par différentes utilisations, exprimées en % de carbone.

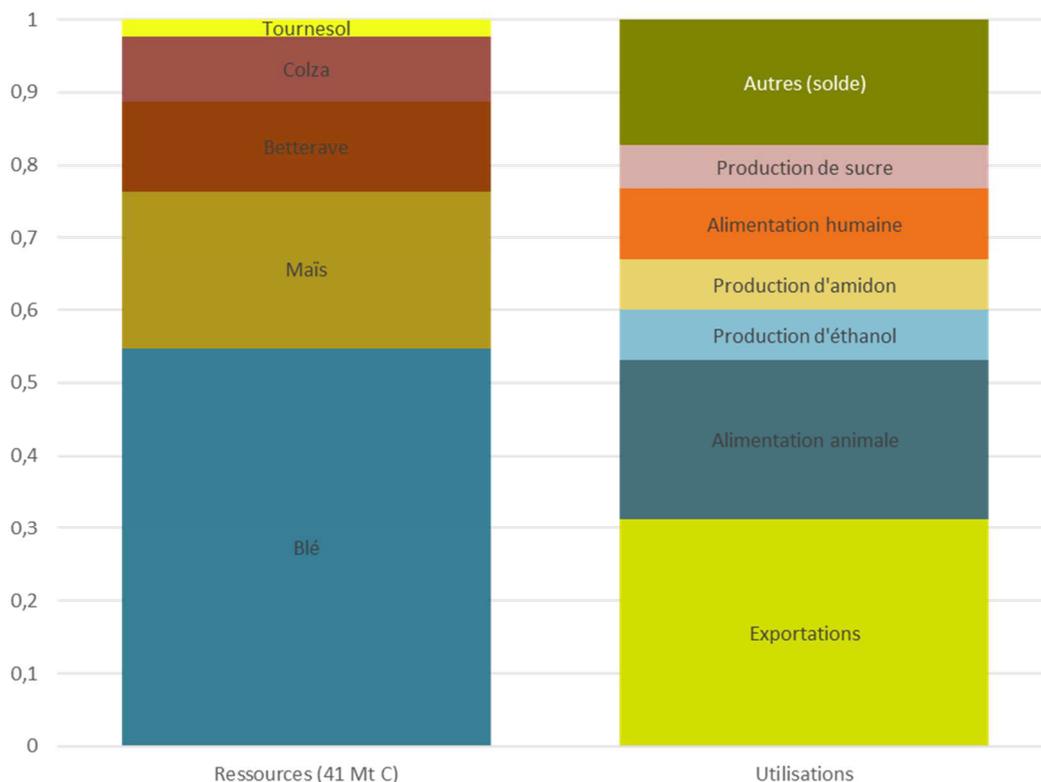


Figure 48 Répartition des utilisations du carbone contenu dans les cultures étudiées.

La disponibilité de la ressource en biomasse pour la production de molécules biosourcées doit par ailleurs être relativisée au regard :

- Des autres utilisations du carbone parmi lesquelles figurent aux deux premières places pour leur taille, les exportations (31% du carbone) et l'alimentation animale (22% du carbone) visibles sur la Figure 48.
- De la taille relative de la ressource en chacune des cultures étudiées, les céréales représentant à elles seules 75% de la ressource en carbone étudiée.

4.4.2 ANALYSE PAR TYPE DE MATIERES PREMIERES

La Figure 49 synthétise l'ensemble des parts représentées par les molécules étudiées dans la ressource en carbone disponible, mais seulement pour les matières premières transformées nécessaires à sa production.

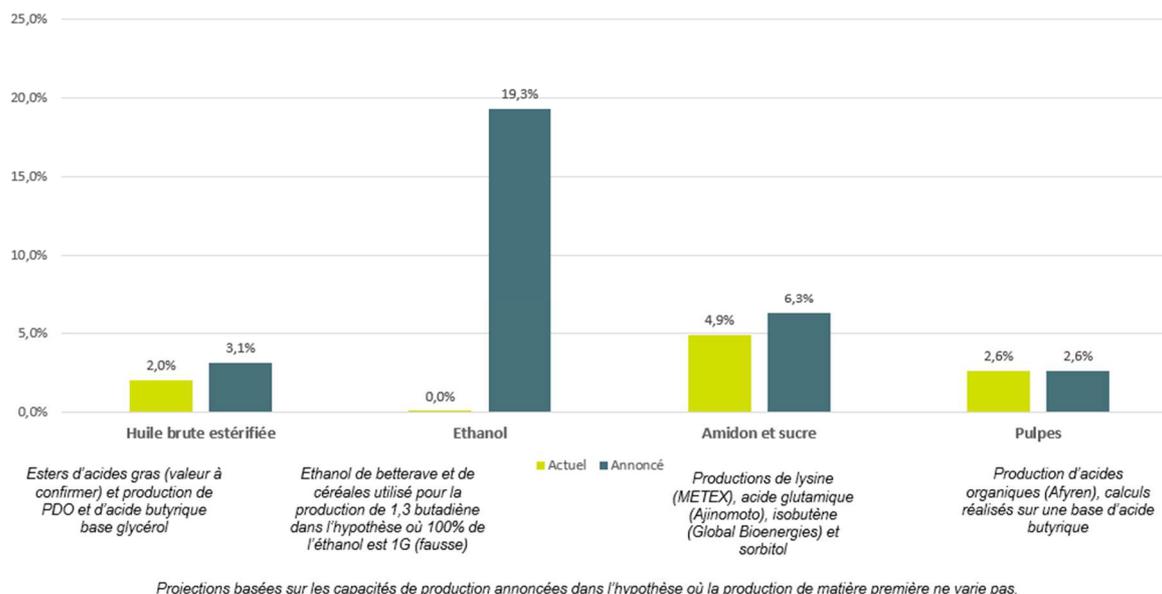


Figure 49 Parts actuelles et annoncées de la ressource en carbone utilisée pour la production des molécules biosourcées étudiées, par type de matière première (en gras), exprimées en % de carbone.

On observe logiquement des ratios plus élevés d'un facteur 10 en comparaison au graphe précédent car la production de molécules étudiées nécessite l'utilisation de fractions issues de première transformation de la matière première agricole. **Ces parts représentent actuellement moins de 5% des ressources disponibles en matières premières transformées**, quelle que soit la matière considérée.

Dans l'hypothèse où la production de matière première ne varie pas, selon les annonces des industriels repris dans le Tableau 5, **ces parts ne devraient pas augmenter significativement à une exception**. Le projet de production de 1,3 butadiène par Michelin, décrit dans le paragraphe 4.3.4 page 78 représenterait l'équivalent de 19,3% de l'éthanol actuellement produit en France.

Tableau 5 Production actuelle et annoncée de certaines molécules biosourcées étudiées

Molécule	Production actuelle (kt)		Production simulée (kt)	
1,3 butadiène (Michelin)	0,02	Stade démonstrateur, de 20 à 30t	100	Production annoncée, en partie basée sur de l'éthanol 2G
Isobutène (Global bioenergies)	1	Production d'isododécane pour cosmétique (2024)	31	Production de 30 à 50kt annoncée pour commodités et jet fuel
Acide glutamique (AJINOMOTO)	70	Glutamate monosodique (60kt de glutamate) actuelle	70	Pas d'évolution forte prévue identifiée lors de l'analyse
Lysine (METEX)	100	Dans l'hypothèse où les capacités annoncées du site à long terme sont toutes exploitées pour la production de L-Lysine	100	Pas d'autre évolution prévue identifiée lors de notre analyse

Acides organiques (Afyren)	16	Production d'acides organiques prévue en 2022	16	Croissance plutôt à l'étranger
----------------------------	----	---	----	--------------------------------

4.4.3 EQUIVALENTS DE SURFACES CULTIVEES MOBILISEES

Pour éclairer le sujet des potentielles compétitions d'usage, le carbone biosourcé nécessaire à la production des molécules étudiées a été converti en équivalent hectare pour différents types de culture.

	Blé	Maïs	Betterave	Colza	Tournesol
Surfaces cultivées (kha)	5 031	1 462	443	1 486	581
Fraction considérée	Amidon		Saccharose	Triglycérides	
Qté de C de la fraction (t/ha)	1,73	2,40	5,80	1,05	0,74
Molécules concernées	<ul style="list-style-type: none"> - Lysine (METEX) et acide glutamique (Ajinomoto) - Isobutène (Global Bioenergies) - Sorbitol - Ethanol pour le 1,3 butadiène 			<ul style="list-style-type: none"> - 1,3 PDO et acide butyrique base glycérol (METEX) - Esters d'acides gras 	
Equivalent théorique nécessaire en surface brutes pour la production des molécules étudiées (en ha)	85 070 ha de blé	ou 61 470 de maïs	ou 28 572 de betterave	23 715 de colza	ou 33 733 de tournesol
% des surfaces de chaque cultures	1,7%	4,2%	6,4%	1,6%	5,8%

Les parts des surfaces cultivées pour chaque culture et destinées à la production de molécules biosourcées, en équivalent carbone, sont d'ordres de grandeurs analogues à ceux développés dans le paragraphe précédent. Cela représente entre 1,6% et 6,4% de la surface des cultures considérées, soit 0,19 à 0,67% des surfaces en grandes cultures françaises.

4.5 BILAN DES CONSOMMATIONS DE BIOMASSE POUR LA PRODUCTION DE MOLECULES

Le poids relatif de de la production actuelle des molécules biosourcées étudiées s'élève à 0,5% du carbone disponible dans les trois grandes bioraffineries des corps gras, du sucre et de l'amidon. Cette part est encore faible, et les annonces des industriels laissent envisager un doublement de cette part relative à court terme, pour atteindre les 1% de la ressource en biomasse. Ramené en équivalent surfaces, cela représenterait entre 1,6% et 6,4% des hectares de cultures considérées, soit 0,19 à 0,67% des surfaces en grandes cultures françaises, ce qui reste très faible en comparaison des autres usages ou des exports. Cependant, les estimations réalisées montrent que l'industrialisation de certaines technologies pour répondre pourraient entraîner des consommations significatives de biomasse, à l'image du futur projet de production de bio-butadiène par Michelin qui mobiliserait l'équivalent d'un cinquième de la production actuelle d'éthanol. Ces consommations potentielles doivent potentiellement être anticipées pour accompagner la bascule vers une part plus significative de matières biosourcées dans nos consommations sans générer de compétition sur les usages des biomasses brutes ou transformées. Cela est d'autant plus important qu'un manque d'anticipation pourrait faire apparaître des conflits d'utilisation avec des usages jugés comme plus essentiels (alimentation notamment) et diminuer ainsi l'acceptabilité sociétale pour la chimie du végétal.

L'adéquation entre offre et demande pour chaque grande bioraffinerie est détaillé ci-dessous :

L'étude de la bioraffinerie des corps gras a permis d'identifier un risque de diminution de la ressource en glycérol avec l'évolution à la baisse de la demande en diesel et biodiesel induite par la fin de la vente de véhicules légers à moteur thermique prévue en 2035. A ce jour, la part du glycérol valorisée via la production de bioressources constitue une part faible (8 %). Par ailleurs, les experts interrogés ont relevé que le glycérol est un produit de commodité, pouvant être acheté sur le marché mondial. Concernant les esters d'acides gras et acides gras de spécialité, ils constituent une part très faible des utilisations et les industriels de la trituration sont plutôt rassurants quant au fait que cette utilisation continuera à être servie.

L'étude n'a pas mis en évidence de tensions court-terme sur les ressources issues de la bioraffinerie des corps gras. Elle contribue plutôt à identifier le secteur de la chimie biosourcée comme un utilisateur potentiel, à valeur ajoutée potentiellement supérieure au marché de commodité très orienté pour l'énergie.

La bioraffinerie du sucre est celle pour laquelle un risque de tension à court terme a été mis en évidence par les calculs réalisés. Ce constat est cohérent avec les retours des utilisateurs des co-produits de la sucrerie, qui font face à une stabilisation de l'offre et une augmentation potentielle de la demande pour des usages variés (bioéthanol, secteur de la production de levures, et émergence des demandes pour les procédés de fermentation/biotechnologies). Ce risque concerne des co-produits de la cristallisation du sucre (EP2 et mélasse), qui sont des substrats de fermentation de choix : ils contiennent des teneurs élevées en saccharose et d'autres composés nécessaires à la fermentation qu'il n'est donc pas nécessaire d'ajouter au milieu. Là où certains procédés et souches disposent d'une certaine versatilité et peuvent évoluer vers l'utilisation du glucose comme substrat, ce n'est pas le cas pour la totalité des molécules produites, qui pourraient se retrouver en difficulté d'approvisionnement. Notons cependant qu'un déficit de mélasse pourrait être comblé par des importations, mais l'actualité récente montre que le risque de hausse subite des prix ou de rupture d'approvisionnement n'est pas un mirage, en témoignent les nombreuses stratégies en faveur d'une amélioration de la souveraineté nationale. Ce risque doit être identifié pour les futurs projets de production de molécules biosourcées par fermentation comptant sur cette ressource pour leur future industrialisation, tout en envisageant la possibilité technologique de mobiliser d'autres biomasses plus disponibles.

Encadré : bilan sur la production d'éthanol.

La production d'éthanol au sein de ces bioraffineries mobilise une part importante et variable de la ressource en EP2 et mélasse, produit d'une succession d'arbitrages industriels. Ceux-ci sont réalisés en fonction, notamment, de l'évolution dans le temps des valorisations relative des différents produits de la sucrerie (sucre cristallisé, éthanol) et intrants nécessaires à son fonctionnement, en particulier l'énergie. Cette fraction entre ainsi dans une forme de concurrence avec la valorisation des EP2 ou de la mélasse pour d'autres fermentations, au même titre que le sucre cristallisé.

L'éthanolerie de betteraves ou de céréales est identifiée par les experts comme un secteur actuellement structurant pour l'équilibre économique des deux bioraffineries concernées. Il représente respectivement près de 30% et 5% des utilisations et constitue une variable d'ajustement relative de la production des bioraffineries à l'échelle nationale car il est possible de faire varier la quantité de biomasse fermentée pour l'adresser à une autre utilisation. **L'utilisation en tant que biocarburant représente 2/3** (source : SNPAA) **des utilisations de l'éthanol français pour laquelle le pays est d'ailleurs structurellement exportateur** (seuil d'autosuffisance de 106% en 2020, source : fiche filière bioéthanol FranceAgriMer). La fin de la vente des véhicules légers à moteur thermique prévue en 2035 risque en ce sens d'affecter la taille du marché occupé. A contrario, alors que la **production de molécules biosourcées** française en base éthanol est actuellement très faible (20 à 30t), elle pourrait représenter une **croissance de la demande très forte à hauteur de près de 20% de la production d'éthanol française**. Cela constituerait un relai au marché des biocarburants en baisse, en particulier pour la bioraffinerie des céréales, dont plus de 80 % de l'éthanol est valorisé en biocarburant (alors que ce chiffre est de 35 à 40% pour la betterave).

Enfin, **l'amidonnerie de céréales** est la bioraffinerie qui valorise le volume de biomasse le plus important en quantité de carbone (75% des ressources étudiées proviennent de céréales). Elle ne représente que 9% (hors éthanolerie) du total de céréales disponible en équivalent carbone, à comparer aux poids des importations (37%) et de l'alimentation animale (23%) pour ces cultures. **Ce constat et le questionnement des experts n'a pas mis en évidence de tension sur la ressource en produits issus de céréales ou en produits issus de l'amidonnerie**. Au contraire, le secteur de l'amidonnerie dispose de ressources carbonées plus abondantes que la sucrerie et de capacités industrielles activables pour la production de glucose. Elle pourrait, en ce sens, **accompagner la croissance de la production de molécules issues de fermentation via une augmentation de la fourniture de glucose**. Cela est d'autant plus intéressant que la bioraffinerie recherche des utilisations du glucose à haute valeur ajoutée pour limiter la chute tendancielle de la valorisation de ce produit en alimentaire.

Cette étude n'a toutefois pas permis de précisément quantifier l'augmentation du besoin en sucres pour la fermentation, dans la mesure où certains procédés et souches actuellement en production ne peuvent se convertir au glucose et que **l'incertitude** sur de potentiels projets susceptibles de faire croître la demande est encore trop forte.

5. FACTEURS DE DEVELOPPEMENT DE LA PRODUCTION BIOSOURCEE

Ce dernier chapitre propose une analyse des facteurs pouvant influencer le développement de la chimie biosourcée et, en conséquence, les utilisations de la biomasse.

5.1 SYNTHÈSE DES FORCES MOTRICES DE LA CHIMIE BIOSOURCEE

Les forces motrices pour la chimie biosourcée identifiées dans le cadre de cette étude sont synthétisées dans le tableau ci-dessous

Tableau 6 Les grands drivers de la chimie biosourcée

Déterminant	Détail et conséquences	Molécules de l'étude concernées
Les enjeux de souveraineté	<ul style="list-style-type: none"> Dépendance aux importations pour des utilisations jugées essentielles (Pharmaceutique, alimentation...) Résilience face aux aléas (crises sanitaires, changement climatique, géopolitique...) induisant une forte volatilité 	Toutes
Les mutations de la pétrochimie mondiale	<ul style="list-style-type: none"> Déclin des ressources en pétrole conventionnel et pic pétrolier dépassé en 2008 (<i>peak oil</i>) Electrification du transport léger et fin annoncée des véhicules neufs à moteur thermique en 2035 <p>📌 Instabilité du prix du pétrole</p> <p>📌 Renchérissement de la fraction naphta du baril de pétrole : remise en question du modèle économique de la pétrochimie</p>	<ul style="list-style-type: none"> Ethanol Isobutène 1,3-butadiène Acides organiques 1,3-PDO
	<p>Essor de l'exploitation du gaz de schiste 📌 Génère majoritairement des coupes fines C1-C2 et très peu de C3-C4 et d'aromatiques : pénurie de C3-C4 et d'aromatiques pétrosourcés et besoin de sources alternatives</p>	<ul style="list-style-type: none"> 1,3-butadiène Isobutène
	<p>Emergence du marché du bionaphta et développement des approches <i>mass balance</i> (produits bio-attribués)</p>	<ul style="list-style-type: none"> NA
L'exploitation croissante et améliorée de propriétés du vivant	<p>Valorisation croissante de propriétés de la biomasse : hétéroatomes, structures et fonctionnalités chimiques uniques :</p> <ul style="list-style-type: none"> Exposition très faible aux prix du pétrole pour certaines molécules avec un niveau d'oxydation élevé Obtention de molécules non accessibles à partir de ressources fossiles et donc non exposées aux prix du 	<ul style="list-style-type: none"> Amidon et dérivés Sorbitol Acides gras et esters de spécialité Acides aminés Glycérol

	<p>pétrole (motifs complexes, molécules chirales/stéréosélectivité)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnalités nouvelles ou performances accrues 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,3-PDO
	<p>La valorisation croissante de propriétés des bioprocédés :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stéréosélectivité des enzymes • Procédés biocatalytiques ou fermentaires menés à température ambiante • Résilience des micro-organismes face à des biomasses moins pures et moins coûteuses <p>☞ Avantage technico-économique de l'utilisation de bioprocédés (biocatalyse, fermentation, chimie du végétal) par rapport à des procédés chimiques classiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Acides aminés • Isobutène • Acides organiques • Esters d'acides gras • 1,3-PDO
<p>Une valorisation croissante des externalités positives du produit biosourcé</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'empreinte environnementale (carbone, biodiversité) • Diminution de la dépendance aux ressources fossiles <p>☞ Argument pouvant être structurant pour le développement de la production mais parfois difficile à prouver et à faire valoir avant la phase d'industrialisation (impact du DSP, absence de référence pour le pétrosourcé, impact plus élevé des premiers lots produits en petits volume)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Acide acétique • 1,3-PDO • Ethanol
	<p>Segmentation sur des marchés sensibles à la naturalité des produits (ex : cosmétique) ☞ permet des stratégies de repli sur des volumes plus faibles</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Glycérol • 1,3-PDO • Isobutène (isododécane)
	<p>Meilleur profil toxicologique pour des molécules biosourcées pouvant substituer des molécules pétrosourcées controversées (Non applicable pour le drop-in strict de molécules préoccupantes (ex : épichlorhydrine)). Possibles contraintes réglementaires en ce sens.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Isosorbide

5.2 FOCUS SUR CERTAINS FACTEURS DE DEVELOPPEMENT DE LA CHIMIE BIOSOURCEE

5.2.1 COMPETITIVITE RELATIVE DE LA BIOMASSE PAR RAPPORT AU PETROLE

Le **premier facteur** considéré par les acteurs pouvant développer l'utilisation de la biomasse au détriment des matières premières pétrosourcées est sa **compétitivité prix**. Pour l'étudier, la compétitivité relative du biosourcé par rapport au pétrosourcé, les prix du sucre et du pétrole ont été comparés sur les figures ci-dessous.

