Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

Volume 9 (2020)

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT

Notes Académiques de l'Académie d'Agriculture de France

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tél. : +33 (0)1 47 05 10 37 Fax : +33 (0)1 45 55 09 78

https://www.academie-agriculture.fr

Soumission électronique : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Rédaction : Académie d'agriculture de France – 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Objet de la revue : Les *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France* sont un journal semestriel d'information et de formation scientifiques, sous la direction du Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France.

La revue - avec ses éditoriaux, articles originaux, articles d'actualité, notes de conjoncture, publication de fond, revues de la littérature, synthèses, rapports, commentaires critiques d'ouvrage, opinions, textes de conférences, lettres à la rédaction, etc.- donne une information actualisée ayant trait à tous les domaines couverts par les dix sections de l'Académie d'agriculture de France.

Soumissions électroniques : notes-academiques@academie-agriculture.fr

Directeur de la publication : le Secrétaire perpétuel de l'Académie d'agriculture de France

Secrétaires éditoriaux : Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Comité éditorial : Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Hérault, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Informations à l'attention des auteurs : Pour toute question relatives à la soumission des articles , les auteurs peuvent consulter les conseils aux auteurs disponibles à :

https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),

DOI : https://doi.org/10.58630/ pubac.not.17611

Academic Notes of the French Academy of Agriculture

18, rue de Bellechasse 75007 Paris, France

Tel: +33 (0) 1 47 05 10 37 Fax: +33 (0) 1 45 55 09 78

https://www.academie-agriculture.fr

Electronic submission: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Publication: French Academy of Agriculture - 18, rue de Bellechasse, 75007 Paris, France

Purpose of the review: The *Academic Notes of the French Academy of Agriculture* is a journal of information and scientific training, under the direction of the Permanent Secretary of the Academy of Agriculture of France.

The journal - with its editorials, original articles, news articles, business reports, background publications, literature reviews, summaries, reports, critical reviews, opinions, conference texts, letters to the editor, etc. .- gives an updated information relating to all the fields covered by the ten sections of the French Academy of Agriculture.

Electronic Submissions: notes-academiques@academie-agriculture.fr

Director of the publication: Perpetual Secretary of the French Academy of Agriculture

Associate Editors: Yves Brunet, Noëlle Dorion, Hervé This, Nadine Vivier

Editorial Committee: Claude Allo (Secrétaire de section), Bernard Ambolet (Secrétaire de section), Catherine Aubertin (Secrétaire de section), Guilhem Bourrié (Secrétaire de section), Yves Brunet, Noëlle Dorion, Michel Dron (Secrétaire de section), Christian Ferault, André-Jean Guérin (Secrétaire de section), Malcolm Hadley, Bruno Hérault, Philippe Kim-Bonbled, Gilles Lemaire, Nicole Mathieu, Marie-Claude Maurel, Jean-Claude Mounolou, Alain Pavé, Jean-Marie Pierre-Guy, Agnès Ricroch (Secrétaire de section), Bernard Roman-Amat (Secrétaire de section), Jean-Marie Séronie (Secrétaire de section), Hervé This, Sophie Villers (Secrétaire de section), Nadine Vivier.

Information for authors: For any questions regarding the submission of manuscripts, authors may consult the advice to authors available at:

https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/les-notes-academiques-de-lacademie-dagriculture-de-france-n3af-sont

ISSN 2966-702X (printed)/ eISSN 2967-2139 (electronic),

DOI : https://doi.org/10.58630/ pubac.not.17611

Notes académiques de l'Académie d'Agriculture de France

Académie d'agriculture de France

Volume 9, 2020

https://doi.org/10.58630/pubac.not.v38162

- **Philippe Stoop**. 2020. Santé et alimentation : attention aux faux-semblants statistiques / Health and food : beware the statistical biases, 9(1°, 1-20, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a655672

- **Hervé This**. 2020. L'analyse critique des manuscrits et les conseils d'amélioration donnés aux auteurs. A propos des publications : Klebel et al., 2020, Stern and O'Shea, 2019; Sarabipour et al., 2019; Inrae, 2016 / Critical analysis of manuscripts and advices given to authors for improving their texts, 9(2), 1-14, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a582827

- **Paul Colonna, Jean-Luc Duplan, Jack Legrand, Elisabeth Lenet, Guillaume Boissonnet, Daphné Lorne.** 2020. Biofuels in the nexus energy-environment-food, 9(3), 1-48, https://doi.org/10.58630/pubac.not.a103449

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)
Note de recherche

Santé et alimentation : attention aux faux-semblants statistiques !
Health and food: beware of statistical fallacies!

Philippe Stoop [1]

[1] *ITK, Cap Alpha, avenue de l'Europe, 34830 Clapiers, France.*

Correspondance :
philippe.stoop@itk.fr

Résumé
Ces derniers mois, plusieurs études épidémiologiques très médiatisées déclarent avoir observé des liens statistiques forts entre le risque de cancer et la consommation d'aliments bio ou ultra-transformés. Toutefois ces résultats reposent sur des traitements statistiques complexes, dont un examen attentif montre la fragilité : prise individuellement, chacune de ces publications semble minimiser fortement l'effet des facteurs de risque de cancer bien établis. En outre, quand on les compare entre elles, on constate qu'elles se contredisent mutuellement, alors qu'elles ont été réalisées sur la même population. Bien que parus dans des revues prestigieuses, ces travaux confortent donc les inquiétudes d'épidémiologistes éminents, qui appellent à refonder les méthodes employées en épidémiologie nutritionnelle.

Mots clés
nutrition, cancer, aliments biologiques, aliments ultra-transformés, statistiques

Abstract
Several recent highly publicized epidemiological studies report having observed strong statistical correlations between cancer incidence and the consumption of organic or ultra-processed foods. However, these results rely on complex statistical treatments, whose validity is questionable: each individual publication seems to underestimate the effect of well-established cancer risk factors. Moreover, when we compare them, we find that they contradict each other, although they were made on the same population. Although published in prestigious journals, these studies reinforce the concerns of eminent epidemiologists, who call for a re-founding of the methods used in nutritional epidemiology.

Keywords
nutrition, cancer, organic food, ultraprocessed food, statistics

Introduction

Les rapports entre santé et alimentation sont un sujet qui passionne les Français. A juste titre, car des études épidémiologiques solides ont montré que le régime alimentaire a une influence forte

sur la santé et la mortalité. Ce sont elles qui ont permis de formuler les recommandations désormais bien connues du Programme national nutrition santé : manger au moins cinq fruits et légumes par jour, limiter sa consommation de viande et de lipides, en particulier saturés, préférer l'eau aux boissons sucrées… (INPES, 2012).

Ces recommandations, qui portent sur la composition du régime alimentaire, et non sur le mode de production des aliments, font l'objet d'un consensus scientifique fondé sur des résultats robustes, observés dans de nombreuses enquêtes épidémiologiques indépendantes et souvent confirmés par des expérimentations *in vivo* sur des animaux de laboratoire ou chez le sujet humain. C'est le cas, par exemple, de l'effet cancérogène de la viande rouge et de la viande transformée, classées respectivement cancérogène probable et cancérogène par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) (CIRC, 2015).