Il en résulte que s'il existe, en apparence, une corrélation entre le prix du sucre et du pétrole (Figure 50), elle s'efface totalement quand l'on compare les variations intra-annuelle entre-elles (Figure 51). Suivant les années, le rapport est favorable au sucre ou au pétrole. Il n'a donc pas été mis en évidence de corrélation évidente entre prix du sucre et du pétrole.

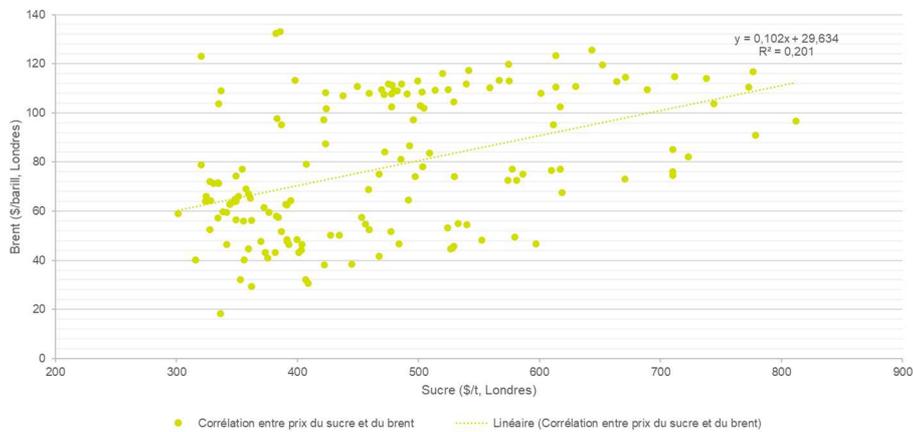


Figure 50 Corrélation entre prix du sucre et du Brent. D'après entretien avec François Monnet

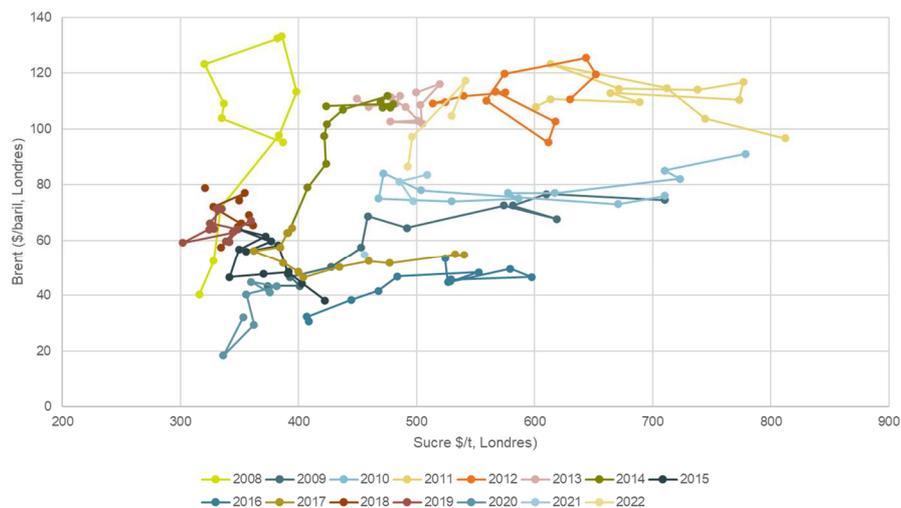


Figure 51 Corrélation entre prix du sucre et du Brent. Détail par année. D'après entretien avec François Monnet

Cette imprévisibilité forte de la variation relative entre prix du Brent et du sucre constitue une **difficulté à « parier » sur le facteur de différenciation de la compétitivité prix pour les molécules biosourcées**. Elle tend à montrer que de nos jours, **la compétitivité hors prix et les attentes sociétales constituent le principal déterminant**. Elle interroge sur la temporalité de la venue d'une potentielle bascule plus structurelle. Les experts interrogés semblent confirmer qu'à moyen-long terme, le rapport de force penchera en faveur du biosourcé mais tous ont du mal à s'engager sur un horizon temporel.

5.2.2 COMPÉTITIVITÉ DES DIFFÉRENTES BIOMASSES

L'enjeu de la compétitivité prix est également fort au niveau du choix de la biomasse transformée. C'est par exemple le cas des chaînes carbonées fermentées pour la production de molécules biosourcées d'intérêt. Le procédé de production de 1,3 PDO et d'acide butyrique de Metabolic Explorer est en partie basé sur du glycérol car il constituait jusqu'à présent une source de carbone relativement compétitive, en tant que co-produit de l'estérification des huiles pour la production EMAG.

Il s'agit aujourd'hui plutôt **d'arbitrer entre sucres en C6** (saccharose et glucose), compte tenu, notamment, des gisements disponibles (analyse détaillée dans le chapitre Bilan des utilisations par bioraffineries). La Figure 52 montre à ce propos que **la compétitivité relative entre unité de sucre sous forme de glucose et de mélasse est en train de se resserrer**.

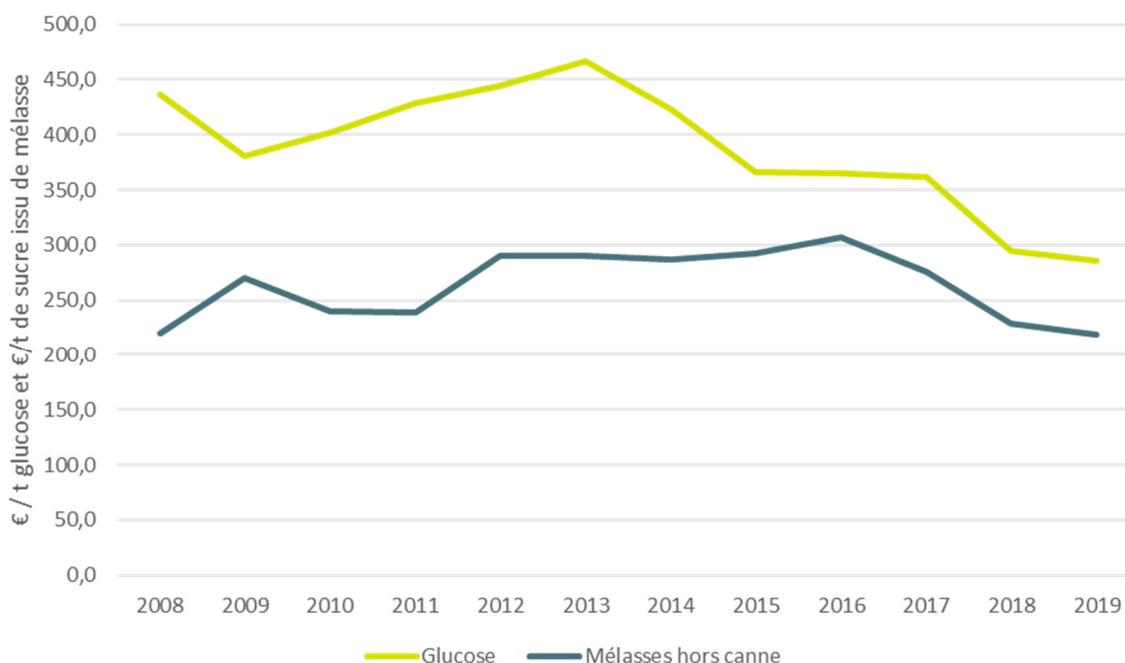


Figure 52 Evolution de la valeur de la production commercialisée en glucose et mélasses (hors canne) ramenées à la tonne de glucose et de sucre issu de mélasse. Source : ProdCom.

En ce sens, un enjeu très important pour les acteurs de la chimie biosourcée, et en particulier des biotechnologies industrielles, pourra être de **faire rentrer les considérations sur le choix du type de biomasse à utiliser plus tôt dans le développement de l'entreprise**.

En effet, les travaux de R&D et de montée en échelle des procédés de fermentation ont souvent tendance à se focaliser en premier lieu sur l'optimisation des souches et châssis cellulaires, et sur l'accroissement des titres et des rendements de production, à partir de sucres simples au début (saccharose, glucose). La préoccupation liée à l'identification de biomasses à plus faibles coûts vient généralement plus tard, au moment où le passage à l'échelle démonstrateur ou industriel est envisagé,

et où la construction d'un business plan solide avec des CAPEX/OPEX minimisés s'impose pour convaincre les investisseurs. Pourtant, la transposition du procédé à une autre biomasse avec des sucres moins purifiés en entrée peut s'avérer difficile et engendrer des investissements complémentaires très importants :

- Besoin d'un pré-traitement plus important de la biomasse, nécessitant des investissements (unité de pré-traitement)
- Investissements pour développer des approches de biologie de synthèse ou d'ingénierie métabolique complexes afin de rendre la souche de départ capable d'utiliser la nouvelle source de glucides avec le même niveau d'efficacité
- Impact d'une biomasse moins pure ou plus diluée sur le DSP : la contribution du DSP aux coûts globaux de production peut dépasser largement 50% pour certaines molécules nécessitant des étapes de séparation complexes

Un certain nombre de procédés peut s'accommoder d'un **changement de la nature de la biomasse utilisée**, mais cela reste fortement dépendant du micro-organisme utilisé. Dans le cadre des molécules et bioraffineries étudiées dans ce rapport, trois catégories sont à distinguer.

Les industries utilisant des micro-organismes en fermentateurs, dont l'industrie levurière, sont fortement dépendantes à la mélasse. Le procédé utilisé et les souches produites sont peu résilients à un changement du sourcing en biomasse, car la mélasse, outre le saccharose, apporte des macro-éléments et nutriments essentiels à la bonne croissance des micro-organismes (levures, bactéries).

Les procédés impliquant des **souches génétiquement modifiées (GM)** optimisées par des approches d'ingénierie métabolique pour la production d'une molécule spécifique sont également souvent assez peu résilients. Elles ont en effet été optimisées pour leur capacité à synthétiser la molécule d'intérêt plutôt que pour leur capacité de « survie » et leur robustesse. C'est le cas par exemple des souches bactériennes développées par Metabolic Explorer et Global Bioenergies pour la production respectivement de 1,3-PDO et d'isobutène. Dans le premier cas, la souche a été optimisée pour sa capacité à utiliser le glycérol comme substrat, et pourrait à priori plus difficilement utiliser d'autres sources de carbone si l'approvisionnement devenait limitant. Quant au procédé de Global Bioenergies pour la production d'isobutène, l'entreprise a initié des projets récemment, notamment avec Clariant, pour démontrer la faisabilité de produire de l'isobutène à partir de sucres de pailles plutôt que de sucres plus purs, mais la démonstration n'a été faite qu'à l'échelle pilote et la viabilité économique du procédé reste à démontrer [96].

Les procédés de fermentation utilisant des **consortia microbiens**, avec une multitude d'espèces offrant une grande versatilité et résilience à un changement de la biomasse en entrée. C'est le cas du procédé d'Afyren. Dans ce cas, la problématique de la biomasse s'est posée dès l'initiation du projet, puisque le modèle économique de la bioraffinerie circulaire dépend de la capacité à opérer la fermentation à partir de biomasses disponibles localement à bas coûts. Le procédé d'Afyren se positionne ainsi plutôt à contre-courant de la plupart des projets de fermentation, de plus en plus sophistiqués (biologie de synthèse). Afyren misent quant à eux sur une approche plus « low-tech », puisqu'il s'agit d'un procédé de digestion anaérobie, connu pour pouvoir fonctionner avec un large panel de biomasses agricoles et d'élevage, détourné vers la production d'acides carboxyliques.

5.2.3 LEVIERS TECHNIQUES ET R&D

Il existe des leviers techniques à l'amélioration de la compétitivité de la chimie biosourcée pouvant en conséquence stimuler son développement et l'utilisation de biomasse. Leur activation implique la poursuite de travaux de R&D sur plusieurs points techniques :

- **L'optimisation des étapes de séparation-purification** : les étapes de DSP ont une contribution très importante dans le coût global de production (détail partie 2, paragraphe 1.3.4)
- **La plus forte intégration de l'USP et du DSP dans les procédés**, en développant des batch en continu. La capacité des procédés à fonctionner en continu est un levier important pour réduire les coûts du procédé et gagner en compétitivité
- La **réduction des consommations d'eau et d'énergie** : ce critère est prépondérant dans les procédés où la biomasse est fortement diluée ou quand la séparation du composé d'intérêt est difficile.
- La recherche d'une meilleure **valorisation pour les co-produits** générés lors des procédés.
- Dans le cas des procédés de fermentation, **la gestion des biomasses microbiennes génétiquement modifiées** est un enjeu clé associé un poste de dépense potentiellement important. Il peut relever du défi technique car il est rendu complexe par les risques microbiologiques et de dissémination d'organismes génétiquement modifiés. La réglementation dans l'Union européenne est très précise à ce sujet selon les experts, et plusieurs acteurs ont pu connaître par le passé des problèmes car ils vendaient des moûts de fermentation contenant des OGM en France.

5.2.4 INVESTISSEMENTS ET INDUSTRIALISATION

Le développement de la chimie biosourcée en France est soumis à des facteurs économique en premier lieu desquels figure la **capacité d'investissement dans l'industrialisation de procédés permettant la production effective des molécules biosourcées**. D'après les experts interrogés, la France dispose de compétences scientifiques importantes en chimie du végétal et en biotechnologies. Les travaux de R&D peuvent améliorer la compétitivité de la production française mais ne semblent pas être le facteur limitant l'industrialisation. Il s'agirait plutôt du **déblocage des investissements, qui feraient défaut pour la transposition des découvertes scientifiques en innovations industrielles**. C'est un facteur influençant directement et fortement la quantité de biomasse mobilisée pour ces filières. En effet, les travaux de R&D réalisés en France débouchant sur une industrialisation ne donnent pas tous lieu à un site industriel localisé sur le territoire métropolitain. Les conséquences sont binaires en termes de consommation de biomasse : un projet industrialisé hors du territoire national n'utilisera probablement pas de biomasse française.

5.2.5 REPOSITIONNEMENT STRATEGIQUE DES ACTEURS

Les choix stratégiques des acteurs industriels, en ce qui concerne leur positionnement sur les différents marchés, a un impact fort sur la consommation de biomasse. Le positionnement sur la production de produits de commodité (ex : acides aminés de commodités), de grands intermédiaires pour la chimie, de molécules à haute valeur ajoutée ou encore de services est en effet associée à des niveaux de consommation de biomasse d'ordre de grandeur radicalement différents.

On observe un certain nombre de repositionnement d'acteurs français, afin de pouvoir poursuivre leur activité, plutôt orientée vers des molécules à haute valeur ajoutée ou des services, associée à une limitation des utilisations de biomasse à moyen terme. Plusieurs exemples peuvent être cités.

Global Bioenergies a recentré sa production sur le marché des cosmétiques, bien que l'ambition à moyen termes soit toujours de se positionner sur le marché des biocarburants.

Ajinomoto, produisant du glutamate (acide aminé de commodité), a initié une conversion partielle de son usine de production en plateforme de fermentation. Concrètement, une partie des capacités de fermentation disponibles sont libérées pour que le groupe puisse proposer une **offre de sous-traitance** pour proposer à des acteurs des biotechnologies ayant des besoins de montée en échelle de leur procédé, de réaliser leurs fermentations avec les équipements industriels d'Ajinomoto. L'offre de sous-traitance concerne des fermenteurs jusqu'à 100 m³, ainsi que des équipements de DSP. Une des difficultés réside dans le fait que l'industrie de la fermentation se prête moins à la sous-traitance de la

production (toll manufacturing) que l'industrie de la chimie car les procédés de biotechnologies sont spécifiques dans la grande majorité des cas.

METEX souhaite convertir une partie de l'unité récemment acquise auprès d'Ajinomoto pour en faire une plateforme de scale-up dédiée à l'industrialisation de molécules par fermentation à plus haute valeur ajoutée (acide glycolique par ex)

5.3 FOCUS SUR LES MOLECULES ETUDIEES

5.3.1 TABLEAU DE SYNTHÈSE

Les facteurs d'évolution de la demande pour les molécules de l'étude sont synthétisés dans le tableau ci-dessous et détaillées par molécule à la suite.