Toutefois les consommateurs s'interrogent aussi sur les risques potentiels d'autres facteurs, aux effets beaucoup plus hypothétiques pour l'instant : c'est le cas des résidus de pesticides et, depuis peu, des aliments que certains disent « ultra-transformés ». Ces deux thèmes d'inquiétude ont récemment connu un regain d'intérêt médiatique, suite à trois publications scientifiques, toutes fondées sur le suivi d'une cohorte française (c'est-à-dire une population suivie sur une longue période) nommée *NutriNet Santé* :

- sur l'alimentation bio, un article paru fin novembre 2018, largement relayé dans la presse, a déclaré avoir identifié un lien statistique entre la consommation de nourriture bio et une diminution du risque de cancer (Baudry *et al.*, 2018) ;
- sur les aliments ultra-transformés, un premier article, publié en février 2018, avait signalé une liaison statistiquement significative entre une forte consommation de ces aliments et un risque accru de cancer (Fiolet *et al.*, 2018) ;
- toujours à ce propos, une deuxième publication de février 2019, toujours par la même équipe et sur la même cohorte, fait également état d'une augmentation de la mortalité qui serait significative chez les forts consommateurs de ces produits (Schnabel *et al.*, 2019).

En ce qui concerne la première publication sur l'alimentation bio, l'*Académie d'agriculture de France* a déjà publié un « Point de vue d'académiciens », qui explique de façon détaillée pourquoi, contrairement à ce qu'évoquent les auteurs, cette étude ne permet en réalité pas d'affirmer que les aliments bio protègent contre le cancer (Gueguen et Pascal, 2018). Nous ne reviendrons pas ici sur les problèmes méthodologiques concernant la cohorte *NutriNet Santé* (en particulier, sa mauvaise représentativité de la population française). De même, le manque de fondement scientifique du concept d'aliments ultra-transformés, et de la classification NOVA qui est censée les catégoriser, sont traités dans un autre "Point de vue d'académiciens" (Braesco *et al.*, 2019). Nous nous concentrerons ici sur une question commune aux deux thèmes : l'examen des méthodes statistiques employées dans ces publications.

En effet, toutes ces études ont en commun de reposer sur des traitements statistiques complexes, en vue d'isoler l'effet sanitaire éventuel des aliments étudiés. Or la comparaison avec les publications sur les aliments ultra-transformés renforce encore les réserves que l'on pouvait éprouver sur la publication concernant les aliments bio. Tous ces travaux ont été réalisés par la même équipe, sur la même cohorte de consommateurs, et avec la même méthode statistique. La comparaison de leurs analyses statistiques respectives montre bien les limites de cette méthode, que l'on ne pouvait que soupçonner à la lecture de chaque publication isolée.

Un thème difficile sur le plan statistique

Il est vrai que ces questions sont difficiles à traiter sur le plan statistique. En effet, toutes les études sur le lien entre alimentation et santé montrent des corrélations très fortes entre tous les comportements alimentaires identifiés

comme favorables à la santé. Ainsi les amateurs d'aliments bio sont, de façon générale, plus soucieux de leur hygiène de vie que la moyenne de la population : ils fument moins et consomment moins d'alcool, consomment plus de fruits et légumes, moins de viande, de graisses et de glucides rapides que la population générale. On le voit d'ailleurs bien dans la Figure supplémentaire 1, tirée de Baudry *et al.* (2018).

Si l'on observe chez eux un meilleur état de santé, il est donc difficile de savoir s'il y a un effet bénéfique propre à l'alimentation bio, ou si c'est simplement la résultante de leur meilleure hygiène de vie. Pour affirmer que les aliments bio ont un effet favorable sur le cancer, les auteurs ont donc procédé à des ajustements statistiques, en vue d'éliminer l'effet de tous les autres facteurs favorables associés à une forte consommation d'aliments bio (ce que l'on nomme des facteurs de confusion).

De même, l'étude des effets éventuels des aliments parfois dits « ultra-transformés » pose des problèmes méthodologiques complexes. Ce terme désigne les aliments généralement d'origine industrielle, intégrant des ingrédients ayant subi de fortes transformations physiques ou chimiques lors de leur fabrication. C'est le cas, par exemple, des plats préparés vendus prêts à l'emploi. Comme ces produits sont en général riches en sel, graisses et sucres, et pauvres en fibres, il n'y aurait rien d'étonnant à leur trouver un effet néfaste sur la santé. Toutefois certains nutritionnistes ou épidémiologistes vont plus loin : ils font l'hypothèse que la texture de ces aliments, très modifiée physiquement par rapport aux aliments traditionnels, aggraverait les effets directs de leur composants nutritionnels, et que les additifs contenus dans ces aliments pourraient aussi avoir des effets néfastes (Prud'homme, 2018). Là encore, il ne suffit donc pas d'observer que les consommateurs d'aliments transformés ont une mauvaise santé : il faut corriger cet effet apparent des aliments ultra-transformés, en éliminant les effets liés simplement à leur composition non conforme aux règles diététiques les plus basiques.

Bien entendu, dans les deux cas, les auteurs de ces études sont parfaitement conscients de ce problème, et ils déclarent avoir « ajusté leurs résultats », c'est-à-dire éliminé l'effet des facteurs de confusion. Toute la crédibilité scientifique de leurs travaux repose donc sur la qualité de ces ajustements statistiques (dans ce qui suit, nous emploierons les termes « ajusté » et « ajustement » comme traduction littérale des termes *adjusted* et *adjustment* des publications originales en anglais, les traductions françaises possibles, corriger ou redresser, n'étant pas parfaitement synonymes).

Toutefois une lecture attentive de chaque article suscite déjà des interrogations à ce sujet. Ces interrogations deviennent des doutes majeurs quand on compare la cohérence de l'ensemble de ces publications. De surcroît, deux autres publications de la même équipe (Lavalette *et al.*, 2018 ; Diallo *et al.*, 2018), beaucoup moins médiatisées, bien qu'importantes sur le plan sanitaire, apportent un éclairage utile sur deux des articles déjà cités : d'une part en montrant que l'indicateur synthétique retenu dans ces publications pour qualifier le respect des recommandations nutritionnelles classique n'est pas optimal ; d'autre part, en soulignant le manque de représentativité de la cohorte suivie, par rapport au comportement alimentaire de la population générale.

La méthode suivie : classique, mais manifestement inadaptée à ce contexte

Rappelons d'abord le vocabulaire habituel à ce type d'études épidémiologiques : chaque fois, l'objectif est d'étudier la relation entre une variable dite « à expliquer » (par exemple, le nombre de nouveaux cas de cancers dans Baudry *et al.*) et des variables dites « explicatives » (par exemple, la consommation de tabac, l'activité physique ou la consommation d'aliments bio).

Dans tous les articles évoqués, les auteurs ont utilisé une méthode statistique classique. Ils ont commencé par créer un indicateur synthétique continu permettant de quantifier le niveau de consommation des aliments étudiés. Ils ont ensuite stratifié (c'est-à-dire segmenté) la

Table 1. Variables à expliquer, variables explicatives, et facteurs de confusion ajustés des publications citées.

Publication	**Variable à expliquer**	**Variable(s) explicative(s) étudiée(s)**	**Facteurs de confusion ajustés**
Baudry *et al.*, 2018	Incidence des cancers	Consommation d'aliments bio	Age, sexe, mois d'inclusion, statut professionnel, niveau d'études, statut marital, revenu mensuel du ménage, activité physique, consommation de tabac et d'alcool, antécédents familiaux de cancer, indice de masse corporelle, taille, ration calorique, mPNNS-GS, consommation de fibres, de viande transformée et de viande rouge (+ pour les femmes : nombre d'enfants, statut ménopausal, prise d'un traitement hormonal pour la ménopause, et contraception orale). + modéle complémentaire ajoutant consommation d'aliments ultratransformés, de fruits et légumes, et autres facteurs identifiés par une Analyse en Composantes Principales
Fiolet *et al.*, 2018	Incidence des cancers	Consommation d'aliments ultra-transformés	Age, sexe, ration calorique hors alcool, nombre de relevés de régime quotidien, consommation de tabac, niveau d'études, activité physique, taille, indice de masse corporelle, consommation d'alcool, antécédents familiaux de cancer (+ consommation de lipides, de sodium et glucides et/ou Western Dietary Pattern dans des modèles complémentaires, et statut ménopausique, traitements hormonaux contre la ménopause, contraception orale, et nombre d'enfants pour les femmes)
Lavalette *et al.*, 2018	Incidence des cancers	4 indicateurs nutritionnels	Age, sexe, niveau d'études, consommation de tabac, nombre de relevés de régime quotidien, antécédents familiaux de cancer (+ pour les femmes : nombre d'enfants, statut ménopausique, traitement hormonal pour la ménopause, et contraception orale).
Diallo *et al.*, 2018	Incidence des cancers	Consommation de viande rouge et de viande transformée	Age, sexe, ration calorique hors alcool, nombre de relevés de régime quotidien, consommation de tabac, niveau d'études, activité physique, taille, indice de masse corporelle, consommation d'alccol, antécédents familiaux de cancer, consommation de lipides, de fruits et de légumes.

population étudiée en quartiles (le quartile 1 correspond aux 25 % de personnes ayant la consommation la plus faible du facteur étudié, le quartile 4 aux 25 % de ceux ayant la plus forte consommation). Ils calculent alors le *HR* (*hazard ratio,* ou rapport de risques) de chaque quartile,

c'est-à-dire le rapport entre la variable à expliquer (par exemple, le nombre de cancers survenus) dans ce quartile et dans le 1er quartile, et procèdent à une analyse statistique pour vérifier s'il y a une relation significative entre la consommation de ces aliments et l'incidence de cancers ou la mortalité.

En pratique, les *hazard ratios* ne sont jamais calculés directement à partir du nombre de cas de cancers observés dans chaque quartile. En effet, il y a le plus souvent des facteurs de confusion, dont le niveau présente des différences significatives entre quartiles, et dont l'effet doit être ajusté. Par exemple, les forts consommateurs de bio sont en moyenne plus âgés que les faibles consommateurs. Comme le risque de cancer augmente avec l'âge, il faut donc corriger son effet, afin de ne pas attribuer aux aliments bio un risque de cancer qui serait en fait dû à l'âge supérieur de leurs consommateurs. Dans tous ces calculs, la variable à expliquer est considérée comme une fonction de l'ensemble des variables explicatives, prises en compte selon le modèle dit de Cox (Timsit *et al.*, 2005). Vu le nombre élevé de variables explicatives supposées, les auteurs ont testé, dans chaque publication, plusieurs modèles de Cox différents, intégrant plus ou moins de variables explicatives, en vue de repérer les plus influentes.

On voit que, dans cette méthode, toutes les variables explicatives n'ont pas le même statut : chaque fois, on s'intéresse à une variable explicative isolée (la variable étudiée), et on considère les autres (les variables explicatives ajustées) comme des facteurs de confusion dont on va chercher à éliminer l'effet sur la variable à expliquer. Dans les quatre publications que nous avons citées, nous avons les situations indiquées dans la Table 1.

A l'issue des ajustements statistiques observés, l'effet observé est censé être propre à la variable explicative étudiée, et débarrassé de toutes les interactions avec l'effet des variables explicatives ajustées. La comparaison entre les résultats avant et après ajustements est donc un élément important pour juger de la plausibilité des résultats obtenus. Elle permet de vérifier si les ajustements ont bien un effet cohérent avec les connaissances dans l'état de l'art : si une variable ajustée est connue pour avoir un fort effet sur la variable à expliquer, et présente un niveau très différent selon les quartiles d'exposition à la variable explicative étudiée, les résultats avant et après ajustement de cette variable doivent être très différents.

Pour prendre un exemple concret, imaginons que l'on étudie les effets sanitaires d'un produit chimique, et que les données brutes montrent que les personnes exposées à ce produit ont un risque de cancer du poumon plus fort que les personnes non exposées, mais ont aussi une consommation de tabac bien supérieure : dans ce cas, le risque attribué à ce produit chimique sera nettement plus faible après ajustement de l'effet du tabac.

En pratique, les épidémiologistes ne pratiquent des ajustements statistiques que sur les facteurs de confusion clairement identifiés, et dont le niveau présente des variations statistiquement significatives entre les quartiles comparés. Si ces ajustements ne modifient pas, ou modifient peu les résultats bruts, il faut s'interroger sur la cause de ce manque d'effet :

- cela peut être dû au fait que, bien que significatives, les différences d'exposition à ce facteur de confusion sont faibles par rapport à celles qui sont observées dans la population générale. Dans ce cas, la méthode statistique employée n'est pas remise en cause, mais on doit reconnaître que la population étudiée n'est pas représentative de la population générale pour ce facteur de risque. Les résultats de l'étude ne sont alors pas généralisables à l'ensemble de la population, et peuvent mettre un accent exagéré sur un phénomène marginal propre à la cohorte étudiée.
- si les différences d'exposition à ce facteur de confusion sont importantes et que, malgré tout, l'effet de l'ajustement est négligeable, cela devrait interroger sur la pertinence statistique de cet ajustement… ou conduire à considérer que l'effet sanitaire classiquement attribué est erroné !