Tableau 7 Les facteurs d'émergence et d'évolution de la production biosourcée pour les molécules de l'étude

Molécule	Acteurs	Exposition aux drivers de la chimie biosourcée	Facteurs d'évolution de la demande – drivers de marché	Leviers et défis d'augmentation des capacités de production
Acides aminés (acide glutamique, lysine, thréonine, tryptophane, valine...)	Ajinomoto Metabolic Explorer	Exposition faible aux prix du pétrole Production par fermentation plus intéressante que par voie chimique (énantiosélectivité)	Marché mature et consolidé pour la lysine et le glutamate, faible augmentation voire déclin de la demande (alimentation humaine et animale) Demande plus soutenue pour des acides aminés à plus haute valeur ajoutée (thréonine, tryptophane, valine) en alimentation animale Contribution à l'autonomie protéique française, les acides aminés permettant de compléter les rations obtenues avec les légumineuses cultivables en France (en comparaison avec le soja souvent importé, au profil en acides aminés plus idéal)	L'ancien site Eurolysine d'Ajinomoto racheté par Metex sera progressivement converti pour la production de molécules à plus haute valeur ajoutée par fermentation
Isobutène	Global Bioénergies	Exposition très forte de la molécule aux prix du pétrole Pénurie de C3-C4 pétrosourcés Amélioration de l'ACV et réduction de l'empreinte environnementale du biosourcé Alternative à des molécules jugées préoccupantes (silicones cycliques)	Relai de croissance à plus haute valeur ajoutée (green premium) en cosmétique (maquillage longue tenue) : ingrédient très demandé et nouvelles applications potentielles à moyen terme Incorporation en quantités importantes dans les produits cosmétiques : forte contribution à l'augmentation de la naturalité des produits Fort potentiel d'évolution de la demande sur le marché des jet fuels, sous réserve de compétitivité prix par rapport au pétrosourcé : taux de croissance fort du marché et incorporation importante de l'isobutène	Technology push : procédé de fermentation performant (châssis cellulaire optimisé, fermentation gazeuse) Transition envisagée à moyen-long terme vers un sourcing 2G moins coûteux
Acides organiques	Afyren	Exposition assez forte aux prix du pétrole Amélioration de l'ACV et réduction de l'empreinte	Applications très larges de l'acide acétique comme plateforme et commodité Sensibilité des marchés applicatifs à la naturalité (alimentaire, cosmétique, arômes et parfums)	Compétitivité économique par rapport aux équivalents pétrosourcés : procédé « low-tech », répliquabilité et versatilité du procédé :

		environnementale du biosourcé		adaptabilité à différentes biomasses à bas-coûts
Bétaïne	Tereos, Dupont Nutrition Bioscience	Molécule peu exposée au prix du pétrole, production biosourcée compétitive	Marchés en alimentation animale et en cosmétique bien consolidés Le marché de la cosmétique tire la demande	Production limitée par la demande sur les produits principaux de la sucrerie (sucre, éthanol), car obtention à partir de vinasse
Ethanol	Tereos, Cristal Union	Exposition forte aux prix du pétrole ACV améliorée, réduction d'émission de GES	Perspective de diminution de la demande en bioéthanol carburant avec la fin des moteurs thermiques Intérêt croissant de l'éthanol biosourcé technique et comme intermédiaire chimique	Relai de croissance possible pour le bioéthanol dans des applications techniques ou comme précurseur pour la synthèse de molécules biosourcées (butadiène)
1,3 butadiène	Michelin	Exposition forte de la molécule aux prix du pétrole Pénurie de C3-C4 pétrosourcés : forte fluctuation des prix du butadiène pétrosourcé	Demande plutôt en croissance pour le marché du caoutchouc synthétique, le butadiène est un des composants principaux des pneumatiques et est faiblement substituable	Besoin d'un sourcing alternatif partiel en éthanol 2G pour tenir les annonces d'évolution de capacité de production
Amidon	Tereos, Roquette, ADM	Aucune exposition directe aux prix du pétrole car l'obtention d'amidons et de dérivés ne peut se faire qu'à partir de biomasse	Marchés matures Demande stable en alimentaire, demande croissante en amidons modifiés pour la cartonnerie, diminution de la demande en papeterie Produits de commodité : fort impact du prix des matières premières, de l'énergie et des carburants sur le prix de l'amidon et sur la demande finale	Peu de perspectives d'augmentation de la demande globale en amidons et dérivés
Sorbitol et principaux dérivés	Tereos, Roquette	Aucune exposition directe aux prix du pétrole : la synthèse à	Croissance de la demande pour les polyols comme le sorbitol en pharmaceutique et en alimentaire (édulcorant)	Relai de croissance pour compenser le dynamisme plus faible de la demande pour

			partir de glucose issu d'amidon est plus compétitive		l'amidon et les sucres hydrolysés qui en sont issus
			Fonctionnalité chimique conférée par la biomasse		
Glycérol / Glycérine	Avril, Valtris		Exposition faible au prix du pétrole : la synthèse à partir d'huile est plus compétitive	Demande stagnante du glycérol pour ses applications historiques (cosmétique)	Déclin de la production d'EMAG à court-moyen terme pour le transport léger (fin des véhicules à moteur thermique) qui induira une baisse de la production de glycérol
			Fonctionnalité chimique conférée par la biomasse	Intérêt décroissant du glycérol comme plateforme chimique	
			Demande du consommateur pour des produits biosourcés et issus du végétal	Demande comme source de carbone en fermentation (1,3-PDO)	
1,3 Propanediol	Metabolic Explorer		Exposition relativement faible aux prix du pétrole	Demande croissante en cosmétique sur des marchés de niche avec premium au biosourcé et végétal	Capacité d'augmentation des capacités de production dépendante de la disponibilité en glycérol (grade premium pour cosmétique) : forts investissements nécessaires pour pouvoir utiliser d'autres source de carbone en fermentation si la disponibilité de la glycérine devient limitante.
			Demande du consommateur en produits biosourcés et possibilité de green premium	Demande croissante dans le textile, les revêtements, et les emballages	
Esters d'acide gras et autres acides gras fonctionnalisés	Avril / Oléon / Valtris / Stéarinerie Dubois		Aucune exposition aux prix du pétrole	Fort besoin d'acides gras à chaîne courte pour la production d'esters servant de multiples applications : pas de sourcing en biomasse pour ce type d'AG en France ni en Europe.	Développement des applications et des marchés des esters limité à partir du colza/tournesol en raison du profil en acides gras de ces cultures.
			Apports de fonctionnalités uniques offertes par la biomasse	Diversification du sourcing en huiles et développement de la culture d'oléagineux métropolitains (colza	

<p>Demande des consommateurs pour produits biosourcés</p> <p>Amélioration de l'ACV par l'utilisation de tournesol/colza français</p>	<p>des des (éric) pour diminuer la dépendance aux huiles de palme, coco, ricin...</p> <p>Croissance de la demande en esters pour la cosmétique mais peu de demande d'huile de colza et tournesol</p>	<p>Peu de potentiel pour l'utilisation d'huile de colza/tournesol en cosmétique, le segment de marché le plus dynamique et apportant le plus de valeur</p>
--	--	--

5.3.2 ANALYSE DÉTAILLÉE DES DÉTERMINANTS PAR MOLECULE

- **Ethanol**

De manière générale, les amidonneries et sucreries ont besoin du marché du bioéthanol carburant, qui représente globalement 2/3 des usages. En parallèles, les usages techniques de l'éthanol en parfumerie, en pharmaceutique et en cosmétique se maintiennent. Dans le cas particulier du marché de la pharmaceutique, la demande en éthanol technique a même augmenté drastiquement en 2020 pour fabriquer des gels hydroalcooliques dont la consommation a explosé lors de la crise sanitaire du COVID. L'utilisation plus large de bioéthanol comme intermédiaire chimique en remplacement de l'éthanol pétrosourcé pour la synthèse de solvants ou pour les bioplastiques *drop in*, ne pourra se développer que si les prix baissent. Il existe toutefois d'autres débouchés pour l'éthanol de betterave ou de céréales, comme son utilisation pour la synthèse de molécules biosourcées comme le 1,3-butadiène, qui pourrait consommer une part importante de la production à l'horizon 2030.

- **Bétaïne**

Le développement de la production de bétaïne par Tereos en France a pour origine la recherche d'une meilleure valorisation des co-produits de la production de bioéthanol, les vinasses.

L'usine d'Origny-Sainte-Benoite en produit 8000 tonnes/an, ce qui en fait la plus grande unité au monde de production de bétaïne biosourcée. Cette molécule est utilisée depuis longtemps en alimentation animale comme additif pour l'alimentation des porcs, volailles et poissons, car elle améliore la santé intestinale des animaux. La bétaïne bénéficie dans l'Union européenne d'une autorisation accordée en 2019 à DuPont Nutrition Bioscience au titre de la réglementation relative aux nouveaux aliments, couramment appelés « novel food » [69]. Toutefois, c'est le marché de la cosmétique qui tire le plus la demande en bétaïne. Elle agit en effet comme surfactant peu agressif pour la peau, avec un risque limité d'allergie et de problèmes d'irritation [71]. Elle est également utilisée sous forme de sel d'acides gras ou d'acides comme hydratant et surfactant dans des savons, et détergents [70][72].

Toutefois, la capacité des sucreries à augmenter la production de bétaïne est limitée, contrainte par la demande sur les produits principaux : le sucre et l'éthanol, qui conditionnent la disponibilité en vinasse.

- **Isobutène**

Cette molécule a bénéficié d'un relai de croissance en cosmétique, qui a permis de compenser le manque de compétitivité de l'isobutène pour le marché des carburants.

L'isododécane (obtenu par polymérisation de l'isobutène) est présent dans près de 50% des formulations de maquillage longue-tenue (mascaras, rouge à lèvres...). Ce segment de marché représentant 25% du marché global du maquillage, l'isododécane est donc un ingrédient très demandé [99]. La demande de plusieurs dizaines de milliers de tonnes pour des applications variées en cosmétique, est suffisante pour justifier la construction de plusieurs unités industrielles. Le marché de l'isododécane devrait augmenter d'un facteur 10 dans les prochaines années, pour atteindre 100 kt/an [93]. A moyen terme, de nouvelles applications à plus gros volumes peuvent être envisagés en cosmétiques, tels qu'en dermo-cosmétique. En cosmétique, l'isobutène offre des niveaux de performance comparables et sont une alternative à des équivalents pétrosourcés controversés, tels que silicones cycliques (cyclosiloxanes D4 et D5), dont l'usage est strictement réglementé dans l'UE depuis 2020 [103]. Le fort intérêt des acteurs de la cosmétique pour l'isobutène de Global Bioenergies réside en outre dans son caractère biosourcé, ce qui permet d'augmenter significativement le niveau de naturalité des produits, ce qui correspond à une demande forte des consommateurs de produits cosmétiques.

La compétitivité du procédé doit encore être améliorée pour que l'isobutène puisse pénétrer le marché des carburants. Il existe une réelle opportunité d'augmentation de la demande sur le marché des jet fuel à moyen terme. Les jet fuels sont le segment le plus dynamique de l'industrie du pétrole (5% de

croissance par an) – les dérivés d’isobutène, pouvant être incorporé jusqu’à 50% dans les jet fuels, sont des composés prometteurs pour alimenter ce marché [93].

- **1,3-Butadiène**

L’exploitation assez récente de gaz de schiste, du fait du déclin des gisements de pétrole conventionnel ont résulté en une diminution de la capacité de production de butadiène, car le gaz naturel génère des coupes plus fines (éthylène) et est plus pauvre en hydrocarbure C3-C4 que le pétrole conventionnel. Cette pénurie se traduit par des augmentations croissantes des prix du propylène et du butadiène pétrosourcé [127]. La substitution totale du naphta par de l’éthane réduit la production de butadiène d’un facteur 6 et celle du propylène d’un facteur 20 [130].

Le butadiène souffre à la fois d’une offre contrainte car la production mondiale est fixée par la demande en éthylène, et d’une demande plutôt en croissance (près de 60% de la demande sert à satisfaire l’industrie des pneumatiques ou il est difficilement substituable) [130]. Il a donc subi des variations fortes de prix, avec une tendance à la hausse : depuis 2010, son cours aux US oscille entre 1500 \$/t et 4500 \$/t, tandis que l’éthylène est resté bcp plus stable [130].

Ce gap dans l’offre de butadiène devrait s’accroître à mesure que l’exploitation du gaz de schiste s’intensifie, créant une forte incitation à développer des voies alternatives de production de butadiène à partir de biomasse ou de gaz naturel.

- **Acides aminés**

L’objectif du rachat par Metex de l’usine d’Ajinomoto d’Amiens est de pouvoir transférer sa plateforme technologique ALTANOOV sur ce site d’Amiens, pour convertir une partie de la production de lysine et d’acides aminés vers la production de molécules à plus forte valeur ajoutée. Le premier projet qui sera mené courant 2022 sera de lancer la production industrielle d’acide glycolique, puis de lancer de nouveaux projets chaque année.

Ces projets permettront d’apporter de la valeur et de trouver des relais de croissance par rapport à la L-lysine (l’acide aminé le plus produit sur le site d’Amiens), qui est devenu un acide aminé de commodité → cela permettra ainsi de réduire la volatilité dans les prix de vente moyens [218]

- **Amidons et amidons modifiés [17][34]**

Les perspectives globales d’évolution de la demande en amidons sont limitées. Les amidons et amidons modifiés servent toujours globalement les mêmes marchés historiques de l’alimentation humaine, de la papeterie, et de la cartonnerie. La demande en alimentaire est stable, les amidons présentant en particulier un intérêt en cas de reformulation nutritionnelle. En papeterie, la demande diminue aussi, sous l’influence de la numérisation des échanges et de l’économie. A l’inverse, les applications des amidons modifiés en cartonnerie pour les emballages en carton ondulé se développent, et représentent 40% du marché de l’amidon, en raison de la croissance du e-commerce. De nouvelles applications dans les matériaux se développent également et pourraient être des relais de croissance pour compenser la demande stagnante sur certains marchés historiques.

De manière générale, les amidons sont des molécules de commodité. Même s’il y a une certaine élasticité prix, la demande pour certains marchés comme les emballages carton pourrait diminuer si le contexte géopolitique instable avec la guerre en Ukraine se poursuit. En effet, le cours de l’amidon suit celui du blé et du maïs, ainsi que de l’énergie, du gaz et du pétrole. Ainsi, depuis le début du conflit en Ukraine, l’amidon, qui représente 10% des coûts de fabrication des cartons, a vu son prix doubler en France, de 300 à 700 €/tonne en mars 2022 [272].

- **Sorbitol [23]**

Le marché du sorbitol et des polyols en général est assez dynamique. Il s’agit d’un relai de croissance important pour les amidonniers, permettant de faire face à la demande globale stagnante en amidons, amidons modifiés, ainsi qu’en sucres issus de son hydrolyse (dextrines, sirops de glucose-fructose...).

D'ailleurs, Roquette a annoncé en 2022 avoir investi 22 millions d'euros sur son site de Lestrem pour renforcer sa position de leader sur le marché des polyols, en particulier pour les marchés de la pharmaceutique et de l'alimentaire. En alimentaire, le sorbitol est utilisé comme édulcorant à faible indice calorifique, et suit la tendance de remplacement des sucres traditionnels dans les formulations de produits de consommation de masse. En pharmaceutique, le sorbitol est un excipient clé pour les formulations orales, et un ingrédient essentiel pour la formulation de produits de soin bucco-dentaire en raison de son caractère humectant et non cariogène.

- **Glycérol et 1,3 PDO [161][226][231]**

Le glycérol plus ou moins purifié est utilisé dans un grand nombre de secteurs industriels. Il est couramment employé dans des applications alimentaires, cosmétiques ou pharmaceutiques, notamment en raison de ses propriétés émoullientes et comme agent mouillant.

Dans les cosmétiques, le glycérol (purifié) est souvent utilisé comme agent hydratant, solvant et lubrifiant. La glycérine est un humectant qui protège l'épiderme, adoucit la peau et la rend plus souple et plus extensible. Il rentre dans la formulation de dentifrices, de crèmes hydratantes et de produits capillaires. Dans les médicaments, il agit comme hydratant qui améliore l'onctuosité et la lubrification des préparations pharmaceutiques. Il est par exemple utilisé pour préparer des sirops médicamenteux. En tant qu'additif alimentaire, il est utilisé pour son goût sucré, pour retenir l'humidité et comme solvant. Enfin, le glycérol et ses dérivés sont aussi utilisés assez largement dans un ensemble d'applications industrielles : agent plastifiant, formulation de lubrifiants, synthèse de résines et d'explosif (nitroglycérine), solvant pour les teintures et encres, formulation de fluides antigél, tensioactifs.

Pour l'ensemble de ces applications historiques, la demande devrait globalement se maintenir. En cosmétique, le glycérol est utilisé de manière ubiquitaire dans un très grand nombre de préparations hydratantes et la demande devrait augmenter, proportionnellement à la demande globale en produits cosmétiques [177].

En revanche, son utilisation comme plateforme chimique pour la synthèse d'épichlorhydrine ou d'acide acrylique décline fortement, si bien que les voies à partir de glycérol sont de moins en moins priorisées.

Un débouché intéressant pour la glycérine produite par les huileries réside dans son utilisation comme source de carbone en fermentation. En particulier, Metabolic Explorer valorise une glycérine 100% végétale non OGM pour la production de 1,3-PDO, qui trouve des applications larges en cosmétique comme humectant ainsi que dans d'autres applications techniques comme le textile et les revêtements, pour lesquelles il y a moins de contrainte sur la qualité de la glycérine utilisée en fermentation qu'en cosmétique. Toutefois, la capacité de Metabolic Explorer à satisfaire la demande sur ces marchés dépend entre autres de sa capacité à disposer de volumes plus importants de glycérine, dont la production est elle-même dépendante de la demande en EMAG. Il semble difficile pour Metabolic Explorer de pouvoir avoir recours facilement à d'autres sources de carbone que la glycérine pour augmenter la production, sans investissements très conséquents, car le procédé de fermentation développé, utilisant des souches GM, semble assez peu versatile [107][108].

- **Esters d'acides gras (déjà décrit dans les paragraphes précédents)**

Les esters d'acides gras de colza/tournesol et leurs dérivés fonctionnalisés servent de nombreux marchés applicatifs à plus ou moins haute valeur ajoutée. En alimentaire, ils ont des applications très larges et c'est un marché qui apporte beaucoup de valeur pour l'industrie oléochimique.

Parallèlement, plusieurs marchés applicatifs historiques sont toujours servis par les oléochimistes et représentent des volumes importants mais une valeur plus faible (forrage, lubrifiants industriels, polymères...). Les huiles utilisées pour ces applications sont en partie des huiles de colza et tournesol.

Le secteur cosmétique est le plus dynamique et représente le marché qui apporte le plus de valeur ajoutée. Les acides gras recherchés pour la cosmétique sont en revanche majoritairement des acides

gras à chaîne courte, ne pouvant être obtenus qu'à partir de palme, palmiste et coco. Le profil d'acides gras du colza et du tournesol (chaînes longues) ne permet pas d'envisager leur utilisation pour servir ces marchés.

5.4 ILLUSTRATION DE L'IMPACT DE CES FACTEURS SUR LES DEVELOPPEMENTS INDUSTRIELS ACTUELS

Les mutations profondes que subit la pétrochimie mondiale se sont traduites par un regain net d'intérêt depuis quelques années pour la production industrielle de grands intermédiaires chimiques biosourcés, même assez exposés aux prix du pétrole, comme l'illustrent les figures suivantes.

Parmi ces projets d'envergure, certains visent la production d'intermédiaires chimiques étudiés dans ce rapport :

- › La société de chimie Synthos a annoncé récemment avoir avancé dans le développement de sa technologie de **production de butadiène à partir de bioéthanol**, et a accordé un contrat de licence à BASF pour la construction prochaine d'une première unité d'une capacité de production de 40 kt/an située en Pologne, afin d'approvisionner le marché des caoutchoucs synthétiques [274].
- › La start-up de biotechnologies industrielles Chaincraft produisait en 2019, 2000 t/an **d'acides carboxyliques biosourcés** (acide acétique mais aussi des acides carboxyliques à chaîne moyenne jusqu'à C8) sur son site pilote, et vient de lever 11 millions d'euros pour développer un démonstrateur industriel à Amsterdam. Le procédé développé semble proche de celui d'Afyren, et met à profit des consortia microbiens capables de fermenter des biomasses complexes et récalcitrantes, tels que des déchets organiques municipaux ou alimentaires. Dans le cas d'Afyren et de Chaincraft, le levier principal de compétitivité est de nature technologique : en utilisant un procédé de fermentation « low-tech », qui s'apparente à un procédé de digestion anaérobie dans lequel l'étape de méthanogénèse a été détournée pour permettre l'élongation des chaînes des acides carboxyliques, permet d'une part d'utiliser des biomasses peu chères en entrée, et d'aboutir à un mélange d'acides carboxyliques biosourcés, depuis l'acide acétique qui est une commodité, jusqu'à des acides carboxyliques à plus haute valeur ajoutée pouvant servir des marchés de spécialité.
- › La start-up Jubilant Ingrevia a par ailleurs annoncé en 2022 le début de la production en Inde **d'acide acétique biosourcé obtenu à partir de bioéthanol**, avec une capacité de production de 25 000 tonnes/an [273].

Certains nouveaux projets adressent aussi le défi posé par les pénuries possibles de C3-C4 et aromatiques pétrosourcés associée à l'utilisation croissante de gaz de schiste en remplacement du pétrole conventionnel.

C'est un des facteurs qui a été à l'origine du projet de production de **1,3-butadiène** de Michelin, et qui peut expliquer en partie l'émergence de nouveaux projets à forts investissements comme celui porté par la *joint-venture* entre Cargill et HELM (Qore) pour la production par fermentation de 65 kt/an de **1,4-butanediol** aux Etats-Unis [275]. Un des principaux arguments pour la compétitivité de cet intermédiaire chimique biosourcé, en concurrence frontale avec sa version pétrosourcée, repose, selon Qore, sur la réduction très importante d'émissions de GES (-93%) permis par la fermentation.

De même, la technologie d'Anellotech de production **d'aromatiques BTX (benzène, toluène, p-xylène)** biosourcés à partir de biomasse lignocellulosique est prête à être industrialisée. La start-up s'est associée à Axens et IFPEN pour développer une technologie de chimie catalytique performante qui, selon leurs annonces, serait compétitive par rapport aux procédés pétrosourcés conventionnels.

Enfin, plusieurs projets récents s'attaquent de nouveau à la production d'intermédiaires chimiques à gros volumes qui avaient fait l'objet d'investissements conséquents par le passé mais dont la production à partir de biomasse n'avait pas été compétitive jusqu'ici pour plusieurs raisons d'ordre technologique (rendement/productivité insuffisante), logistique (stratégie d'approvisionnement en biomasse), réglementaire (driver environnementaux encore insuffisamment déterminants) ou à cause d'un manque de maturité des chaînes de valeur :

- › **Acide acrylique** : une multitude de voies ont été envisagées par le passé (à partir de glycérol, de sucres...). De nouveaux projets continuent d'émerger, tel que celui porté par Lakril par conversion d'acide lactique biosourcé. Toutefois, face à la difficulté de rendre compétitive la production d'acide acrylique biosourcé, des acteurs leaders tels qu'Arkema semblent privilégier des approches mass-balance [276]

- › **Acide lévulinique** : la filiale de la start-up GFB Biochemicals, NXTLEVEL, a annoncé récemment un projet de construction en France d'une usine de production de solvants biosourcés dérivés d'acide lévulinique en France à un horizon 2025. L'usine utilisera des biomasses lignocellulosiques locales pour produire l'intermédiaire. De même, fin 2022, la start-up américaine Origin Materials a achevé la construction de sa première bioraffinerie dédiée à la conversion de la cellulose contenue dans des biomasses lignocellulosiques en quatre produits : chlorométhyl furfural, carbone hydrothermique, furfural et acide lévulinique.

- › **Dérivés du furfural** : outre Origin Materials, de nombreux acteurs tentent de lever des verrous technologiques pour rendre compétitives des technologies de production de dérivés de furfural à partir de biomasses lignocellulosiques, à l'image de Michelin qui a initié une collaboration en 2020 avec Ava Biochem pour développer des applications pour le **5-HMF**

- › **Acide succinique** : la production d'acide succinique biosourcé par fermentation pourrait connaître un nouveau tournant, après une série de désillusions industrielles au tournant des années 2015 (BioAmber, Myriant, Reverdia). Ces échecs étaient imputables en premier lieu à la chute des prix du pétrole, rendant la production par fermentation non compétitive, mais aussi à d'autres facteurs d'ordre financier (besoins en financement très importants pour la construction des premières usines et vallée de la mort de l'innovation) et économiques (manque de maturité des chaînes de valeur, peu d'applications pour lesquelles un green premium est applicable). Plusieurs annonces récentes laissent penser que sa production à partir de biomasse pourrait être relancée. Roquette a ainsi obtenu le label de produit biosourcé pour BIOSUCCINUM en 2021. Fin 2022, DSM, près de trois ans après s'être désengagé de sa co-entreprise avec Roquette (Reverdia), a cédé sa technologie de production d'acide succinique par fermentation de levures à Technip Energies. L'année dernière, LCY Biosciences avait annoncé avoir relancé l'ancienne usine d'acide succinique de BioAmber au Canada. Toutes ces annonces traduisent un regain d'intérêt des utilisateurs d'acide succinique pour le biosourcé, en partie liée aux contraintes réglementaires et aux attentes sociétales croissantes pour des polymères et matériaux avec une empreinte environnementale plus faible.

5.5 AUTRES UTILISATIONS NON ETUDIÉES MAIS POUANT MOBILISER À TERME DES VOLUMES TRÈS SIGNIFICATIFS DE BIOMASSE

Le déroulé de l'étude a permis de mettre en évidence d'autres utilisations de biomasse pour la production de molécules biosourcées, sortant du champ de l'étude (molécules ou biomasse différentes). Ce paragraphe détaille quelques éléments relatifs à ce sujet et permet d'entamer une prise de recul par rapport au périmètre étudié. Il ne constitue pas une liste et une analyse exhaustive.

5.5.1 LE BIOETHANOL DE SECONDE GENERATION

Compte tenu de l'analyse réalisée précédemment sur la demande en bioéthanol, notamment pour l'unité de Michelin pour la production de 1,3-Butadiène, la production de bioéthanol de seconde génération constitue une utilisation potentiellement importante de biomasse lignocellulosique. D'un point de vue biochimique, cette biomasse est moins riche en sucres fermentescibles que les biomasses céréalières et sucrières. Il est par ailleurs nécessaire de séparer les fractions riches en lignine de celles riches en cellulose avant de pouvoir obtenir un substrat de fermentation.

Les experts mobilisés sur cette question conviennent du fait qu'il existe un double enjeu :

- Le défi chimique et technologique de la production d'éthanol 2G
- Sa compétitivité, qui peut être favorisée par le cadre réglementaire. La valorisation de la lignine constituera un facteur important de sa compétitivité ainsi que pour l'équilibre économique des bioraffineries.

Le développement de la production de bioéthanol 2G pose la question de l'atténuation du changement climatique car cela supposerait de prélever du carbone stocké sous forme de cellulose. Une récente publication [279] a étudié l'impact du prélèvement des résidus lignocellulosiques de culture sur le stock de carbone dans les sols cultivés à l'échelles de différentes zones géographiques métropolitaine et pour une série d'utilisations. Selon les cas considérés, elle démontre l'existence d'un optimum permettant à la fois de fournir la bioéconomie en lignocellulose et de préserver le stock de carbone des sols.

5.5.2 LA PRODUCTION DE POLYMERES NOTAMMENT DE PLASTIQUES BIOSOURCES

Parmi la production de polymères, celle de plastiques biosourcés constitue une **utilisation potentiellement forte de biomasse**. Elle nécessite en ce sens une analyse approfondie de la taille de la demande potentielle et du gisement de biomasse mobilisé. A titre d'exemple, il existe un projet de développement de la troisième plus grande unité de production de PLA au monde, située en France, par Total Corbion (200 kt). Cette production reposera vraisemblablement sur des importations du monomère, l'acide lactique, et ne mobilisera pas de biomasse française. Le PLA produit sera à son tour probablement destiné à un usage à l'export.

Les plastiques sont actuellement utilisés à environ la moitié pour la production d'emballages, dont la moitié est destinée à un usage alimentaire (dires d'experts). En France, l'évolution de la réglementation sur les plastiques (loi AGEC et décret « 3R » pour Réduction, Réemploi et Recyclage) a pour but la diminution globale de la production et de l'utilisation de plastiques. Elle soumet le développement de l'utilisation de plastiques biosourcés en France à l'existence de filières de recyclage. Il faut pour cela démontrer leur **recyclabilité** ce qui n'est actuellement pas le cas pour le PLA, le PEF ou encore le PBS (acide succinique) en France. La démonstration est complexe dans la mesure, notamment, où **les faibles volumes actuellement représentés ne permettent pas l'existence d'une filière de tri et recyclage**. Ces plastiques biosourcés risquent en conséquence d'être **interdit si une filière de tri et de recyclage n'est pas rapidement mise en place**. Cela impliquerait en premier lieu le choix d'un plastique biosourcé afin de concentrer les efforts sur une filière et de contribuer à une forme de massification des flux.

L'objectif de recyclabilité des plastiques biosourcés est cohérente avec l'objectif de fin des plastiques à usages uniques en 2040 inscrite dans la loi AGEC du 10 février 2020. Cela impliquera en effet une collecte aménagée, acceptant des gisements de plus en plus réduits.

5.5.3 LA PRODUCTION DE SOLVANTS BIOSOURCES

Les solvants sont des molécules largement utilisées dans l'industrie pour l'extraction de composés, la conduite de réactions chimiques et la formulation de produits finis. Les marchés applicatifs sont

nombreux, depuis les peintures, adhésifs et revêtements (*coatings*), jusqu'aux matériaux techniques, à l'alimentaire, la cosmétique et la pharmaceutique.

L'Europe représente près d'un quart du marché mondial des solvants. La production de solvants à l'échelle de l'Union européenne est largement pétrosourcée : moins d'1,5% de la production globale était biosourcée en 2018 (75 kt/an sur les 5 millions de tonnes produites dans l'UE) [48]. Le marché des solvants est très large mais la production européenne reste relativement faible et de nombreuses contraintes réglementaires (enregistrement, évaluation et autorisation REACH), toxicologiques et logistiques s'appliquant à la production et à la commercialisation des solvants font que le changement de matières premières pour aller vers l'utilisation de biomasse reste souvent relégué au second plan des priorités industrielles [48].

Toutefois, des projets émergents se développent en France et à l'étranger, soutenus par des déterminants environnementaux forts et des incitations réglementaires (substitution de molécules préoccupantes) sur les produits finis dont la production implique l'utilisation de ces solvants. Les applications des solvants biosourcés concernent essentiellement des marchés de spécialité à plus forte valeur ajoutée, qui peuvent assumer les coûts de production plus élevés des solvants biosourcés par rapport à leurs équivalents pétrosourcés, tels que la cosmétique, la pharmaceutique ou certains segments de marché des peintures et coatings [48].

Parmi les solvants biosourcés principaux produits à l'échelle mondiale, on trouve principalement l'éthyl acétate et l'éthyl lactate (Vertec Biosolvents, Corbion, CropEnergies), ainsi que la turpentine. En Europe, 65% des solvants biosourcés sont obtenus à partir de bois, et 35% à partir de sucre ou d'amidon [48].

La société CIRCA a par ailleurs reçu un financement dans le cadre d'un projet européen (RESOLUTE) pour la construction d'une première unité industrielle de production en France de 1000 t/an de Cyrene, un solvant biosourcé dérivé de lévoglucosénone, obtenu par chimie catalytique à partir de co-produits de bois. Des projets de réplification d'usine sont envisagés, et pourraient à l'avenir utiliser d'autres co-produits lignocellulosiques comme des résidus de cultures agricoles. Ce solvant présente des performances techniques intéressantes, une faible toxicologie et une très bonne ACV, lui permettant de se positionner comme une alternative pertinente à des solvants pétrosourcés comme le DMF ou le NMP, largement utilisés en pharmaceutique, dans les polymères et les matériaux.

La société NXTLEVEL, *joint venture* entre GFB Biochemicals et Towel Engineering, vient également de lever des fonds pour l'industrialisation de la production d'acide lévulinique puis de ses dérivés (éthyl lévulinate, butyl lévulinate, cétales). Ces dérivés trouvent des applications variées comme solvants pour la cosmétique, les produits d'entretien ou les coatings. La société a annoncé qu'elle commencera la production d'acide lévulinique par conversion chimique de sucres de biomasses lignocellulosiques dans une future usine dans le sud de la France en 2025. Cette usine utilisera essentiellement des biomasses locales et aura une capacité de production de l'ordre de 20 kt/an.

5.5.4 L'UTILISATION POTENTIELLE D'HUILES VÉGÉTALES EN HVO ET LE PRINCIPE DU BIOMASS BALANCE

Parmi les autres utilisations consommatrices de biomasse oléagineuse, les huiles végétales hydrogénées (Hydrotreated Vegetable Oil ou HVO) sont une voie de **valorisation industrielle des huiles végétales**. Le produit obtenu est considéré comme un **diesel « vert » de haute qualité permettant une substitution directe du gasoil d'origine pétrosourcée, tout en améliorant les émissions après combustion**.

Plusieurs types de biomasse peuvent être utilisés pour produire ces hydrocarbures comme les huiles végétales usagées, les graisses animales, l'huile de palme mais aussi les huiles végétales métropolitaines et notamment **l'huile de colza**. Des dérivés d'huiles comme des acides gras, des mono- et diglycérides potentiellement obtenus comme coproduits de l'industrie peuvent également être employés.

Le procédé de production s'inspire de la pétrochimie et implique un « hydrocraquage » des produits de départ impliquant différentes transformations chimiques. En effet, l'hydrogénation des insaturations

n'est pas la seule réaction impliquée, l'hydrotraitement inclue également une hydrodéoxygénation pour éliminer les atomes d'oxygène et/ou une hydrodécarboxylation éliminant les fonctions « CO₂ ». Au cours de ces réactions chimiques, les chaînes carbonées peuvent aussi être coupées. Au bilan, **le procédé est similaire à un cracking du pétrole** et va générer différentes coupes d'alcane séparables par distillation.

Les produits obtenus sont donc :

- Des gaz pouvant être liquéfiés (GPL)
- Des fractions légères d'hydrocarbures pouvant des équivalents au kérosène pour les systèmes de chauffage ou comme carburant pour les avions. On inclue ici le bionaphta (coupe en C5-C10).
- Des fractions plus lourdes qui sont équivalentes au diesel issu du pétrole. C'est ce qui définit le diésel « vert » ou diésel-HVO, plus pur en composition hydrocarbonée que le gasoil.

Plusieurs acteurs se positionnent sur la production de HVO et, en France, cela se limite à Total Energies sur son site de La Mède qui prévoyait une production à partir d'huile de palme mais aussi à partir du colza.

Le principe du *biomass balance* (déjà détaillé dans le paragraphe 0 page 106) permet la vente de diesel dont une part a été produite à base de biomasse, avec une ACV améliorée. L'intérêt est de ne pas avoir à ségréguer une fabrication de HVO par rapport à une fabrication de diesel pétrosourcé et de pouvoir mutualiser au moins partiellement les unités de production. Cela permet une valorisation de l'origine biosourcée d'une partie du diesel sans les coûts associés à la ségrégation.

Ce procédé nouvellement mis en œuvre à l'échelle métropolitaine constitue ainsi, en théorie, une potentiellement forte utilisation de biomasse (dont huile de colza), tirée par le potentiel commercial de ce produit *mass balance*. Toutefois, les experts du secteur ont confirmé que s'il y a pu y avoir un flux d'huiles de colza vers la Mède transformés selon ce procédé, ce flux n'est vraisemblablement plus existant ou minime. L'objectif de ce type d'installation en France serait plutôt de valoriser des corps gras usagés.

Encadré : L'approche « mass balance » et concept de bio-attribution

Une des limites potentielles des produits biosourcés comparativement aux produits fossiles réside dans le fait qu'ils entrent souvent dans les mêmes chaînes d'approvisionnement et de procédés que les matières pétrosourcées, et les fabricants perdent souvent en compétitivité économique lorsqu'ils passent à un approvisionnement biosourcé pour une matière. L'établissement de nouvelles bioraffineries et de nouvelles chaînes de valeur dédiées à de la production 100% biosourcée s'avère complexe et coûteuse.

Afin de faire face à cette difficulté, il semble pratique de pouvoir utiliser les raffineries pétrolières existantes pour transformer des matières renouvelables à la place des matières fossiles. Cependant, les raffineries opèrent à des grandes échelles, largement supérieures à l'approvisionnement potentiel en matières renouvelables. Ainsi, un compromis a été trouvé et se développe activement : l'approche *mass balance*.

Au cours de la dernière décennie, l'approche « mass balance » a pris une importance croissante pour la conversion progressive des matières premières d'origine fossile en matières premières renouvelables ou circulaires. L'industrie chimique peut utiliser cette approche pour fournir des preuves qu'une partie des matières premières d'origine fossile ont été remplacées par des quantités données de biomasses certifiées durables.

L'enjeu principal est de pouvoir convertir l'industrie pétrochimique en nourrissant les systèmes et procédés pétrochimiques actuels avec des matières premières renouvelables, en gardant une trace des quantités de matières premières renouvelables apportées et en les allouant à des produits finis spécifiques, afin de pouvoir mettre en avant certains produits *100% mass balanced*, plutôt que d'avoir un ensemble de produits avec chacun un contenu en biosourcé faible. In fine, une faible part des atomes de carbone individuels du produit seront renouvelables, et cette allocation est vérifiée par organisme indépendant, ce qui peut donner lieu à des certifications. Les produits issus de ces filières sont qualifiés de « bio-attribués » (Figure 53). La notion de bio-attribué est de plus en plus utilisée par les fournisseurs et un nombre croissant d'annonces ont été prononcées en ce sens. Arkema a ainsi obtenu fin 2022 la certification *mass-balance* ISCC+ pour une série de monomères dérivés d'acide acrylique. Grâce à cela, la société proposera une série d'additifs et de résines de spécialité certifiées « bio-attribuées ». Unilever a également annoncé récemment avoir développé un accord d'approvisionnement pour un surfactant qui est le premier au monde à être obtenu par une approche *mass balance*.