Qu'en est-il dans les publications sur la cohorte *NutriNet Santé* ? Cette discussion sur la validité des méthodes statistiques n'est malheureu-

Table 2. Association entre cancer (toutes localisations confondues) et consommation bio (extrait du Tableau 2 de Baudry et al.*). Exemple de lecture : dans le modèle 1, le risque de cancer des grands consommateurs de bio (Q4 pour 4ème quartile, c'est-à-dire les plus forts consommateurs de bio) n'est que de 70 % (*HR = *0,70) de celui des faibles consommateurs de bio (Q1). De plus, on observe un « effet dose » hautement significatif de l'alimentation bio (*P Value for Trend *<0,001).*

Variable	Q1	Q2	Q3	Q4	P value for trend	HR (95 % CI) for a 5-point increase	P value
Cases/non cases	360/16471	358/17286	353/16887	269/16962	NA	NA	NA
Model 1	1	0.93 (0.80-1.07)	0.90 (0.78-1.04)	0.70 (0.60-0.83)	< 0.001	0.91 (0.87-0.94)	<0.001
Model 2	1	0.94 (0.81-1.09)	0.92 (0.79-1.07)	0.75 (0.63-0.88)	0.001	0.92 (0.88-0.96)	<0.001
Model 3	1	0.94 (0.81-1.09	0.93(0.80-1.08)	0.76 (0.64-0.90)	0.003	0.93 (0.89-0.97)	< 0.001

sement pas abordée par les auteurs. Il faut donc l'examiner en recoupant les informations disponibles entre les différents articles publiés. C'est d'autant plus difficile que, dans chaque étude, les variables ajustées étaient si nombreuses que les auteurs n'ont pas pu détailler l'effet de chacune d'entre elle : ils ne donnent les résultats que de 3 ou 4 niveaux d'ajustement, chaque niveau regroupant plusieurs variables ajustées. Cela ne permet d'examiner que l'effet de ce groupe de variable ajustées, ce qui peut créer une difficulté supplémentaire : si un modèle de Cox calculé par les auteurs regroupe des variables d'ajustement ayant des effets opposés, l'ajustement modifiera peu les résultats bruts, car les effets des deux facteurs de confusion se compensent mutuellement. Pour reprendre l'exemple précédent, si les personnes exposées au produit chimique étudié fument plus que les personnes non exposées (ce qui aggrave le risque de cancer), mais sont aussi plus jeunes (ce qui réduit le risque), il est possible que l'ajustement simultané de ces deux variables n'ait que peu d'effet.

Pour examiner les résultats de ces ajustements, prenons l'exemple de l'article Baudry *et al*. sur la relation entre aliments bio et cancer. On voit dans la Table supplémentaire 1 qu'il y a une bonne vingtaine de facteurs de confusion à corriger. Les auteurs ont calculé les résultats de trois modèles statistiques, correspondant à trois niveaux successifs d'ajustements (Table 2).

Dans le modèle 1, où ne sont corrigés que les effets de l'âge et du sexe, le groupe des plus forts consommateurs de bio (le quartile 4, Q4) a un risque de cancer réduit de 30 % (*HR* = 0,7, soit 70 %). En soi, ce résultat n'a rien de surprenant, puisque ce Q4 regroupe les « bons élèves » de l'hygiène de vie, qui, en plus de consommer bio, veillent à réduire presque tous les facteurs de risque : ils fument et boivent moins que la moyenne, consomment moins de viande et plus de fibres, etc.

Dans le modèle 2, les auteurs ajustent ensuite pas moins de 16 facteurs de confusion supplémentaires pour les hommes, et même 20 pour les femmes. Dans ce modèle, ils corrigent l'effet de tous les facteurs de risque environnementaux et comportementaux identifiés comme majeurs : consommation de

tabac et d'alcool, ration calorique, consommation de fibres et de viande rouge ou transformée.
On note aussi qu'ils ont corrigé l'effet du *mPNNS-GS* (*modified Programme National Nutrition Santé – Guidelines Score*), un indicateur synthétique qui mesure la conformité du régime alimentaire aux recommandations du Programme national nutrition santé. Si les ajustements statistiques réalisés dans ce modèle fonctionnent correctement, le résultat doit donc être l'effet propre de l'alimentation bio, après élimination de l'effet de tous les facteurs de risque déjà clairement identifiés. Or on constate que l'effet protecteur résiduel attribué à l'alimentation bio reste très élevé : il passe de - 30 % à - 25 %.
Ce résultat est surprenant. En effet, à l'exception des antécédents familiaux de cancer, qui sont plus fréquents chez les forts consommateurs de bio, tous les facteurs ajustés ajoutés dans ce second modèle jouent dans le sens d'une réduction des risques chez les forts consommateurs de bio. Si la rafale d'ajustements ajoutés dans le modèle 2 modifie si peu les résultats, ce n'est donc pas parce que certains facteurs négatifs compenseraient l'effet des facteurs positifs : c'est parce que le modèle statistique ne leur trouve qu'un faible rôle dans le risque de cancer, en tout cas dans la population étudiée.
Si l'ajustement de tous ces facteurs de risque clairement identifiés ne produit que si peu d'effets, cela ne peut avoir que deux explications possibles :
- leur effet cancérigène n'apparaît pas dans la cohorte étudiée, parce que le niveau de ces facteurs de risque y est trop homogène. Dans ce cas, l'honneur statistique est sauf, mais cela signifie que la cohorte n'est absolument pas représentative de la population générale ;
- ou bien les ajustements statistiques n'ont pas fonctionné correctement.
Qu'en est-il dans le modèle 2 de Baudry *et al.* ? En ce qui concerne le tabac et l'alcool, il est vrai que leur consommation varie en fait assez peu entre le 1er et le 4ème quartile de consommation de bio (Table supplémentaire 2) : on peut donc bien admettre que leur ajustement modifie peu les résultats. Cependant, c'est plus surprenant pour les viandes rouges et transformées, dont la consommation est beaucoup plus fortement corrélée à l'alimentation bio : - 35 % et – 36 % respectivement chez les plus forts consommateurs de bio, par rapport aux faibles consommateurs. Est-il normal que la consommation de viande rouge et de viande transformée ait si peu influé sur les résultats des ajustements ? Les auteurs n'abordant pas cette question dans la discussion des résultats, il faut que le lecteur fasse par lui-même les recoupements avec la publication Diallo *et al.* (2018) pour vérifier si les résultats de ces deux publications sont cohérents.
En ce qui concerne la viande transformée, les résultats sont logiques : Diallo *et al.* montrent que même le quintile des plus forts consommateurs de viande transformée dans *NutriNet Santé* n'a qu'une consommation moyenne de 38,6 g/jour, pour laquelle on peut considérer que l'accroissement de risque de cancer est négligeable. Il est donc normal que l'on ne trouve pas d'effet de la viande transformée dans Diallo *et al.*, et que l'ajustement par la consommation de viande transformée ne change rien aux résultats de Baudry *et al*. Mais cela confirme une fois de plus le manque de représentativité de *NutriNet Santé* par rapport aux risques nutritionnels de la population générale, puisque le facteur de risque nutritionnel le mieux avéré d'après le CIRC n'y a aucun effet.
Les résultats sur la viande rouge sont encore plus problématiques. En effet, Diallo *et al.* démontrent, avec la même méthode statistique, et toujours dans la même cohorte, qu'une forte consommation de viande rouge augmente le risque de cancer de 31 %, entre le quintile des plus forts consommateurs de viande rouge (93,9 g/jour), et le quintile des plus faibles consommateurs (3,6 g/jour). Les résultats sont encore plus spectaculaires pour le cancer du sein : + 83 % chez les grandes consommatrices de viande ! Ce dernier point devrait d'autant plus peser que le cancer du sein est le cancer le plus fréquent chez les femmes, qui sont trèsmajoritaires dans la cohorte *NutriNet Santé*. Certes, ces résultats spectaculaires de Diallo *et*

Table 3. Association entre cancer (toutes localisations confondues) et consommation d'aliments « ultra-transformés » (extrait du tableau 2 de Fiolet et al.*). Exemple de lecture : le risque de cancer des grands consommateurs d'aliments « ultra-transformés » (Quarter 4) est augmenté de 21 % dans le modèle 1 (*HR = *1,21) par rapport à celui des faibles consommateurs (Q1).*

Proportion of « ultra-processed » food intake in the diet							
	Continuous		Sex specific quarter				
			1	2	3	4	
	HR(95 % CI)	P for trend	HR	HR (95 % CI)	HR (95 % CI)	P for trend HR (95 % CI)	
All cancers							
N° of cases/non cases	2228/102752		712/25618	607/25638	541/25705	368/25877	
Model 1	1.12 (1.06-1.18)	<0.001	1	0.99 (0.89-1.11)	1.10 (0.99-1.24)	1.21 (1.06-1.38)	0.002
Model 2	1.12 (1.07-1.18)	<0.001	1	1.00 (0.90-1.11)	1.11 (0.99-1.25)	1.23 (1.08-1.40)	0.001
Model 3	1.12 (1.06-1.18)	<0.001	1	0.99 (0.89-1.11)	1.01 (0.98-1.23)	1.21 (1.06-1.38)	0.002
Model 4	1.13 (1.07-1.18)	<0.001	1	1.00 (0.90-1.11)	1.11 (0.99-1.24)	1.23 (1.08-1.40)	0.001

al. sur l'effet cancérogène de la viande rouge ne sont pas nécessairement incompatibles avec le fait que l'ajustement de la consommation de viande rouge modifie peu les résultats dans Baudry *et al*. En effet, entre le 1er et le 4ème quartile de consommation bio dans Baudry *et al.*, la consommation de viande rouge ne varie que de 48,72 g/jour (chez les plus faibles consommateurs de bio) à 31,44 g/jour (chez les plus forts consommateurs de bio). Cet écart ne représente que 19 % de l'amplitude de consommation observé entre le premier et le dernier quintile de Diallo *et al*. Cela aurait un effet non négligeable si l'effet de la quantité de viande rouge consommée était linéaire, mais il ne semble pas que ce soit le cas. D'après le tableau 2 de Diallo *et al.*, il est normal qu'une telle variation de consommation de viande rouge n'ait pas d'effet très marqué sur le cancer, même pour le cancer du sein. Mais, d'après la même source, même les plus forts consommateurs de bio (4ème quartile de Baudry *et al.*) ont une consommation moyenne de viande rouge qui les situe dans le 2e quintile de Diallo *et al.*, ce qui provoquerait chez eux un accroissement du risque général de cancer de + 24 %, de + 68 % pour le cancer du sein, et + 70 % pour le cancer de la prostate. Si l'on accorde foi aux traitements statistiques de ces deux publications, les forts consommateurs de bio, qu'ils soient hommes ou femmes, gagneraient autant à supprimer la viande rouge de leur alimentation qu'à consommer bio (pour le

risque général de cancer), voire plus (pour le cancer du sein ou de la prostate). Cela montre bien que l'enjeu sanitaire d'une réduction de la consommation de viande rouge (confirmé par de nombreuses études indépendantes) est beaucoup plus important, que celui d'une augmentation de la consommation bio (suggéré à ce jour uniquement par Baudry *et al.*).

Il est donc possible de concilier les résultats respectifs de Baudry *et al.* et Diallo *et al.* sur la viande rouge sans remettre en cause la méthode statistique employée. Toutefois cela nécessite d'admettre que la viande rouge a un effet beaucoup plus important que l'alimentation bio, ce que ces auteurs n'ont pas rappelé.

Le même problème de compatibilité des publications se pose à propos des aliments ultra-transformés. En effet, la publication consacrée à ce thème, par Fiolet *et al.*, annonce un effet important de ces aliments sur le risque de cancer : le risque général de cancer serait augmenté de 21 à 23 % dans le quartile des plus forts consommateurs, par rapport aux plus faibles consommateurs (Table 3). En revanche, Baudry *et al.* ont ajusté l'effet de la consommation d'aliments ultra-transformés dans leur modèle 3, et cela ne change pas les résultats par rapport au modèle 2 où ce facteur de risque n'est pas pris en compte.

Certes, comme pour la viande rouge, cela pourrait s'expliquer par le fait que la différence de consommation d'aliments ultra-transformés était faible entre les non-consommateurs et forts consommateurs de bio, mais ce serait cette fois assez surprenant. Il est logique que la consommation de viande rouge soit peu corrélée avec la consommation bio : les amateurs de bio ne sont pas nécessairement végétariens, comme l'atteste l'importance du marché de la viande bio. En revanche, il serait surprenant que Fiolet *et al.* aient classé comme ultra-transformés beaucoup d'aliments bio. En conséquence, il est donc très probable que les plus forts consommateurs de bio (quartile 4 de Baudry *et al.*) soient très majoritairement dans les plus faibles consommateurs d'aliments ultra-transformés (quartile 1 de Fiolet *et al.)*, et que l'inverse soit vrai. Dans cette hypothèse, il est difficilement compréhensible que le modèle 3 de Baudry *et al.* ne détecte aucun effet de ces aliments. Malheureusement, Baudry *et al.* n'indiquent pas la consommation moyenne d'aliments ultra-transformés de ses différents quartiles, ce qui empêche toute vérification. On peut aussi supposer que l'absence d'effet des aliments ultra-transformés dans Baudry *et al.* s'explique par l'ordre tardif d'introduction de cette variable ajustée, qui n'intervient que dans le dernier modèle testé. Toutefois cela revient alors reconnaître que les interactions entre facteurs de confusion ne sont pas correctement contrôlées par la méthode statistique employée.

En attendant, le résultat est là : avec le même modèle statistique, et sur la même cohorte, les aliments ultra-transformés ont un effet majeur sur le risque de cancer quand ils sont le facteur étudié (Fiolet *et al.*), et plus aucun effet quand ils sont un facteur ajusté (Baudry *et al.)* ! La seule explication possible pour concilier ces deux résultats serait que les forts consommateurs de bio consomment presque autant d'aliments ultra-transformés que les non-consommateurs de bio : une hypothèse bien peu vraisemblable. Il semble donc bien que, quel que soit le facteur nutritionnel étudié par cette méthode, il ait toujours un effet significatif sur le cancer… qui résiste à tous les ajustements.

Au bout du compte, on voit que les résultats de Baudry *et al.*, Fiolet *et al.,* et Diallo *et al*., ne sont conciliables que si les consommations d'alimentation bio, ultra-transformée, et de viande rouge, sont faiblement dépendantes les unes des autres (soit trois paires de variables). Il est donc regrettable que les données publiées ne permettent pas de faire cette vérification que pour la dépendance entre consommation de viande rouge et d'aliments bio.

De surcroît, si l'on admet avec les auteurs que les résultats présentés sont valables, et que les effets attribués respectivement au bio, à l'ultra-transformé, et à la viande rouge sont bien séparés, il devrait en résulter que les résultats de ces trois facteurs de risque sont plus ou moins cumulatifs. Vue la forte corrélation entre le respect des différentes recommandations nutritionnelles, il devrait y avoir une proportion

non négligeable de personnes qui sont membres à la fois du meilleur quartile ou quintile des trois publications. Pour le risque de cancer, elles devraient donc bénéficier à la fois de l'effet protecteur d'une forte consommation bio (- 25 % de risque de cancer), et d'une faible consommation de viande rouge (-45 %) et d'aliments ultra-transformés (- 26 %), par rapport aux personnes mal classées pour ces trois critères.
Y a-t-il vraiment une différence si spectaculaire du risque de cancer entre ces deux sous-populations ? Il serait grand temps de le vérifier, avant d'ajouter de nouvelles publications où chaque facteur de risque continuerait à être traité individuellement.