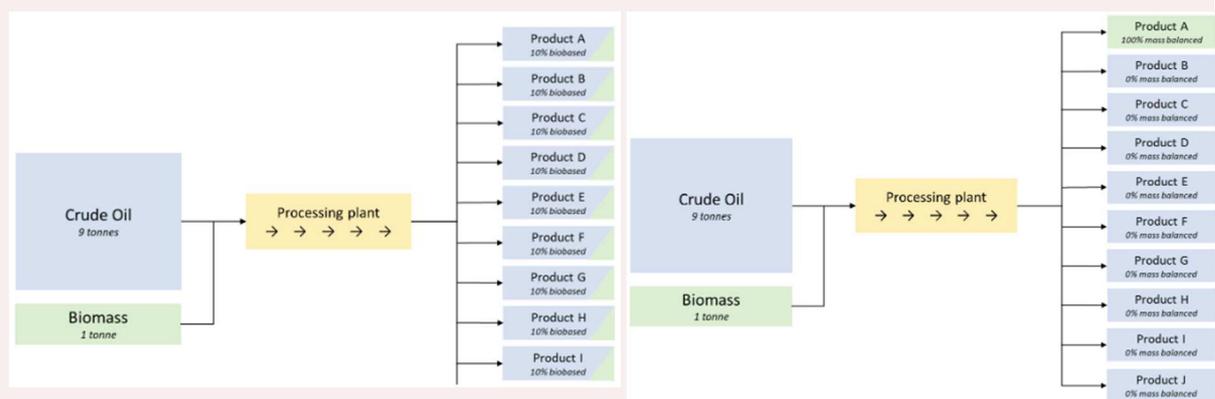


Figure 53 Illustration du concept de mass balance [243]

La Figure 53 illustre le concept de mass balance avec le cas d'une distribution du contenu biosourcé dans une variété de produits, en prenant l'hypothèse d'une répartition équitable (gauche), et une approche mass-balance (droite), pour allouer le contenu biosourcé sur un ensemble de produits, en allouant à 1 tonne du produit A un contenu *100% mass balanced*.

Une approche de *mass balance* a été développée conjointement par BASF SE et TÜV SÜD. Cette méthode n'est pas basée sur la masse de biomasse utilisée, mais sur la valence chimique des composants atomiques individuels (approche stœchiométrique) [241][242].

Cette approche *mass-balance* fait débat dans l'industrie. A court terme, elle présente l'avantage d'être facile à utiliser et d'augmenter la part de ressources renouvelables comme matières premières dans l'industrie chimique. A l'inverse, l'approche peut être trompeuse pour le consommateur qui peut acheter des produits labellisés comme « renouvelables » ou « biosourcés », alors qu'il n'y a physiquement qu'une faible partie voire pas du tout de constituants biosourcés [243].

Il est important de définir des standards transparents et robustes pour prévenir les cas de greenwashing.

5.6 BILAN DES DETERMINANTS DE LA DEMANDE EN PRODUITS BIOSOURCÉS

Chaque molécule étudiée est soumise à ces déterminants avec une sensibilité variée en fonction d'une diversité de paramètres : caractéristiques chimiques (ex : fonctionnalité non permise par le pétrosourcé), procédé (ex : innovation rendant l'étape d'extraction particulièrement peu coûteuse), marché sur lequel elle est positionnée (ex : substitution « drop-in » de molécule pétrosourcée ou nouvelle fonctionnalité), historicité de la production, niveau d'investissement et d'industrialisation... A cela s'ajoutent des drivers pouvant être propres à chaque molécule. Cela induit des **perspectives de développement hétérogènes compte tenu de la diversité des molécules étudiées.**

L'analyse globale des déterminants montre un impact favorable au développement de la production de molécules biosourcées. Cependant, d'après les experts, il est actuellement limité par diverses difficultés d'ordre économique : financement de l'industrialisation, premium du biosourcé pour l'instant trop faible par rapport au surcoût de production, prix actuels de l'énergie et des matières premières... Ainsi, en réponse à des contraintes économiques de court terme s'observe chez certains acteurs un **recentrage sur des marchés à plus forte valeur ajoutée (molécules ou services) synonymes de production plutôt revue à la baisse et donc de moindre consommation de biomasse.** En définitive, l'analyse des déterminants globaux laisse augurer une **croissance modeste de la production des molécules biosourcées étudiées.**

Cette analyse interroge par ailleurs le poids de la disponibilité en biomasse (quantité, qualité) parmi les déterminants du développement de la production biosourcée. Compte tenu des faibles volumes mobilisés à ce jour (0,5% des ressources disponibles), la disponibilité en biomasse apparaît comme un sujet de préoccupation secondaire, après R&D et industrialisation. Ce constat est renforcé par le fait que les matières premières utilisées sont des commodités (éthanol, glucose, mélasse) donc disponibles sur le marché mondial mais soumises à une exposition à la volatilité des marchés mondiaux et à des risques de ruptures d'approvisionnement. De plus, la versatilité de certains procédés permettant des changements de biomasse (ex : C6 origine betterave ou céréales) atténue également l'importance de ce déterminant.

Toutefois, la compétitivité prix de la biomasse reconnue comme un facteur important de l'équilibre économique des industries déjà existantes

Enfin, au-delà de ces tendances affectant la chimie biosourcée, des **points de bascule** pourraient venir provoquer des changements structurants provoquant le développement de certaines productions de molécules biosourcées et ainsi venir exercer un impact notable sur les utilisations de biomasse françaises. Cela concerne en particulier le **déblocage de la production d'éthanol 2G**, actuellement soumise à des défis technologiques et d'équilibre économique, des réglementations susceptibles de modifier la compétitivité relative de biomasses ou d'utilisations par rapport à d'autres, des décisions d'investissements et le déclenchement de projets d'industrialisation (ex de Michelin).

6. CONCLUSION

Cette étude avait pour objectif premier la réalisation d'une **cartographie des flux de biomasse orientés vers la production d'une sélection de molécules biosourcées**. La réalisation de ce bilan de flux a permis de mettre en évidence la part actuellement faible de la biomasse mobilisée par la production des molécules biosourcées étudiées, à hauteur de **0,5% de la ressource en carbone disponible** dans la biomasse des trois grandes bioraffineries des corps gras, du sucre et de l'amidon.

Ramené en équivalent surfaces, cette consommation représente de **1,6% à 6,4% des hectares** de cultures considérées si l'on affecte toute la demande à une seule culture (calcul théorique), soit **0,19 à 0,67% des surfaces en grandes cultures françaises**, ce qui reste très faible en comparaison des autres usages ou des exports. Le poids de la production de molécules biosourcées dans la consommation de biomasses agricoles est donc encore faible et devrait le rester à court terme. En effet, les annonces des industriels laissent envisager un doublement de la production dans les années à venir mais ce constat doit être nuancé par une situation actuelle qui n'en est qu'aux prémices de l'industrialisation des procédés.

Dans la limite de son périmètre et des hypothèses formulées, l'étude ne permet donc pas de conclure à une quelconque menace sur les utilisations des biomasses considérées, notamment alimentaires. Il existe toutefois un risque d'asymétrie offre/demande à court terme pour la bioraffinerie du sucre.

Un travail prospectif pourrait à présent être mené pour chiffrer plus finement les évolutions potentielles des flux. En effet, pour une analyse à moyen et long termes, l'étude des déterminants a montré un **contexte tendanciellement favorable** au développement de la production des molécules biosourcées étudiées et confirme le **potentiel du secteur à répondre aux enjeux de mutation du secteur de la chimie** (décarbonation, souveraineté, etc.). La consommation de biomasse pourrait donc évoluer à la hausse avec **l'industrialisation** de certains projets déjà existants ou à venir.

Ces **consommations** potentielles doivent être **anticipées** pour accompagner la transition vers une part plus significative de matières biosourcées dans nos consommations sans générer de compétition sur les usages des biomasses brutes ou transformées mais aussi pour anticiper les besoins et ainsi limiter le risque industriel lié aux futures unités de production de biomolécules en France.

Il doit aussi être rappelé que **l'étude s'est focalisée sur les principales biomolécules actuellement produites en France et utilisant des matières premières produites sur le sol français pour le secteur de la chimie. Elle ne couvre ainsi pas tous les usages potentiels de biomasse à moyen et long pouvant être fortement consommateurs de carbone biosourcé**, notamment la production de bioéthanol de seconde génération, de polymères (plastiques, en particulier *PLA*) et des usages potentiels des huiles végétales hydrogénées (HVO) en substitution de matières fossile (*jetfuels* et *bio-naphta*, *mass-balance*).

Par ailleurs, bien que cet enjeu constitue un des déterminants clés pour l'avenir des productions de molécules via les biotechnologies et qu'il concerne une partie des biomolécules étudiées, il doit être précisé que **l'étude n'avait pas pour objectif d'étudier les aspects éthiques et biologiques autour de l'utilisation de souches de micro-organismes génétiquement modifiés** et ne réunit donc pas les éléments qui permettraient d'éclairer spécifiquement cet enjeu qui dépasse le périmètre de la commande émise par FranceAgriMer.

Cette **étude, pionnière d'un point de vue méthodologique**, a permis de tester différents moyens de visualisation et d'analyse des procédés, de leurs rendements et des consommations afférentes de biomasse, tout en les normalisant pour les comparer et les repositionner dans la panoplie des usages déjà existants. **L'étude articule production de biomasse agricole et production de molécules biosourcées**, deux secteurs interconnectés mais rarement étudiés simultanément.

Ce travail est un **succès en termes de mobilisation des acteurs**, montrant la volonté de disposer d'une **base de connaissances** pour une **meilleure prise en compte des enjeux d'approvisionnement en biomasse** dans le développement du secteur de la chimie biosourcée. Il s'appuie sur la mobilisation d'un Comité de Pilotage très diversifié, la réalisation d'entretiens poussés avec 25 experts et la réunion d'un groupe de travail ad-hoc regroupant une vingtaine d'experts du domaine, issus de la recherche, d'industries ou d'agences nationales.

Recouper des données issues de sources de données contradictoires dans un contexte de secret industriel, sans surprise, représenté la principale difficulté de l'exercice.

Percevoir la possibilité pour les industriels de passer d'une source de biomasse à l'autre aura aussi été une des difficultés majeures. Ce point est pourtant crucial car il permet d'évaluer **le niveau de captivité d'une technologie par rapport à une biomasse donnée**, et constitue donc un enjeu clé de **l'anticipation des gisements à mobiliser et des risques de tensions à anticiper**.

Enfin, la réactualisation du travail d'analyse mené pourrait permettre de mettre à jour les consommations de carbone liées aux futures unités de molécules biosourcées, et ouvre la porte à l'extension de ce travail à d'autres utilisations et d'autres biomasses, y compris lignocellulosiques.

ANNEXES

1. METHODOLOGIE EMPLOYEE POUR LA REALISATION DES BILANS

1.1 BILAN SUCRERIE

Hors éthanol

Les valeurs suivantes sont extraites du rapport annuel édité par la CGB (moyennes olympiques sur les campagnes 2015-16 à 2019-20)

- Production de betterave
- Exportation de betterave
- Production et utilisations de pulpes

La production de sucre de betterave provient de la CGB et de Prodcom (sucre total retranché de la production de sucre de canne).

La quantité de mélasse dédiée à l'alimentation animale provient de ce rapport [MPAA 2020 \(agriculture.gouv.fr\)](#). La part de mélasse d'origine betteravière (40%) provient d'une enquête réalisée par le SNIA auprès de ses adhérents. La quantité de mélasse dédiée à la fermentation par les levuriers provient de dires d'experts.

La production de mélasse provient de ProdCom, on peut en déduire la quantité de sucre issue du 3^{ème} jet. Les importations et les exportations de mélasse proviennent de TradeMap.

1.2 BILAN ETHANOL

Les quantités d'éthanol produites sont extraites du rapport annuel édité par la CGB.

Moyenne olympique khL	
Alcool de betterave	8 688
Alcool de céréales	8 407

La part utilisée en biocarburant est détaillée dans la [Fiche filière bioéthanol 2022](#) (campagne 2019/2020)

Betterave	28%
Maïs	21%
Blé	46%

Le site du SNPAA donne par ailleurs le chiffre de 2/3 pour la totalité de l'alcool agricole produit

1.3 BILAN BLE ET MAÏS - AMIDONNERIE

Hors éthanolerie

Le bilan USIPA 2020 détaille l'origine de l'amidon par culture et les ratios de conversion en amidon :

- 3 100 t de blé soit 1 632 t d'amidon (1,9 t de blé / t d'amidon)
- 1 900 t de maïs soit 1 188 t d'amidon (1,6 t de maïs / t d'amidon)

La production de coproduits est estimée d'après les ratios de [ce rapport](#).

L'utilisation de l'amidon pour la production d'amidon natif, d'amidon modifié et de produits d'hydrolyse est calculée d'après les ratios suivants détaillés dans [ce rapport](#).

Amidon natif	677	24%
Amidon modifié	564	20%
Produits d'hydrolyse	1 579	56%

- **Utilisation des céréales en alimentation animale**

Les quantités de maïs et blé utilisées en alimentation animales (hors autoconsommation) proviennent des Etat 13 : Incorporation des FAB campagne 2019-2020. Grains mises en œuvre par les fabricants d'aliments du bétail pour animaux en France fin mai 2022. Données arrêtées au 25/06/2022. Une moyenne des trois dernières années est utilisée.

- **Autres indicateurs structurants pour le bilan céréalier**

La totalité des autres indicateurs proviennent des bilans de campagne FranceAgriMer (moyennes olympiques des campagnes 2015-16 à 2019-20) :

- Production
- Importations (hors produits transformés pour le blé)
- Stock de début (hors produits transformés pour le blé)
- Exportations (hors produits transformés pour le blé)
- Autoconsommation
- Stock de fin (hors produits transformés pour le blé)

1.4 BILAN COLZA ET TOURNESOL

- **Indicateurs provenant des bilans FranceAgriMer**

Les indicateurs ci-dessous proviennent des bilans de campagne FranceAgriMer (moyennes olympiques des campagnes 2015-16 à 2019-20) :

- Production
- Importations
- Stock de début
- Exportations
- Alimentation animale

- Trituration
- Stock de fin

- **Production de tourteaux et d'huile**

Les ratios suivants sont employés :

	Tournesol	Colza
Huile brute	44,0%	42,0%
Tourteau déshuilé	54,0%	56,0%

Source : [Tourteaux d'oléagineux - Alimentation animale - Produits/Débouchés - Terres Univia](#)

- **Production d'huile raffinée**

La production d'huile raffinée provient de Prodcorn. Un facteur de conversion de 95,1% est appliqué pour la convertir en huile brute.

kt	Prodcorn	
Colza	Huile raffinée	234
Tournesol	Huile raffinée	340

- **Utilisations de l'huile en biodiesel et chimie**

La production d'huile raffinée est déduite de la production d'huile brute pour estimer le reste disponible pour la production de biodiesel et d'autres esters d'acides gras et acides gras fonctionnalisés.

- Acides gras fonctionnalisés et autres esters d'acides gras

Cette production est la somme des ventes "chimie" des Stéarinerie Dubois, de Valtris et d'Avril. Elle est estimée à dire d'experts à la suite des entretiens.

- Production de biodiesel

Elle est déduite de la quantité d'huile disponible, une fois retranchée les utilisations en alimentation humaine et pour la production d'acides gras fonctionnalisés et autres esters d'acides gras.

- Glycérol

La production de glycérol brut en est déduite (rendement de 10%).

L'usine Metabolic Explorer en consomme actuellement 13 kt pour une production de 1,3 propanediol de 5 kt et d'acide butyrique d'1 kt.

Le reste du glycérol est principalement raffiné.

2. BIBLIOGRAPHIE MOBILISÉE

Nu-méro	Citation de la publication, de la source	Lien
[1]	Starch Europe	https://starch.eu/the-european-starch-industry/
[2]	Horizon Eco Nord pas de Calais-Picardie - La fabrication de produits amylicés, un secteur de l'industrie agro-alimentaire ancré au cœur de la	https://hautsdefrance.cci.fr/content/uploads/sites/6/2016/09/Fabrication-de-produits-amylaces-01092016.pdf

	région Hauts-de-France, N°220, septembre 2016	
[3]	USIPA - Les chiffres clés du secteur, 2019	https://www.amidon-usipa.fr/en-bref/chiffres-cles
[4]	Boursier Bernard, Division des applications, Société ROQUETTE, "Amidons natifs et amidons modifiés alimentaires", Techniques de l'ingénieur Agroalimentaire, DOI 10.51257/a-v1-f4690, 2005 09/10	https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/additifs-et-adjouvants-alimentaires-42426210/amidons-natifs-et-amidons-modifies-alimentaires-f4690/
[5]	Colonna Paul, INRA, "Bioraffineries", Techniques de l'ingénieur Chimie verte, DOI 10.51257/a-v1-chv602, 2020 02/10	https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-du-vegetal-et-produits-bio-sources-42570210/bioraffineries-chv602/
[6]	USIPA - Process amidonnerie maïs	https://www.amidon-usipa.fr/images/DOCS_pdf/procedes/Process_Amidonnerie_maais.jpg
[7]	abc Machinery - Starch processing	https://www.abcmach.com/grain-processing/starch-processing/
[8]	International starch institute	http://www.starch.dk/isi/profile/home.asp
[9]	USIPA - Process amidonnerie blé	https://www.amidon-usipa.fr/images/DOCS_pdf/procedes/Process_Amidonnerie_ble.jpg
[10]	Echange Jérôme Lenôtre - PIVERT	
[11]	Bhatia, KK, (2004), High yield bioproduct recycle process for anhydro sugar alcohols, (US Patent n° 6,831,181 B2)	https://www.freepatentsonline.com/6831181.pdf
[12]	Marques et al., 2016. Sorbitol Production From Biomass and Its Global Market. In: Kaur Brar, S., Jyoti Sarma, S., Pakshirajan, K. (Eds.), Platform Chemical Biorefinery. Elsevier, pp. 217–227	https://www.researchgate.net/profile/Sara-Magdouli-2/publication/305366435_Sorbitol_Production_From_Biomass_and_Its_Global_Market/links/59fa5bb3a6fdcc9a16267691/Sorbitol-Production-From-Biomass-and-Its-Global-Market.pdf
[13]	Svenson, K, (1992), Enzymatic hydrolysis of starch to glucose, using a genetically engineered enzyme, (W 92/0081)	https://patentimages.storage.googleapis.com/d2/fc/ac/19ebaad8ae6442/WO1992000381A1.pdf
[14]	US Department of Energy, 2001 - New continuous isosorbide from sorbitol	https://www.nrel.gov/docs/fy01osti/30907.pdf
[15]	Engineers India Research Institute - Feasibility report on sorbitol from maize starch	http://mpagro.org/tenders/DFR7637.doc.pdf
[16]	Zauba - India import export trading data	https://www.zauba.com/
[17]	Tereos - Rapport annuel 2020/21	https://tereos.com/app/uploads/2021/06/2021-annual-report.pdf
[18]	S3PI Artois - Présentation de la nouvelle amidonnerie de Maïs sur le site de Roquette Frères à Lestrem	https://www.s3pi-artois.fr/Presentation-de-la-nouvelle-amidonnerie-de-Mais-sur-le-site-de-Roquette-Fr%C3%A8res
[19]	Roquette - Rapport d'activité et de développement durable 2017	https://fr.roquette.com/-/media/contenus-other-pages/radd/radd-2017/reports/roquette-radd-hd.pdf
[20]	L'Usine Nouvelle - "Amidon : le site de Cargill à Haubourdin bloqué", 01/2020	https://www.usinenouvelle.com/article/amidon-le-site-de-cargill-a-haubourdin-bloque.N1192712
[21]	L'Usine Nouvelle - "Cargill va repositionner l'activité de son amidonnerie de Haubourdin", 11/2019	https://www.usinenouvelle.com/article/cargill-va-repositionner-l-activite-de-son-amidonnerie-de-haubourdin.N906489
[22]	AGROMedia - "Chamtor rejoint le groupe ADM", 07/2017	https://www.agro-media.fr/actualite/chamtor-rejoint-groupe-adm-25731.html