Un contexte trop complexe pour la méthode statistique utilisée

Comment se fait-il qu'une méthode aussi classique donne des résultats aussi surprenants ? Il faudrait disposer des données de base de l'enquête, et en faire des analyses statistiques plus poussées, pour savoir en toute rigueur pourquoi, mais cela n'a rien de surprenant quand on voit le nombre de variables qui ont été ajustées simultanément, et leur caractère redondant. En effet, les auteurs ont redressé simultanément des variables dont :
- certaines ont un effet mécaniste clairement identifié sur le cancer (comme la consommation de tabac, et de viande rouge ou transformée) ;
- d'autres sont des indicateurs agrégés ou indirects d'une mauvaise nutrition (le *mPNNS-GS*, ou l'indice de masse corporelle), et sont donc des conséquences de l'effet des variables précédentes ;
- et d'autres enfin sont des facteurs sociologiques (niveau d'éducation ou de revenu), qui de toute évidence ne sont pas des facteurs de causalité, mais des facteurs associés aux vraies causes de cancer précédemment citées.
Dans une telle accumulation de facteurs, tous corrélés entre eux, il n'y a rien d'étonnant à ce que les ajustements statistiques n'arrivent pas à hiérarchiser et corriger leurs effets… et finissent par laisser croire que le facteur étudié est celui qui a le plus d'influence !
Notons enfin que la méthode employée privilégie inévitablement la variable étudiée par rapport aux variables ajustées : les effets de ces variables ajustées ne sont pris en compte que dans la mesure où ils influent sur le gradient de la variable à expliquer, selon la stratification initiale, qui est fondée sur l'exposition à la variable étudiée. Dans un modèle multivarié comme le modèle de Cox, si on a une variable explicative étudiée et n variables explicatives ajustées, la population étudiée est un nuage de points dans une espace à n+1 dimensions. La méthode employée ici revient à étudier non pas le nuage de points, mais sa projection sur l'axe de la variable étudiée. Ce « privilège » n'est pas très gênant si cette variable étudiée est un déterminant majeur de la variable à expliquer, et si n n'est pas trop grand. Mais nous sommes ici dans la situation inverse : il y a une foule de variables explicatives ajustées, et les deux variables étudiées ont probablement un rôle mineur par rapport à la plupart d'entre elles.

Des indicateurs nutritionnels sous-employés, et peu pertinents

Dans une situation comme celle-ci, où l'effet des facteurs étudiés (aliments bio et ultra-transformés) doit être dissocié de celui de nombreux facteurs de confusion nutritionnels fortement associés entre eux, il serait préférable de réduire le nombre de variables ajustées, en utilisant un indicateur synthétique de la qualité du régime alimentaire, plutôt que de chercher à ajuster individuellement l'effet de chacun de ces facteurs. C'est une approche que les auteurs qui travaillent sur *NutriNet Santé* ont bien employée, mais de façon paradoxale.
Ainsi Fiolet *et al.* (aliments ultra-transformés et cancer) ont calculé un indicateur *Western Dietary Pattern*, qui mesure le degré d'adoption du régime occidental riche en viande, en graisse et en sucres… et donc défavorable à la santé. Toutefois, curieusement, ils n'introduisent cette variable que dans le modèle 3, après avoir déjà

ajusté dans le modèle 1 des indicateurs qui le composent, comme la ration calorique et la consommation d'alcool. Du coup, cet indicateur *Western Dietary Pattern* ne joue pas le rôle d'indicateur synthétique qui permettrait peut-être d'améliorer les ajustements statistiques, et n'a même plus aucun rôle (puisque le modèle 3 donne des résultats quasiment identiques au modèle 1).

Baudry *et al.* (bio et cancer) ont utilisé l'indicateur *mPNNS-GS*, qui mesure la conformité du régime alimentaire aux recommandations du Programme national nutrition santé. Cette fois, ils l'ont introduit dès leur modèle 2, mais, là encore, ils l'ont ajouté aux variables individuelles qui composent cet indicateur (consommation d'alcool, de graisses, de viande..), au lieu de les y substituer. En conséquence, le *mPNNS-GS* a encore augmenté les redondances entre variables d'ajustement dans ce modèle, au lieu de le réduire.

De plus, le choix du *mPNNS-GS* comme indicateur de la qualité du régime est surprenant, compte tenu du thème de la publication et des travaux précédents des auteurs. En effet, cet article porte sur le lien entre alimentation et cancer. Or les mêmes auteurs ont montré dans Lavalette *et al*., toujours sur la cohorte *NutriNet Santé*, que le *mPNNS-GS* est un médiocre indicateur de la liaison entre alimentation et cancer : il n'est en liaison significative qu'avec le cancer colorectal. D'après cette étude, l'indicateur américain *WCRF/AICR (World Cancer Research Fund-American Institute for Cancer Research)*, mis au point spécifiquement pour ce but, est beaucoup mieux corrélé aux incidences de cancer en général (Figure supplémentaire 1). C'est donc en comparant les effets du bio et des aliments ultra-transformés à celui de cet indicateur, et non du *mPNNS-GS*, que l'on pourrait vérifier si ces aliments ont réellement un effet spécifique sur le cancer, indépendant de leur composition nutritionnelle.

Dans les deux études sur le cancer, les auteurs ont donc utilisé des indicateurs synthétiques dont ils ont démontré eux-mêmes qu'ils étaient inadéquats, et ne les ont introduits dans leurs modèles qu'après avoir déjà ajusté certaines des variables qui les composent. Cette méthode minimise donc très fortement l'effet sanitaire positif du respect des règles nutritionnelles, et peut donc donner l'impression erronée que l'effet positif observé est dû presque entièrement à la variable étudiée, et non aux variables explicatives ajustées. De surcroît, le fait qu'ils aient employé deux indicateurs différents dans Baudry *et al.* et dans Fiolet *et al.* empêche de vérifier si les résultats de ces deux publications sont conciliables.

Il aurait été plus conforme à l'état actuel des connaissances en nutrition de stratifier la population en fonction d'un indicateur synthétique (de préférence le même dans Fiolet *et al.* et Baudry *et al*., et le *WCRF/AICR* plutôt que le *mPNNS-GS* ou le *Western Diet Pattern*), puis de vérifier si le niveau de consommation d'aliments ultra-transformés ou bio avait un effet significatif sur l'incidence des cancers dans chacun des quartiles ainsi définis.

Une discussion orientée des résultats

Normalement la partie de « Discussion » d'une publication scientifique doit être l'occasion de questionner la validité des résultats obtenus. Cela suppose en particulier de vérifier s'ils sont cohérents avec les références bibliographiques déjà existantes et si les hypothèses formulées par les auteurs sont les seules qui puissent expliquer les résultats observés. Or les discussions des deux articles sur l'incidence des cancers présentent des lacunes surprenantes.

Fiolet *et al.* rappellent que les effets supposés des aliments ultra-transformés pourraient avoir deux causes : leur composition nutritionnelle médiocre, et les additifs contenus dans ces aliments ou dans leurs emballages. Curieusement ils n'arbitrent pas entre ces deux causes, alors que leurs ajustements statistiques devraient permettre d'éliminer la première : en effet, l'effet néfaste qu'ils observent persiste même après ajustement de la consommation de lipides, de glucides, de sel, et du *Western Diet Pattern*. Si les auteurs avaient une confiance totale

dans leur méthode statistique, ils devraient donc conclure que l'effet de ces aliments est dû uniquement aux additifs qu'ils contiennent ou à leur texture dégradée…mais ils ne semblent pas prêts à faire ce pas quelque peu audacieux, en tout cas dans une revue à comité de lecture !

Baudry *et al.* citent de façon très sélective la seule étude comparable à la leur, sur la cohorte britannique *One Million Women Cohort* (Bradbury *et al.*, 2014). Ils affirment que, dans cette cohorte comme dans la leur, le seul résultat significatif serait un risque réduit de lymphome non-hodgkinien associé à la consommation de bio. Ils évoquent aussi le fait que, dans la cohorte anglaise, on avait observé un excès de cancer du sein chez les consommatrices de bio, mais ils oublient de souligner les contradictions majeures entre les deux cohortes : dans la *One Million Women Cohort*, les cancers de l'utérus et du cerveau étaient également en excès significatif… chez les consommatrices de bio ! Et l'incidence globale des cancers, tous sites confondus, présentait chez celles-ci un excès global faible (3 %), mais tout près d'être significatif (intervalle de confiance à 95 % : 1,00 – 1,06) (Figure supplémentaire 2).

En fait, la véritable conclusion de cette étude est que l'on observe un léger excès de cancers, très proche de la significativité à 5 %, chez les femmes britanniques consommatrices de bio. Bien entendu, personne n'en conclura que consommer bio aggrave le risque de cancer. Cela montre simplement que la méthode statistique employée (la même que dans les publications *NutriNet Santé*) est décidément totalement inadaptée à la complexité des interactions entre facteurs nutritionnels. Il existe sans doute des facteurs de confusion sociologiques ou comportementaux, non identifiés actuellement, qui brouillent les résultats et devraient être éclaircis, au lieu d'accumuler, avec les méthodes statistiques actuelles, des résultats qui deviennent de plus en plus contradictoires, à mesure qu'on les approfondit. Il est donc compréhensible que Bradbury *et al.*, ainsi que les chercheurs français qui suivent *NutriNet Santé*, n'aient pas retenu ces résultats apparemment défavorables au bio. Mais cela implique qu'ils reconnaissent eux-mêmes que la méthode statistique employée est déficiente, et donc que, sans autre confirmation, ils ne devraient pas accepter ses résultats quand ils vont dans le sens de leurs hypothèses.

Normalement, la discussion des résultats d'une publication scientifique devrait porter non seulement sur leur cohérence avec l'ensemble des travaux comparables publiés par d'autres équipes, mais aussi sur la méthode statistique utilisée. Nous avons vu en introduction que ce deuxième point devrait être particulièrement crucial pour les sujets traités ici, puisque les effets étudiés ne peuvent être mis en évidence qu'après ajustement d'autres facteurs nutritionnels qui leur sont indissociables. Or l'ensemble des publications citées ici se borne à la comparaison avec les publications comparables. C'est particulièrement gênant pour l'article Baudry *et al*. sur le bio, pour lequel il n'existe qu'une publication comparable, ce qui constitue une bien maigre confirmation. Cela d'autant plus que cette seule référence, fondée sur la même méthode statistique que Baudry *et al*., la contredit en fait nécessairement :

- soit on considère que la méthode statistique employée (commune aux deux publications) est valide, et, dans ce cas, il faut admettre que Bradbury *et al.* observent un excès pour plusieurs formes de cancer chez les consommatrices de bio, contrairement à Baudry *et al*. ;
- soit on considère que les résultats défavorables au bio dans Bradbury *et al.* sont dus à un biais statistique (ce qui est effectivement le plus probable), et, dans ce cas, cela remet de même en cause les résultats de Baudry *et al.*

Quoi qu'il en soit, on ne peut pas accepter les résultats de cette méthode statistique, quand ils vont dans le sens de l'hypothèse des auteurs, et les rejeter ou les passer sous silence quand ils vont dans le sens inverse.

Vers une « presse scientifique d'opinion » ?

Les auteurs de ces publications rappellent avec insistance que les corrélations significatives

qu'ils ont observées ne prouvent pas un lien de causalité. C'est une sage précaution oratoire, mais le problème majeur n'est pas là. C'est plutôt que la procédure statistique, qui devait garantir qu'ils ont bien éliminé les facteurs de confusion, a de toute évidence très mal fonctionné. En conséquence, ils ont bien observé une corrélation significative conforme à leurs hypothèses de départ (que l'alimentation bio est favorable à la santé, et que les aliments ultra-transformés sont néfastes), mais ils n'ont pas démontré que les facteurs de risque déjà bien connus pour le cancer ne suffisent pas pour expliquer ces corrélations.

Cette pratique est habituelle dans les sciences humaines ou politiques, où il est considéré comme normal que les mêmes faits puissent donner lieu à des interprétations différentes, avec la même légitimité. Elle est plus inhabituelle dans les sciences de la nature : dans ces disciplines, on s'attend habituellement à ce que le protocole expérimental et le traitement statistique des données permettent d'éliminer toutes les hypothèses alternatives à celles des auteurs. Certes la médecine est un peu à la limite de ces deux mondes : dans le cas des maladies mentales, où la frontière entre comportements pathologiques et normaux, ou simplement originaux, n'est pas tranchée, et où les causalités sont difficiles à établir, on peut admettre que les avis diffèrent selon le point de vue des auteurs. En revanche, dans le cas d'une maladie somatique clairement identifiée comme le cancer, on s'attend plutôt à ce que les causes étiologiques de la maladie soient objectives, et ne dépendent pas des hypothèses de travail des chercheurs.

Notre objectif n'est pas de pointer ici la responsabilité des auteurs. Les articles que nous avons cités ont été publiés dans des revues parmi les plus prestigieuses dans le monde médical : le *British Medical Journal*, et le *Journal of the American Medical Association* (JAMA). Ces travaux peuvent donc être considérés comme conformes aux critères actuels des revues les plus exigeantes. D'ailleurs, ce sujet des publications de sciences de la nature gardant une interprétation ouverte n'a été évoqué nulle part dans le récent rapport de Corvol *et al.* (2016), qui a posé les bases des dispositifs de contrôle de l'intégrité scientifique mis en place dans les instituts de recherche français. Il s'agit donc d'une évolution non explicite, mais assez généralisée, du niveau de preuve attendu des publications scientifiques. Outre le fait que cette évolution remet en cause le principe de réfutabilité, qui est censé faire le partage entre les sciences de la nature et les pseudosciences, elle cause des malentendus avec le grand public, qui continue à considérer qu'une publication scientifique n'a qu'une interprétation et une seule, et énonce des faits objectifs indépendants de l'opinion des auteurs.