[23]	Roquette - "€25 million investment for polyols at Lestrem site, France", 03/2022	https://www.roquette.com/media-center/press-center/20220322-press-release-french-plant-polyols-investment
[24]	Plastics Today - Breaking News in Flexible Packaging - "Roquette brings world's largest isosorbide production unit on stream", 06/2022	https://www.plasticstoday.com/roquette-brings-worlds-largest-isosorbide-production-unit-stream
[25]	De Jong Ed et al., "Bio-based chemicals a 2020 update", IEA Bioenergy, 2020	https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/Bio-based-chemicals-a-2020-update-final-200213.pdf
[26]	Tereos - Disclosure document, 04/2021	https://tereos.com/app/uploads/2021/04/disclosure-document-april-12-2021.pdf
[27]	Tereos - Press release - 2019/20 Annual press conference	https://tereos.com/app/uploads/2020/06/tereos-2019-20-annual-results.pdf
[28]	Beilstein J. "Isosorbide and dimethyl carbonate : a green match", Org. Chem. 2016, 12, 2256–2266. doi:10.3762/bjoc.12.218	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5238621/pdf/Beilstein_J_Org_Chem-12-2256.pdf
[29]	Les Champs de l'amidon - Centre d'information de l'amidon - "Les maltodextrines, alliées de la nutrition spécialisée", 05/2015	http://leschampsdelamidon.fr/wp-content/uploads/2015/05/Maltodextrine.pdf
[34]	Roquette- "The challenges of securing starch derivatives supply in a tight EU market", 09/2021	https://www.roquette.com/media-center/news/securing-starch-derivatives-supply-european-market
[35]	S&D Sucden - Sugar process flowcharts	https://www.sucden.com/en/products-and-services/sugar/process-flowcharts/
[36]	Rapport annuel CGB	
[37]	Biéthanol - "Présentation du superéthanol E85"	https://www.bioethanolcarburant.com/carburant-superethanol-e85/
[38]	Web-Agri - Alimentation animale - coproduits - "Quel intérêt des drêches dans la ration des vaches laitières", 01/2021	https://www.web-agri.fr/alimentation-animale/article/175136/quel-interet-des-dreches-dans-la-ration-des-vaches-laitieres
[39]	Cultures sucre - "Statistical memo - sugar and other co-products - 2019-2020 campaign"	https://www.cultures-sucre.com/wp-content/uploads/2020/09/memo-stat-2020-en-r.pdf
[40]	de Cherisey H, ADEME, "Panorama et potentiel de développement des bioraffineries", 10/2010	https://www.bioeconomie-hautsdefrance.fr/wp-content/uploads/2020/05/panorama-et-developpement-des-bioraffineries.pdf
[41]	Entretien	
[42]	Entretien avec Tereos, 05/2022	
[43]	FranceAgriMer - Les synthèses de FranceAgriMer- "La chimie du végétal une valorisation non-alimentaire et non-énergétique de la biomasse", 12/2012, n°2	https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/24903/document/Chimie-vegetal_V2.pdf?version=5
[44]	SNPAA - Agricultural alcohol - Procedures	https://www.alcool-bioethanol.net/en/procedes-2/
[45]	Semencemag - "bioéthanol : variétés et rendement énergétique",	https://www.semencemag.fr/ethanol-varietes-cereales.html
[46]	CRAAQ Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec - La production d'éthanol à partir de grains de maïs et de céréales	https://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC029.pdf
[47]	Tereos - Rapport annuel 2010	https://franckcamuset.files.wordpress.com/2011/03/110310-rapport-annuel-de-tc3a9rc3a9os-2010.pdf

[48]	Spekreijse et al., Insights into the European market of bio-based chemicals. Analysis based on ten key product categories, EUR 29581 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-79-98420-4, doi:10.2760/549564, JRC112989	https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC112989/jrc_european-market_biochemicals_online.pdf
[49]	Reuters - Commodities news - "Cristal Union switches biofuel unit to alcohol to meet disinfectant demand", 03/2020	https://www.reuters.com/article/us-health-coronavirus-france-ethanol-idUSKBN2141EC
[50]	Cristal Union - Activity report 2017/2018	https://s3.cristal-union.fr/uploads/2018/09/cristal-union-290x230-uk-v2.pdf
[51]	Tereos- Press Conference H1 2020/21, 11/2020	https://te-reos.com/app/uploads/2020/11/20201118-en-tereos-presentation-alexis-duval-resultats-s1.pdf
[52]	Terre-Net - "Origny, fleuron d'une industrie française de l'éthanol en plein essor", 04/2007	https://www.terre-net.fr/actualite-agricole/france-local/article/origny-fleuron-d-une-industrie-francaise-de-l-ethanol-en-plein-essor-203-39446.html
[53]	Markets and Markets - "Bioethanol Market by Feedstock (Starch based, sugar based, cellulose based), End-use Industry (transportation, pharmaceuticals, cosmetics, alcoholic beverages), Fuel blend (E5, E10, E15 to E70, E75 & E85), and Region - Global Forecast to 2025"	https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/bioethanol-market-131222570.html
[54]	Biéthanol - "Superéthanol-E85 : hausse de 33% de la consommation en 2021", 01/2022	https://www.bioethanolcarburant.com/actualite/cp-bioethanol-superethanol-e85-hausse-de-33-de-la-consommation-en-2021/
[55]	INCI Beauty - La réglementation cosmétique - "Tout savoir sur l'alcool dénaturé utilisé en cosmétique", 04/2020	https://incibeauty.com/blog/241-tous-savoir-sur-l-alcool-denature-utilise-en-cosmetique
[56]	Biofuels Digest - "Cristal Union shifts from fuels to pharma-grade ethanol at Arcis plant in coronavirus response", 03/2020	https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2020/03/17/cristal-union-shifts-from-fuels-to-pharma-grade-ethanol-at-arcis-plant-in-coronavirus-response/
[57]	Energine - "De la bêtaïne à partir d'un sous-produit de bioéthanol", 12/2010	https://www.energine.com/de-la-betaine-a-partir-dun-sous-produit-de-bioethanol/10976-2010-12
[58]	Paananen H, (2015), Process for recovering betaine, (EU patent n° EP2 923 749 A1)	https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/76/f5/70c17a5c713669/EP2923749A1.pdf
[59]	Mohammadzadeh et al., A new approach for separation and recovery of betaine from beet molasses based on cloud point extraction technique, J Food Sci Technol, 2018	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5876189/pdf/13197_2017_Article_2999.pdf
[60]	Hamstra, RS, (2002), Process for recovering valuable compounds from vinasse produced during fermentation, (EU patent n° EP 0 794 246 B1)	https://patentimages.storage.googleapis.com/79/51/43/923cf0ede031ea/EP0794246B1.pdf
[61]	Usine Nouvelle - "Tereos se lance dans l'extraction de bêtaïne à Origny-Sainte-Benoite", 07/2012	https://www.usinenouvelle.com/article/tereos-se-lance-dans-l-extraction-de-betaine-a-origny-sainte-benoite.N178357
[62]	Terres et Territoires - "Visite dans l'antre de la sucrerie d'Origny-Sainte-Benoite", 10/2021	https://terres-et-territoires.com/terre-a-terre/transformation/visite-dans-lantre-de-la-sucrerie-dorigny-sainte-benoite

[63]	Les Echos - "Tereos investit 13 millions d'euros dans sa distillerie d'Origny", 03/2011	https://www.lesechos.fr/2011/03/tereos-investit-13-millions-deuros-dans-sa-distillerie-dorigny-389763
[64]	L'Usine Nouvelle - "DuPont inaugure une ligne de production en France", 07/2012	https://www.usinenouvelle.com/article/du-pont-inaugure-une-ligne-de-production-en-france.N1309417
[65]	Tereos- Réunion du clic du 18/04/2012, 2012	https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/picardie_Presentation_TEREOS.pdf
[66]	All About Feed - "Betaine applications in animal nutrition", 06/2017	https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/betaine-applications-in-animal-nutrition/
[67]	Mervat MN et al., Application of betaine as feed additives in poultry nutrition", Journal of Experimental and Applied Animal Sciences, 2018	https://www.researchgate.net/profile/Ahmed-Abdel-Wareth/publication/325117358_Application_of_betaine_as_feed_additives_in_poultry_nutrition_-_a_review/links/5b83e91d458515fd13549e2/Applcation-of-betaine-as-feed-additives-in-poultry-nutrition-a-review.pdf?origin=publication_detail
[68]	Markets and Markets - Betaine Market by Type (Synthetic Betaine and Natural Betaine), Form (Betaine Anhydrous, Cocamidopropyl Betaine, Betaine Monohydrate), Application (Food & Beverages, Animal Feed, Cosmetics, Detergents), and by Geography - Global Forecast to 2020	https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/betaine-market-58719637.html
[69]	Agrana - "Agrana launches production of crystalline betaine at €40 million plant in Tulln", 10/2020	https://ru.agrana.com/en/news/news-detail?news=1703&cHash=0c424d0aab376a7e5fb74ba2a5e17ff3
[70]	INCI Beauty- Bétaïne	https://incibeauty.com/ingredients/2163-betaine
[71]	Mordor Intelligence - Betaine Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027)	https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/betaine-market
[72]	GlobeNewsWire - "Betaine Market Size Worth US\$ 5,110.0Mn, Globally, by 2027 at 5.1% CAGR - Exclusive Report by The Insight Partners", 05/2022	https://www.globenewswire.com/news-release/2022/05/11/2440717/0/en/Betaine-Market-Size-Worth-US-5-110-0Mn-Globally-by-2027-at-5-1-CAGR-Exclusive-Report-by-The-Insight-Partners.html
[73]	Mordor Intelligence - Feed Betaine Market - Global Market Size, Trends and Forecasts (2020 - 2025)	https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/feed-betaine-market
[74]	Global Market Insights - Betaine Market Size, Regional Outlook, Growth Potential, COVID-19 Impact Analysis, Competitive Market Share & Forecast, 2022 – 2028	https://www.gminsights.com/industry-analysis/betaine-market
[75]	Sano, History of glutamate production, The American Journal of Clinical Nutrition, Volume 90, Issue 3, September 2009, Pages 728S–732S, https://doi.org/10.3945/ajcn.2009.27462F,2009	https://watermark.silverchair.com/728s.pdf?token=AQEC-AHi208BE49Ooan9kkhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAslwggK-Bgkqh-kiG9w0BBwagggKvMIICqwl-BADCCAqQGCSqGSib3DQEHA-TAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMMV7fqXF5tZd09h6CAgEQgIICdQSRB19giWU6bS5ahyMKX7b6LISqi3H0g_5kloAi4AOkRgBvc eoh8ziX7Z5v04_1sUg9Fjf3D8PgscP6c1Ui-fJq4q5nC4M_sp711FexcfDoCFJkxFL--

		ZrhNG- wov_c5TF877P0w5xhSBWIPM533JTMA p4kZs7xM7RbZXwfAOqUEw2PAKn- k9g6pqdeGBPYeNLL8b41UUDURy-gpU- hluUgIKGB- MaQNW9I8bYO2u2_4boLzB_wFD0QBHrg 2H_qyn_Zd47Zy8DTujFvkNiPBFFNyqThj 2x6CGAXZ7unUbjL7lxJiyvLx26RVKUGklr- ZuGLg_DJR_FILikiCW3yCfICxnFVND- NTD4UUObss0eztVrA5h7jGralGuFkR5Y- PDYsp4FVJoKe48Afewr- GLEQSEH2gnxN8J7_xV4z2En33BIYMiW9 Tfryv247cZLRWEfkwcw37rVw2hyj0jYK_o FJTAS_X170UcAB3owXZqqe0ctieJrc4puA FFdfH6M0N4kWuHJZCRsohRMHKx- lffVKK_Ufq1m98- g9wfOJE7zvGU2e2_r0GIT6uFYM9AS1cq FVSc2-ZBmBYENFaVT45zD3ZIXqv7- m5fbygA25Z2iu- kvBqqc0GRkR0Fa7Bnu1fID7TSs- WjBLOJIWgO1vpTy-r0iKmm3bYruC- qyJYPspBqAAN628oUHN6kbjZygauT- BaxR3od2vR_Gg4u5_3K0TFMAuCCI0vL MVALyeie66GnhXe- MUCuGLZ5PpINH8uGMSF8lv2yO6_CjWi- BPPr9SJJ4GRU9toOVluoZU- aixzpx9B9FfR2oDQcYqzRS- BvW7MVfJBHiRAwp3Xl
[76]	Mustafa et al., (2020). Monosodium Glutamate (MSG) Production via Fermentation - Process Modeling and Techno-Economic Assessment (TEA) using SuperPro Designer.	https://www.researchgate.net/profile/Demetri-Petrides/publication/344149018_Monosodium_Glutamate_MSG_Production_via_Fermentation_-_Process_Modeling_and_Techno-Economic_Assessment_TEA_using_SuperPro_Designer/links/5fbac8a5a6fdcc6cc65c73ad/Monosodium-Glutamate-MSG-Production-via-Fermentation-Process-Modeling-and-Techno-Economic-Assessment-TEA-using-SuperPro-Designer.pdf?origin=publication_detail
[77]	Yoshioka, T, (1998), Method for producing L-glutamic acid by continuous fermentation, (EU patent n° EP 0 844 308 A2)	https://patentimages.storage.googleapis.com/db/6f/5f/5e91d0f045cdd2/EP0844308A2.pdf
[78]	biohaven pharmaceuticals - Glutamate platform	https://www.biohavenpharma.com/science-pipeline/glutamate
[79]	Grand View Research - Glutamic Acid Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Food & Beverages, Pharmaceuticals, Animal Feed), By Region (North America, Europe, APAC, CSA, MEA), And Segment Forecasts, 2021 - 2028	https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/glutamic-acid-market
[80]	Typology Paris - Quels sont les bienfaits de l'acide glutamique sur la peau ?	https://www.typology.com/carnet/quels-sont-les-bienfaits-de-l-acide-polyglutamique-sur-la-peau
[81]	Cosmeticobs - "Les acylglutamates : une pépite de tensio-hyper-actifs !", 10/2015	https://cosmeticobs.com/fr/articles/ingrédients-50/les-acylglutamatesnbsp-une-pepite-de-tensio-hyper-actifsnbsp-3087

[82]	Regard sur les Cosmétiques - "L'acide glutamique, un ingrédient cosmétique intelligent ?", 01/2022	https://www.regard-sur-les-cosmetiques.fr/nos-regards/l-acide-glutamique-un-ingredient-cosmetique-intelligent-2074/
[83]	Allied Market Research - "Glutamic Acid Market by End Use Industry (Pharmaceutical, Cosmetics and Personal Care, Food Industry, and others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030"	https://www.alliedmarketresearch.com/glutamic-acid-market-A15523
[84]	Les Echos - "Le japonais Ajinomoto s'implante dans la production de glutamate en Europe", 10/2003	https://www.lesechos.fr/2003/10/le-japonais-ajinomoto-simplante-dans-la-production-de-glutamate-en-europe-675196
[88]	GlobeNewsWire - Global Glutamic Acid Market Is Expected to Reach USD 22.55 billion by 2028 : Fior Markets, 02/2021	https://www.globenewswire.com/fr/news-release/2021/02/11/2174288/0/en/Global-Glutamic-Acid-Market-Is-Expected-to-Reach-USD-22-55-billion-by-2028-Fior-Markets.html
[89]	GlobeNewsWire - "Global Monosodium Glutamate Market Poised to Surge from USD 4,500.0 Million in 2014 to USD 5,850.0 Million by 2020 – MarketResearchStore.Com", 03/2016	https://www.globenewswire.com/news-release/2016/03/17/820804/0/en/Global-Monosodium-Glutamate-Market-Poised-to-Surge-from-USD-4-500-0-Million-in-2014-to-USD-5-850-0-Million-by-2020-Market-ResearchStore-Com.html
[90]	Global Bioenergies rapport - "Direct fermentation to renewable isobutene, a platform to fuels and chemicals", 10/2018	https://www.asprom.com/biotech/rocle.pdf
[91]	Global Bioenergies - annonce de presse	https://www.global-bioenergies.com/global-bioenergies-reaches-87-of-yield-target-in-isobutene-process/download.php%20(bioways.eu)
[92]	Green Car Congress - "Global Bioenergies bioisobutene process hits 70% of commercial yield at R&D scale", 07/2015	https://www.greencarcongress.com/2015/07/20150729-gbe.html
[93]	Global Bioenergies - rapport - "The Isobutene process: short term opportunity and long term potential", 10/2019	https://www.globalbioenergies-invest.com/wp-content/uploads/2019/10/GBE-octobre-2019-v3.pdf
[94]	Global Bioenergies - "500 000 euros de subvention accordés à Global Bioenergies par la Région Grand Est dans le cadre du plan France Relance", 02/2022	https://www.global-bioenergies.com/500-000-euros-de-subvention-accordees-a-global-bioenergies-par-la-region-grand-est-dans-le-cadre-du-plan-france-relance/
[95]	Global Bioenergies - "Global Bioenergies lance une opération de levée de fonds d'environ 10 millions d'euros", 12/2021	https://www.global-bioenergies.com/global-bioenergies-lance-une-operation-de-levee-de-fonds-denviron-10-millions-deuros/
[96]	Global Bioenergies - "Global Bioenergies annonce le versement de la seconde tranche de financement par l'agence européenne BBI-JU aux membres du projet OPTISOHEM", 12/2020	https://www.global-bioenergies.com/global-bioenergies-annonce-le-versement-de-la-seconde-tranche-de-financement-par-lagence-europeenne-bbi-ju-aux-membres-du-projet-optisochem/
[97]	BASF - "Innovative, sustainable technology developed by BASF and OMV: New ISO C4 plant in Burghausen/Germany starts production", 03/2021	https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2021/03/p-21-162.html
[98]	EVONIK - "Evonik starts up new isobutene plant in Antwerp", 04/2011	https://corporate.evonik.com/en/media/press-releases/corporate/evonik-starts-up-new-isobutene-plant-in-antwerp-105256.html
[99]	Premium beauty News - "A plant-based isododecane for greener, long-lasting makeup products", 01/2021	https://www.premiumbeautynews.com/en/a-plant-based-isododecane-for,17844
[100]	Global Bioenergies - "Lancement commercial de la marque LAST®", 06/2021	https://www.global-bioenergies.com/lancement-commercial-de-la-marque-last/

[101]	Global Bioenergies - "Lancement de la gamme lèvres de la marque LAST", 09/2021	https://www.global-bioenergies.com/lancement-de-la-gamme-levres-de-la-marque-last/
[102]	Global Bioenergies - "Global Bioenergies étend l'usage de son isododécane d'origine naturelle à la dermocosmétique et aux soins capillaires", 12/2021	https://www.global-bioenergies.com/global-bioenergies-etend-lusage-de-son-isododecane-dorigine-naturelle-a-la-dermocosmetique-et-aux-soins-capillaires/
[103]	Haltermann Carless - "Beautiful applications : Cosmetics and body care"	https://www.haltermann-carless.com/isododecane#Applications
[104]	Erickson, (), THE STOICHIOMETRY AND KINETIC MODELING OF AN ANAEROBIC BAFLED REACTOR, thesis	https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/172163/Erickson_mines_0052N_11451.pdf?sequence=1
[105]	AFYREN NEOXY - Mémoire en réponse à l'avis de la mission régionale d'autorité environnementale, 04/2020	http://documents.projets-environnement.gouv.fr/2020/08/31/1867856/1867856_RAAE.pdf
[106]	Pessiot et al., (2012) Fed-batch Anaerobic Valorization of Slaughterhouse By-products with Mesophilic Microbial Consortia Without Methane Production DOI 10.1007/s12010-011-9516-4, JO Applied biochemistry and biotechnology	https://www.researchgate.net/profile/Reeta-Singhania/publication/221726822_Fed-batch_Anaerobic_ValORIZATION_of_Slaughterhouse_By-products_with_Mesophilic_Microbial_Consortia_Without_Methane_Production/links/0fcfd506ae637d2235000000/Fed-batch-Anaerobic-Valorization-of-Slaughterhouse-By-products-with-Mesophilic-Microbial-Consortia-Without-Methane-Production.pdf?origin=publication_detail
[107]	Varrone et al., (2017), Continuous fermentation and kinetic experiments for the conversion of crude glycerol derived from second-generation biodiesel into 1,3 propanediol and butyric acid, Biochemical engineering journal	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369703X17302395?casa_token=Y1RI2bmiz9UAAAAA:asOp9INq17MkqpO-1JSu27NukSXVNN8sL-3l8wxo9VUUUbJkzWL1c-QjaCjepz_8YtDhi9khTg#bib0085
[108]	Dischert, W, (2020), MICROORGANISMS WITH IMPROVED 1,3-PROPANEDIOL AND BUTYRIC ACID PRODUCTION, (WO/2020/030775)	https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2020030775
[109]	Businesswire - "AFYREN annonce la mise en service industrielle de son usine AFYREN NEOXY et publie ses résultats financiers annuels 2021", 03/2022	https://www.businesswire.com/news/home/20220324005505/fr/
[110]	Les Echos Investir - "Afyren lève 66,5 mlns d'euros lors de son introduction sur Euronext Growth", 09/2021	https://investir.lesechos.fr/marches/actualites/echo-ipo-afyren-leve-66-5-mlns-d-euros-lors-de-son-introduction-sur-uronext-growth-1981984.php
[111]	Afyren - "AFYREN conclut un accord sans précédent avec Südzucker pour la fourniture de matières premières pour son usine", 03/2021	https://afyren.com/sudzucker-accord-usine/
[112]	Afyren rapport - "Green chemistry on an industrial scale: AFYREN starts construction of its first factory", 12/2020	https://afyren.com/wp-content/uploads/2020/12/PR-AFYREN-NEOXY-EN-final.pdf
[113]	Metabolic Explorer - "Project for the construction of a PDO/BA production plant on the Carling Saint-Avoid platform (Moselle)", 07/2017	http://www.metabolic-explorer.com/2017/07/03/project-for-the-construction-of-a-pdoba-production-plant-on-the-carling-saint-avoid-platform-moselle/

[114]	Metabolic Explorer - annonce de presse - "Metabolic EXplorer, à travers sa filiale METEX NØØVISTA, annonce un accord avec ALINOVA (société affiliée au groupe AXERREAL, première coopérative céréalière française), pour la commercialisation du premier Acide Butyrique d'origine naturelle sur le marché français de la nutrition animale.", 03/2020	https://www.metabolic-explorer.fr/wp-content/uploads/2020/03/CP-METabolic-EXplorer-Accord-commercial-AB-Alinova-METEX-NOOVISTA-02.03.2020.pdf
[115]	Markets and markets - "Propionic Acid Market & Derivatives by Applications (Animal Feed & Grain Preservatives, Food Preservatives, Herbicides, Cellulose Acetate Propionate) & Geography – Global Trends & Forecasts To 2018"	https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/propionic-acid-derivatives-market-1079.html#:~:text=Propionic%20acid%20%26%20derivatives%20are%20widely,%2C%20esters%2C%20fragrances%2C%20etc.
[116]	INCI Beauty - Cellulose acetate propionate	https://incibeauty.com/ingredients/15936-cellulose-acetate-propionate
[117]	EASTMAN - Propionic acid	https://www.eastman.com/Pages/ProductHome.aspx?product=71001212
[118]	Campbell B, (2009), Propionic acid as an herbicide, (WO 2009/055632 A2)	https://patentimages.storage.googleapis.com/75/7d/52/9740f27af9118d/WO2009055632A2.pdf
[119]	Jiang et al., (2018) Butyric acid: Applications and recent advances in its bioproduction, Biotechnology advances, https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.09.005	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975018301629#:~:text=2.-,Applications%20of%20butyric%20acid,1.
[120]	Allied Market Research - Valeric Acid Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2029	https://www.alliedmarketresearch.com/valeric-acid-market-A06794
[121]	Godberg et Rokem (2009), Organic and fatty acid production, microbial; Encyclopedia of microbiology	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123739445001565
[122]	Expert Market Research- Global Valeric Acid Market Outlook	https://www.expertmarketresearch.com/reports/valeric-acid-market
[123]	Businesswire - "AFYREN annonce la signature de deux nouveaux contrats stratégiques pour AFYREN NEOXY à destination des marchés de la nutrition et de la santé", 12/2021	https://www.businesswire.com/news/home/20211220005800/fr
[124]	Businesswire - "AFYREN et ENNOLYS by Lesaffre annoncent la signature d'un accord pour la distribution des acides naturels d'AFYREN NEOXY sur le marché stratégique des Arômes et Parfums", 12/2021	https://fr-news-yahoo-com.cdn.ampproject.org/c/s/fr.news.yahoo.com/amphtml/afyren-ennolys-by-lesaffre-annoncent-170000100.html
[125]	Afyren - Life Cycle Assessment of AFYREN's products, 04/2021	https://afyren.com/en/life-cycle-assessment-of-afyrens-products/
[126]	NRDC - "2,4-D: The Most Dangerous Pesticide You've Never Heard Of", 03/2016	https://www.nrdc.org/stories/24-d-most-dangerous-pesticide-youve-never-heard
[127]	Bio Based Press - "Opportunities for biobased butadiene"	https://www.biobasedpress.eu/2014/07/opportunities-biobased-butadiene/
[128]	ETB Catalytic Technologies - "BIO-BUTADIENE: Enabling bio-plastic and bio-rubber for tires"	https://files.sk.ru/navigator/company_files/1120540/1640281126_ETB-2021nonNDA.pdf
[129]	Société chimique de France - Butadiène	https://new.societechimiquede-france.fr/produits/butadiene/
[130]	IFPEN - Panorama 2014 - "Le point sur... Pétrochimie et chimie biosourcée", 2014	https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-pt-vue/ifpen_2014_-_petrochimie_et_chimie_biosourcee.pdf

[131]	euroenergie - "Global Bioenergies annonce une percée dans la production biologique directe de butadiène", 11/2014	https://www.euro-energie.com/global-bioenergies-annonce-une-percee-dans-la-production-biologique-directe-de-butadiene-n-4696
[132]	Biofuels Digest - "LanzaTech, INVISTA find direct pathway to bio-based butadiene", 12/2015	https://www.biofuelsdigest.com/biofuelsdigest/2015/12/01/lanzatech-invista-find-direct-pathway-to-bio-based-butadiene/
[133]	L'Usine Nouvelle - "LanzaTech et SK Innovation s'attaquent au 1,3 butadiène", 10/2013	https://www.usinenouvelle.com/article/lanzatech-et-sk-innovation-s-attaquent-au-1-3-butadiene.N1181667
[134]	Sabic - "SABIC Collaborates With Kraton for Certified Renewable Butadiene to Produce Certified Renewable Styrenic Block Copolymers", 03/2022	https://www.sabic.com/en/news/32111-sabic-collaborates-with-kraton-for-certified-renewable-butadiene
[135]	Sustainable plastics - "Synthos to build 40ktpa bio-butadiene plant" 02/2022	https://www.sustainableplastics.com/news/synthos-build-40ktpa-bio-butadiene-plant
[136]	Bioplastics News - "Biomass to Bio-Butadiene: New Low-Cost Sustainable Sources to Produce Butadiene.", 05/2017	https://bioplasticsnews.com/2017/05/02/biomass-bio-butadiene/
[137]	Trinseo - About	https://www.trinseo.com/About/Who-is-Trinseo
[138]	BusinessWire - "Trinseo and ETB to Collaborate on Development of Bio-Based 1,3 Butadiene", 04/2021	https://www.businesswire.com/news/home/20210429005188/en/Trinseo-and-ETB-to-Collaborate-on-Development-of-Bio-Based-13-Butadiene
[139]	ETB Catalytic Technologies	http://www.etbcatalytic.com/en/
[140]	Michelin - Cap sur le biosourcé!, 09/2019	https://www.michelin.com/news/cap-sur-le-bio-source/
[141]	L'Usine Nouvelle - "Michelin et Tereos collaborent", 12/2013	https://www.usinenouvelle.com/article/michelin-et-tereos-collaborent.N1291662
[142]	Fischer, B, (2018), Butadiene production method comprising improved separation steps, (WO 2018/114694 A1)	pdf archivé
[143]	L'Elementarium - "Caoutchoucs, élastomères et résines styréniques"	https://lelementarium.fr/product/caoutchoucs-elastomeres-resines-styreniques/
[144]	TWB - Flash News N°40-2019 La lettre de veille des biotech, page 4	https://www.toulouse-white-biotechnology.com/wordpress/wp-content/uploads/2020/06/FlashNews-TWB-40.pdf
[145]	REPSOL - "Butadiene, a colourless gas"	https://www.repsol.com/en/products-and-services/chemicals/product-range/butadiene/index.cshtml
[146]	REPSOL - Product catalogue - Butadiene	https://chemicalsonline.repsol.com/s/catalogue?language=en_US&ct=a3u0X000000AvuFQAS&ga=2.120177547.2007007738.1651679975-188963008.1651679975&gl=1*f9vm1l*ga*MTg4OTYzMDA4LjE2NTE2Nzk5NzU.*ga_SHK91P7TCD*MTY1MTY3OTk3My4xLjEuMTY1MTY3OTk4OC4w
[147]	Mordor Intelligence - "Butadiene Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027) "	https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/butadiene-market
[148]	TRP Polymer Solution - "How is styrene used? Common styrene uses explained"	https://trp.co.uk/how-is-styrene-used-common-styrene-uses-explained/

[149]	Mordor Intelligence - "Styrene Butadiene Rubber (SBR) Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2022 - 2027) "	https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/styrene-butadiene-rubber-sbr-market
[150]	Décision atelier Aftermarket - "Comment a évolué le marché du pneumatique ces dix dernières années", O2/2021	https://www.auto-infos.fr/article/comment-a-evolue-le-marche-du-pneumatique-ces-dix-dernieres-annees.173034
[151]	Syndicat des professionnels du pneu - Le marché 2021 - "Les pneus TC4 (tourisme, camionnette, 4X4)"	https://www.syndicatdupneu.org/marche-pneumatique-france-2021/
[152]	Le Monde - "Comment Michelin veut protéger son marché du pneu", 11/2021	https://www.lemonde.fr/economie/article/2021/11/26/comment-michelin-veut-protoger-son-marche-du-pneu_6103780_3234.html
[153]	DMC Bio - "DMC Announces First Close of Series B Financing, Raising \$34 million", 12/2021	https://dmcbio.com/news
[154]	Flottes automobiles - "Des matériaux biosourcés et recyclés dans un pneu de compétition", 06/2021	https://www.flotauto.com/michelin-pneumatique-durable-competition-20210615.html
[155]	Carbios - "Carbios et Michelin franchissent une étape vers le pneu 100 % durable", 04/2021	https://www.carbios.com/fr/carbios-et-michelin-pneu-100-durable/
[156]	Michelin - "Pneumatiques 100% durables", 02/2021	https://www.michelin.com/news/pneumatiques-100-durables/
[157]	Sofiproteol - Jean-François Rous - Conférence Montpellier "La chimie, ça se cultive - l'exemple des oléagineux", 2011	https://www.yumpu.com/en/document/read/28508652/sofiproteol-montpellier-supagro
[158]	Terres Univia - GT Chimie du végétal, 05/2010	pdf archivé
[159]	Terres Univia - Chiffres clés, 2020	
[160]	Pagès-Xatart-Parès Xavier, Responsable du département technologie et environnement, ITERG, "Technologies des corps gras (huiles et graisses végétales)", Techniques de l'ingénieur, 2008	pdf archivé
[161]	Vandeputte, 2012 "Le glycérol « building blocks » majeur de la bioraffinerie oléagineuse", OCL, vol 19, N1 https://doi.org/10.1051/ocl.2012.0435	https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/full_html/2012/01/ocl2012191p16/ocl2012191p16.html
[162]	Ciriminna et al., 2014 "Understanding the glycerol market", European journal of lipid science and technology. https://doi.org/10.1002/ejlt.201400229	https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ejlt.201400229
[163]	Transestérification, Vegetable oil-based polymers, 2012	https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/transesterification
[164]	Scharff et al., 2013, Catalyst technology for biofuel production: Conversion of renewable lipids into biojet and biodiesel, OCL, DOI: 10.1051/ocl/2013023	https://www.researchgate.net/publication/281562169_Catalyst_technology_for_biofuel_production_Conversion_of_renewable_lipids_into_biojet_and_biodiesel/fulltext/56805e8e08ae051f9ae7ca7d/Catalyst-technology-for-biofuel-production-Conversion-of-renewable-lipids-into-biojet-and-biodiesel.pdf?origin=publication_detail
[165]	Saipol - page d'accueil site internet	https://www.saipol.com/en/
[166]	Saipol - glycérine végétale brute	https://www.saipol.com/en/our-solutions/vegetale-glycerine/
[167]	Saipol - Notre histoire	https://www.saipol.com/nous-connaître/notre-histoire/

[168]	Saipol - "Saipol, filiale du groupe Avril, accélère la mise en oeuvre de son plan stratégique", 11/2019	https://www.saipol.com/actualites/saipol-filiale-du-groupe-avril-accelere-la-mise-en-oeuvre-de-son-plan-strategique-pour-se-concentrer-sur-les-productions-dhuiles-vegetales-et-denergies-durables-issues-de-l/
[169]	Champlor - Glycérine	https://champlor.com/category/produits/glycerine/
[170]	Champlor - page d'accueil site internet	https://champlor.com/en/
[171]	La Dépêche - "Valtris Champlor : des dérivés de colza certifiés durables pour les utilisateurs de produits biosourcés", 09/2021	https://www.reussir.fr/ladepeche/valtris-champlor-des-derives-de-colza-certifies-durables-pour-les-utilisateurs-de-produits
[172]	All About Feed - "Glycerol instead of barley: Good choice?", 03/2018	https://www.allaboutfeed.net/animal-feed/feed-additives/glycerol-instead-of-barley-good-choice/
[175]	Cosmeticobs - Le glycérol (glycerin), 2009	https://cosmeticobs.com/fr/articles/ingredient-du-mois-10/le-glycerol-glycerin-302
[176]	Chemical & engineering news c&en - "Companies tiptoe back to biobased acrylic acid", 11/2021	https://cen.acs.org/business/biobased-chemicals/Companies-tiptoe-back-biobased-acrylic/99/web/2021/11
[177]	Cosmetic Ingredient Review - "Safety assessment of glycerin as used in cosmetics", 09/2014	https://www.cir-safety.org/sites/default/files/glycerin.pdf
[178]	Hexion - "Hexion Inc. Announces Pernis Site Expansion", 12/2021	https://investors.hexion.com/news-releases/news-release-details/hexion-inc-announces-pernis-site-expansion
[179]	Chemical engineering - "Thailand plant to expand capacity for bio-based epichlorohydrin", 03/2020	https://www.chemengonline.com/thailand-plant-to-expand-capacity-for-bio-based-epichlorohydrin/
[180]	Metabolic Explorer - "METEX NØØVISTA et DSM annoncent conjointement la commercialisation du TILAMAR® PDO with NØØVISTA", 07/2021	https://www.metabolic-explorer.fr/wp-content/uploads/2021/07/CP-METEX-N%C3%98%C3%98VISTA-et-DSM-commercialisation-TILAMAR-PDO-with-NOOVISTA-12.07.2021-.pdf
[181]	Premium beauty News - "DSM change la donne avec un PDO respectueux du microbiome", 09/2020	https://www.premiumbeauty-news.com/fr/dsm-change-la-donne-avec-un-pdo,17263
[182]	Cosmetics design europe - "DSM launches bio-sourced 1,3 propanediol with 'microbiome friendly' certification, 09/2020	https://www.cosmeticsdesign-europe.com/Article/2020/09/01/DSM-launches-microbiome-friendly-1.3-propanediol-PDO-developed-with-Metex
[183]	Syed Mudasir - LinkedIn - Global 1,3-Propanediol (PDO) Market 2020-2024 Growing Polyester Applications Across Various Industries to Boost Market Growth Technavio, 06/2020	https://www.linkedin.com/pulse/global-13-propanediol-pdo-market-2020-2024-growing-polyester-applications-across-various-industries-to-boost-market-growth-technavio/
[184]	Avril-Oleon - Subsidiaries and brands	https://www.groupeavril.com/en/avril-group/subsidiaries-and-brands/oleon
[185]	Oleon - Milestones	https://www.oleon.com/our-company/milestones
[186]	Protec Ingredia - "New Distribution Agreement: Oleon Health & Beauty", 06/2021	https://protecingredia.com/2021/06/02/new-distribution-agreement-oleon-health-beauty/
[187]	INCITE project - Partners	https://www.project-incite.eu/partners/oleon-nv-coordinator/
[188]	Stearinerie Dubois - "Tour d'horizon"	https://www.stearinerie-dubois.com/tour-dhorizon/
[189]	Stearinerie Dubois - "Stéarinerie Dubois 200 ans d'histoire – épisode 12: l'aventure continue...", 10/2020	https://www.stearinerie-dubois.com/2020/10/stearinerie-dubois-200-ans-dhistoire-episode-12-laventure-continue/

[190]	Stearinerie Dubois - "RAPPORT D'ACTIVITÉ ET DE PERFORMANCES SOCIALES ET ENVIRONNEMENTALES 2018"	https://www.stearinerie-dubois.com/wp-content/uploads/2019/08/StearinerieDuboisRapportRSE_2018_Fr-1.pdf
[191]	Stearinerie Dubois - Dossier d'enregistrement d'une installation classée pour la protection de l'environnement	https://www.indre.gouv.fr/content/download/23873/167236/file/STEARINERIE%20DUBOIS%20-%20DOS-SIER%20D%27ENREGISTREMENT%20-%202003-2020%20r%C3%A9v%201.pdf
[192]	Valtris - Our locations	https://www.valtris.com/locations/
[193]	Champlor - Champlor en bref	https://champlor.com/champlor/
[194]	Entretien	
[195]	Stearinerie Dubois - Cosmétique	https://www.stearinerie-dubois.com/secteurs-dactivites/cosmetique/
[196]	Stearinerie Dubois - Santé	https://www.stearinerie-dubois.com/secteurs-dactivites/sante/
[197]	Stearinerie Dubois - Alimentaire	https://www.stearinerie-dubois.com/secteurs-dactivites/alimentaire/
[198]	Stearinerie Dubois - Industrie	https://www.stearinerie-dubois.com/secteurs-dactivites/specialites-fonctionelles/
[199]	Miyahara, 2017, Fatty Acid Ester - Emollients , Cosmetic science and technology	https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/fatty-acid-ester
[201]	Ashaolu et al., 2021, Phycocyanin, a super functional ingredient from algae; properties, purification characterization, and applications, International journal of biological macromolecules, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.064	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813021024624
[202]	Mineral blue - Phycocyanin, the blue gold that has perfected over 3 billion years., 05/2021	https://mineral-blue.com/2021/05/05/phy-cocyanin-the-blue-gold-that-has-perfected-over-3-billion-years/?lang=en
[203]	Process alimentaire - "Fermentalg et DDW créent un nouveau colorant bleu", 06/2020	https://www.processalimentaire.com/ingrédients/fermentalg-et-ddw-creent-un-nouveau-colorant-bleu
[204]	Sloth et al., 2006, Accumulation of phycocyanin in heterotrophic and mixotrophic cultures of the acidophilic red alga Galdieria sulphuraria, Enzyme and microbial technology, DOI:10.1016/j.enzymitec.2005.05.010	https://www.researchgate.net/publication/222886557_Accumulation_of_phycocyanin_in_heterotrophic_and_mixotrophic_cultures_of_the_acidophilic_red_alga_Galdieria_sulphuraria
[205]	Actunews wire - "Fermentalg et son partenaire DDW franchissent un milestone dans le développement de BLUE ORIGINS®", 06/2021	https://www.actusnews.com/fr/fermentalg/cp/2021/06/24/fermentalg-et-son-partenaire-ddw-franchissent-un-milestone-dans-le-developpement-de-blue-origins-reg
[206]	Capital - "FERMENTALG s'allie au japonais DIC et annonce une augmentation de capital de 10 millions d'euros", 09/2017	https://www.capital.fr/entreprises-marches/fermentalg-sallie-au-japonais-dic-et-annonce-une-augmentation-de-capital-de-10-millions-deuros-1243486
[207]	Cagnac, O, (2019), METHOD FOR CULTIVATING UNICELLULAR RED ALGAE (URA) ON A MIXTURE OF SUBSTRATES, (WO/2019/228947)	https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2019228947
[208]	Jaouen et al., 1999, Clarification and concentration with membrane technology of a phycocyanin solution extracted from Spirulina platensis, Biotechnology techniques,	https://www.researchgate.net/profile/Pascal-Jaouen/publication/227163831_Clarification_and_concentration_with_membrane_technology_of_a_phycocyanin_solution_extracted_from_Spirulina_platensis/links/0deec51c5af71bbca2000000/Clarification-and-concentration-with-membrane-

		technology-of-a-phyco-cyanin-solution-extracted-from-Spirulina-platen-sis.pdf?origin=publication_detail
[209]	Phycocyanin Market by Form (Powder and Liquid), Grade (Food Grade, Pharma Grade, and Reagent & Analytical Grade) and Application (Food & Beverages, Pharmaceuticals, Cosmetics, Nutraceuticals, and Others): Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021–2030	https://www.alliedmarket-research.com/phyco-cyanin-market-A12344
[210]	Persistence market research - Phycocyanin Market Market Study on Phycocyanin: Consumer Inclination toward Natural & Multifunctional Ingredients Driving Market Growth	https://www.persistencemarket-research.com/market-research/phyco-cyanin-market.asp
[211]	Fermentalg - communiqué de presse, "Fermentalg et son partenaire DDW franchissent un milestone dans le développement de BLUE ORIGINS®", 05/2021	https://www.actusnews.com/fr/fermentalg/cp/2021/06/24/fermentalg-et-son-partenaire-ddw-franchissent-un-milestone-dans-le-developpement-de-blue-origins-reg
[212]	Manirafasha et Jing, 2021, Chapter - Nutraceutical and pharmaceutical applications of phycobiliproteins DOI: 10.1007/978-3-030-50971-2_23	https://www.researchgate.net/profile/Keju-Jing/publication/348617938_Nutraceutical_and_Pharmaceutical_Applications_of_Phycobiliproteins/links/60078f1792851c13fe23a43e/Nutraceutical-and-Pharmaceutical-Applications-of-Phycobiliproteins.pdf?origin=publication_detail
[213]	Metex NOOVISTAGO, "Les acides aminés, des nutriments essentiels au cœur de notre métier"	https://fr.metex-noovistago.com/nos-solutions/acides-amines
[214]	Van den Abbeele et al., 2022, The Effect of Amino Acids on Production of SCFA and bCFA by Members of the Porcine Colonic Microbiota, Microorganisms 2022, 10,76https://doi.org/10.3390/microorganisms10040762	https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9025589/pdf/microorganisms-10-00762.pdf
[215]	Metabolic Explorer, 05/2021, "Finalisation de l'acquisition d'Ajinomoto Animal Nutrition Europe (AANE) qui devient METEX NØØVISTAGO"	https://www.metabolic-explorer.fr/wp-content/uploads/2021/05/CP-METEX-Finalisation-acquisition-AANE-VF2-03.05.2021.pdf
[216]	Boursorama - forum - "Metabolic Explorer: usine amiens", 06/2021	https://www.boursorama.com/bourse/forum/1rPMETEX/detail/458287908/
[217]	Actusnews Wire - 12/2021 - "METabolic Explorer announces the second process resulting from its ALTANØØVTM platform for the production of L-Valine."	https://www.actusnews.com/fr/metabolic-explorer/cp/2021/12/01/metabolic-explorer-announces-the-second-process-resulting-from-its-altanoovtm-platform-for-the-production-of-l-valine
[218]	Metabolic Explorer, 02/2021, "Exclusive negotiations under way with Ajinomoto to acquire Europe's largest site producing amino acids by fermentation"	https://www.metabolic-explorer.com/2021/02/26/acquisition-project-of-aane-by-metex/
[219]	Pessiot J, (2019), Vinasse as a fermentation medium, (WO2019121876)	https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2019121876
[220]	Shilo I, Ajinomoto, (1972), Method of producing L-lysine by fermentation	https://patentimages.storage.googleapis.com/60/7f/57/e9443ab9ea67e5/US3707441.pdf

[221]	Tosaka et al., 1983, The production of L-lysine by fermentation, Trends in biotechnology, https://doi.org/10.1016/0167-7799(83)90055-0	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0167779983900550#:~:text=Two%20major%20biotechnological%20processes%20are,of%20Brevibacteria%20and%20Corynebacterium%20glutamicum.
[222]	Jatuponpipat et Kiatkittisorn, 2006, The Effect of Molasses for Lysine Production by <i>Arthrobacterium citreus</i> NRRL 1258 and <i>Corynebacterium glutamicum</i> ATCC 21475, Current applied science and technology, 2006	https://li01.tci-thaijo.org/index.php/cast/article/view/150075/110078
[223]	Song SW, (2007), Fermentation process for preparing L-lysine, WO2007067005A1	https://patents.google.com/patent/WO2007067005A1/en
[224]	Fernanda Karine do Carmo Félix et al,(2019) L-lysine production improvement: a review of the state of the art and patent landscape focusing on strain development and fermentation technologies, Critical Reviews in Biotechnology, 39:8, 1031-1055, DOI: 10.1080/07388551.2019.1663149	https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/07388551.2019.1663149?scroll=top&nedAccess=true
[225]	J. L. Troccon et C. Demarquilly, « La vinasse de mélasse de betteraves pour les ruminants », p. 5.	https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiEv-Kqg19T4AhUKXxoKHfQrC88QFnoE-CAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fhal.archives-ouvertes.fr%2Fhal-00895871%2Fdocument&usq=AOvVaw3MJM1YFWdNsCPrz-wkwLvC2
[226]	Annexe II du règlement (CE) n°1333/2008	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32022R0063#:~:text=(1) L%27annexe II,les conditions de leur utilisation.
[227]	Règlement (CE) n°432/2012	EUR-Lex - 32012R0432 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
[228]	Re-evaluation of glutamic acid (E 620), sodium glutamate(E 621), potassium glutamate (E 622), calcium glutamate(E 623), ammonium glutamate (E 624) and magnesiumglutamate (E 625) as food additives	https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4910
[229]	Définition glutamates	https://www.synpa.org/definition-glutamates-les-additifs-alimentaires-34.php
[230]	Règlement (CE) n°1334/2008	EUR-Lex - 32008R1334 - EN - EUR-Lex (europa.eu)
[231]	Re-evaluation of glycerol (E 422) as a food additive	https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2017.4720
[232]	US Department of Energy, 2004, Top Value Added Chemicals from Biomass- Vol 1 Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas	https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf
[233]	Conseil national de l'industrie, 2018, Stratégie nationale bio-production en France	https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cqe/bio-production.pdf
[234]	Kampers et al., 2021, From innovation to application: bridging the valley of death in industrial biotechnology, Trends Biotechnol.	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34024649/
[235]	Carbon Tracker, 2014, Unburnable carbon - are the world's financial markets carrying a carbon bubble?	https://carbontracker.org/wp-content/uploads/2014/09/Unburnable-Carbon-Full-rev2-1.pdf

[236]	ACS, 12 principles of Green Chemistry	https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html
[237]	IFPEN, Bio-based chemistry	https://www.ifpenergiesnouvelles.com/issues-and-foresight/decoding-keys/renewable-energies/bio-based-chemistry
[238]	Chowdhury et al., 2018, Indian agro-wastes for 2G biorefineries: strategic decision on conversion processes, Green Energy and Technology	https://www.researchgate.net/publication/322009434_Indian_Agro-wastes_for_2G_Biorefineries_Strategic_Decision_on_Conversion_Processes/link/5a6397d8aca272a1581bef28/download
[239]	Willemse Van der Zee, NEN/Wageningen, Communicating the bio-based content of products in the EU and the US,	https://www.nen.nl/media/PDF/N374_White_paper_communicating_biobased_content.pdf
[240]	Pôle IAR, Etude RECORD, 2021	
[241]	REDcert 2, 2018, Scheme principles for the use of biomass-balanced products in the chemical industry	https://www.redcert.org/images/SP_RC%C2%B2_Biomass-balanced_products_V1.0.pdf
[242]	Renewable Carbon, 2021, Bio-based naphtha and mass balance approach - status & outlook, standards & certification schemes	https://renewable-carbon.eu/news/bio-based-naphtha-and-mass-balance-approach-status-outlook-standards-certification-schemes/
[243]	NNFCC, Increasing renewable content with the mass balance approach	https://www.nnfcc.co.uk/files/mydocs/Mass%20Balance.pdf
[244]	Béfort, 2016, Pour une mésoéconomie de l'émergence de la bioéconomie : représentations, patrimoines productifs collectifs et stratégies d'acteurs dans la régulation d'une chimie doublement verte.	https://journals.openedition.org/regulation/12121
[246]	Meng et Ellis, 2020, The second decade of synthetic biology : 2010-2020, Nature communications	https://www.nature.com/articles/s41467-020-19092-2
[247]	Dusselier et al., 2014, Top Chemical Opportunities from Carbohydrate Biomass: A Chemist's View of the Biorefinery	https://www.researchgate.net/publication/262537044_Top_Chemical_Opportunities_from_Carbohydrate_Biomass_A_Chemist's_View_of_the_Biorefinery/link/00b495382f02e664cc000000/download
[248]	Luc Wolff, 2022, Colloque Maison de la Chimie, Sources de carbone pour les grands intermédiaires de la chimie organique - nouvelles approches, conférence d'Axens	https://actions.maisondelachimie.com/colloque/sources-de-carbone/
[249]	EU Commission, 2015, From the sugar platform to biofuels and biochemicals	https://biobasedeconomy.nl/wp-content/uploads/2015/10/EC-Sugar-Platform-final-report.pdf
[250]	François Jérôme, 2022, Colloque Maison de la Chimie, Sources de carbone pour les grands intermédiaires de la chimie organique - nouvelles approches, La biomasse: source de matière première pour l'industrie chimique	https://actions.maisondelachimie.com/wp-content/uploads/sites/2/2022/07/04-Pr%C3%A9sentation-JEROME-Francois.pdf
[251]	Shanks et Keeling, 2017, Bioprivileged molecules: creating value from biomass, Green Chemistry	https://www.researchgate.net/publication/314304003_Bioprivileged_Molecules_Creating_Value_from_Biomass
[252]	Top value added chemicals : the biobased economy 12 years later, ACS	https://communities.acs.org/t5/GCI-Nexus-Blog/Top-Value-Added-Chemicals-The-Biobased-Economy-12-Years-Later/bap/15759

[253]	Huang et al., 2021 Greenhouse Gas Emission Mitigation Potential of Chemicals Produced from Biomass, ACS Sustainable Chem Eng	https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acssu.schemeng.1c04836
[254]	Labrou, 2014, Protein purification: an overview	https://www.researchgate.net/publication/260950930_Protein_Purification_An_Overview/link/53d8d5b40cf2631430c3630c/download
[255]	Straathof, 2011, The Proportion of Downstream Costs in Fermentative Production Processes, Comprehensive biotechnology, chapter	https://www.researchgate.net/publication/273631680_The_Proportion_of_Downstream_Costs_in_Fermentative_Production_Processes#:~:text=It%20is%20mentioned%20by%20several,%2D40%25%20%5B20%5D%20
[256]	Zakeri et Carr, 2014, The limits of synthetic biology	https://www.cell.com/trends/biotechnology/fulltext/S0167-7799(14)00215-7
[257]	Ball, 2012, Bacteria replicate close to the physical limit of efficiency	https://www.nature.com/articles/nature.2012.11446
[258]	Abdelmoez et Mustafa, 2014, Oleochemical industry future through biotechnology	https://www.researchgate.net/publication/262778200_Oleochemical_Industry_Future_through_Biotechnology/link/00b4953cdc5a590fa0000000/download
[259]	Pôle Interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques (PIPAME), 2010, Mutations économiques dans le domaine de la chimie	https://www.entrepises.gouv.fr/files/files/en-pratique/etudes-et-statistiques/dossiers-de-la-DGE/chimie_abrege.pdf
[260]	Incite project, website	https://www.project-incite.eu/project/
[261]	LIPES Project, website	https://lipes.eu/home/#c35
[262]	Rous et Groupe Avril, 2016, De l'oléochimie à la bioraffinerie : continuité de développement pour le secteur des corps gras ?	https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/full_html/2016/05/ocl160024-s/ocl160024-s.html
[263]	Unilever and Geno launch \$120m venture to scale alternative ingredients, Unilever, 16/06/2022	https://www.unilever.com/news/press-and-media/press-releases/2022/unilever-and-geno-launch-120m-venture-to-scale-alternative-ingredients/
[264]	Dusser, 2013, Biodiesel : la réglementation européenne et le débat sur son évolution	https://www.ocl-journal.org/articles/ocl/pdf/2013/05/ocl130005.pdf
[265]	2019, DSM, Roquette to dissolve biosuccinic acid JV, Sustainable plastics	https://www.sustainableplastics.com/article/20190222/PNE/190229965/dsm-roquette-to-dissolve-bio-succinic-acid-jv
[266]	Pôle IAR, 2015, Panorama international des intermédiaires chimiques biosourcés	
[267]	Pôle IAR, 2018, What will be the most promising biobased molecules tomorrow ?, Sofinnova, Strategic committee	
[268]	Nova institute, 2020, Renewable carbon - key to a sustainable and future-oriented chemical and plastic industry	https://renewable-carbon-initiative.com/wp-content/uploads/2020/09/20-09-21_Paper_12-on-Renewable-Carbon.pdf
[269]	KTN, 2016, From shale gas to biomass: the future of chemical feedstocks	https://compositesuk.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/Shale-Gas-to-Biomass-2016-Future-of-chemical-feedstocks.pdf
[270]	Le Monde, 27/10/2022, "L'Union européenne acte la fin des moteurs thermiques en 2035"	https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/10/27/l-union-europeenne-trouve-un-accord-sur-la-fin-des-moteurs-thermiques-en-2035_6147631_3234.html

[271]	Laurent Massacrier, 2022, "Cristal Union investit dans l'isobutène et les bioplastiques", LinkedIn	https://www.linkedin.com/pulse/cristal-union-investit-dans-lisobut%C3%A8ne-et-les-laurent-massacrier/?trk=pulse-article_more-articles_related-content-card&originalSubdomain=fr
[272]	Les Echos, 2022, "Ukraine, inflation, pénuries... : les fronts se multiplient dans les usines"	https://www.lesechos.fr/industrie-services/industrie-lourde/ukraine-inflation-penuries-les-fronts-se-multiplient-dans-les-usines-1396951
[273]	Jubilant Ingrevia, 28/04/2022, "Jubilant Ingrevia Limited Commissions new green ethanol based acetic acid plant"	https://www.jubilantingrevia.com/announcements/press-releases
[274]	Synthos - Butadiene extraction unit	https://www.synthosgroup.com/en/synthos-butadiene-extraction-unit/
[275]	Powder & Bulk Solids, 2021, "Cargill JV to erect \$300M 1,4-butanediol plant"	https://www.powderbulksolids.com/chemical/cargill-jv-erect-300m-14-butanediol-plant
[276]	ASI Adhesives & Sealants, 11/2022, "Arkema announces new range of mass-balance-certified acrylic materials"	https://www.adhesivesmag.com/articles/99828-arkema-announces-new-range-of-mass-balance-certified-acrylic-materials
[277]	McKinsey & Company, 30/06/2022, "From crude oil to chemicals: how refineries can adapt to shifting demand"	https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/from-crude-oil-to-chemicals-how-refineries-can-adapt-to-shifting-demand
[278]	L'Usine Nouvelle, 01/03/2016, "Des produits chimiques issus de la biomasse"	https://www.usinenouvelle.com/article/des-produits-chimiques-issus-de-la-bio-masse.N1838367
[279]	Christhel Andrade Díaz, Hugues Clivot, Ariane Albers, Ezequiel Zamora-Ledezma, Lorie Hamelin. The crop residue conundrum: Maintaining long-term soil organic carbon stocks while reinforcing the bioeconomy, compatible endeavors? Applied Energy, Volume 329, 2023, 120192, ISSN 0306-2619, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120192 .	The crop residue conundrum: Maintaining long-term soil organic carbon stocks while reinforcing the bioeconomy, compatible endeavors? - ScienceDirect
[280]	Règlement (UE) n°2019/1294	https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1294&from=FR
[281]	Règlement (UE) n°231/2012	EUR-Lex - 02012R0231-20140414 - EN - EUR-Lex (europa.eu)



FranceAgriMer



LES ÉTUDES



Cartographie des flux de biomasse dans les filières de production de molécules biosourcés - Rapport final
édition octobre 2023

Directrice de la publication : Christine Avelin
Rédaction : direction Marchés, études et prospective
Conception et réalisation : service Communication / Impression : service Arborial

12 rue Henri Rol-Tanguy - TSA 20002 / 93555 MONTREUIL Cedex
Tél. : 01 73 30 30 00 ■ www.franceagrimer.fr

 FranceAgriMer
 @FranceAgriMerFR
 FranceAgriMer FR