Même dans les milieux scientifiques, cette dérive commence à susciter des inquiétudes, comme en témoigne un article récent de l'épidémiologiste J. Ioannidis, très actif dans la réflexion sur l'évaluation des publications scientifiques : « Le défi de la réforme de la recherche sur l'épidémiologie nutritionnelle » (Ioannidis, 2018). Il y donne de nombreux exemples de résultats contradictoires entre des publications portant sur des sujets voisins, parfois à l'intérieur de la même cohorte, et montre le caractère général des problèmes que nous avons observés dans la cohorte *NutriNet Santé*. Il souligne notamment le fait que le découpage des publications (un article par variable d'intérêt) conduit souvent à publier des résultats qui semblent plausibles considérés isolément, mais deviennent incohérents quand on les regarde dans leur ensemble.

C'est typiquement ce que nous avons observé ici, et un regard plus attentif sur les analyses statistiques permet de comprendre le mécanisme à l'œuvre. En effet, ce sont bien les ajustements statistiques, censés garantir que les résultats de chaque publication ne sont pas influencés par les facteurs de confusion étudiés dans d'autres publications, qui ont échoué dans cette tâche.

Le JAMA, qui a publié à quelques semaines d'intervalle l'article de Ioannidis et celui de

Baudry *et al*., semble bien conscient de ce problème, mais l'a traité d'une façon inattendue pour une revue scientifique : il a accompagné l'article de Baudry *et al.* d'un *Editorial Comment* (Hemler *et al.,* 2018), qui relativise très fortement les résultats de la publication de Baudry *et al.,* et, surtout, rappelle l'essentiel : dans l'état actuel des connaissances, il est beaucoup plus important d'avoir une alimentation équilibrée et modérée, que de consommer des aliments bio. Cette attitude rappelle plutôt celle de la presse politique, qui, sur les sujets controversés, donne souvent la parole à deux experts défendant des positions opposées. Toutefois il y a deux différences importantes :

- dans ce cas, la presse « d'opinion » veille au moins à ce que les deux points de vue bénéficient de la même visibilité. Ce n'est pas le cas dans le JAMA, où l'*Editorial Comment* est accessible dans un onglet à part dans la page d'accueil de la publication principale, avec une conséquence facilement prévisible : à la date où nous finalisons cette note (4 février 2020), l'article Baudry *et al.* a été vu 173 973 fois, et l'*Editorial Comment* 22 575 fois !
- les lecteurs de quotidiens nationaux tels que *Le Figaro* ou *Libération* n'attendent pas une vision parfaitement neutre et objective des informations qu'ils traitent : ils recherchent plutôt une vision de l'actualité qui soit conforme à leur propre orientation politique. Ce n'est pas (encore ?) le cas des lecteurs de revues scientifiques.

Sur des sujets ayant des impacts sanitaires aussi importants que ceux évoqués ici, il serait donc nécessaire que les revues scientifiques fassent preuve de plus d'exigence dans la discussion des résultats, et, notamment, dans l'étude de la cohérence des traitements statistiques réalisés. Cela ne signifie pas que les articles dont nous venons de parler n'ont pas de place dans des revues de qualité, mais simplement qu'il faudrait veiller à rappeler plus clairement, et de façon plus équilibrée -ce fut le cas dans le JAMA pour Baudry *et al.*- que des publications comme celles-ci ne sont que des étapes préliminaires de formulations d'hypothèse, dont la confirmation reste à venir… si elle arrive un jour ! Encore faut-il s'entendre sur ce qu'est une confirmation : appliquer les mêmes méthodes statistiques inadaptées, sur une autre cohorte que *NutriNet Santé*, aurait toutes les chances de donner les mêmes résultats, les mêmes causes produisant les mêmes effets. Une vraie confirmation ne peut venir que de l'obtention de résultats similaires avec des traitements statistiques différents, ne privilégiant aucune variable parmi les « variables suspectes » potentielles. C'est pourquoi J. Ioannidis appelle à une véritable réforme de l'épidémiologie nutritionnelle, plutôt que de se contenter d'une vigilance renforcée sur les publications discutables.

Remerciements

L'auteur remercie les membres de la section 8 de l'Académie d'agriculture de France, pour leurs conseils avisés sur les questions nutritionnelles abordées dans cette Note.

Déclaration d'intérêts

L'auteur est salarié de la société iTK, qui collabore avec de nombreux acteurs de l'agro-fourniture (agrochimie et semences, coopératives agricoles).

Références

Baudry J, Assmann KE, Touvier M, Allès B, Seconda L, Latino-Martel P, Ezzedine K, Galan P, Hercberg S, Lairon D, Kesse-Guyot E. 2018. Association of frequency of organic food consumption with cancer risk: findings from the NutriNet-santé prospective cohort study. *JAMA Intern Medicine*,178 (12),1597–1606.

Bradbury KE, Balkwill A, Spencer EA, Roddam AW, Reeves GK, Green J, Key TJ, Beral V, Pirie K, The Million Women Study Collaborators. 2014. Organic food consumption and the incidence of cancer in a large prospective study of women in the United Kingdom, *British Journal of Cancer,* 110, 2321–2326.

Braesco V, Corrieu G, Feillet P, Giachetti I, Pascal G, Risse J, Serpelloni M, This H, Trystram G. 2019. *Aliments dits "ultra-transformés" et santé : que faut-il en penser ?,* https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/points-de-vue/aliments-dits-ultra-transformes-et-sante-que-faut, dernier accès 2020-02-05.

CIRC. 2015. *Cancérogénicité de la consommation de viande rouge et de viande transformée*, Monographies du CIRC, V114. https://www.cancer-environnement.fr/513-Vol-114--Cancerogenicite-de-la-consommation-de-viande-rouge-et-de-viande-transformee.ce.aspx , dernier accès 2020-02-05.

Corvol P (ed.). 2016. *Bilan et propositions de mise en œuvre de la charte nationale d'intégrité scientifique*. http://cache.media.enseignementsup-recherche.gouv.fr/file/Actus/84/2/Rapport_Corvol_29-06-2016_601842.pdf, dernier accès 2020-02-05.

Diallo A, Deschasaux M, Latino-Martel P, Hercberg S, Galan P, Fassler P, Allès B, Guéraud F, Pierre FH, Touvier M. 2018. Red and processed meat intake and cancer risk: results from the prospective NutriNet-Santé cohort study, *International Journal of Cancer*, 142 (2), 230-237.

Fiolet T, Srour B, Sellem L, Kesse-Guyot E, Allès B, Méjean C, Deschasaux M, Dassier P, Latino-Martel P, Beslay M, Hercberg S, Lavalette C, Monteiro CA, Julia C, Touvier M. 2018. Consumption of ultra-processed foods and cancer risk: results from NutriNet-Santé prospective cohort. *British Medical Journal,* 360, k322.

Gueguen L, Pascal G. 2018. *Non, il n'est pas établi que les aliments bio protègent du cancer.* https://www.academie-agriculture.fr/publications/publications-academie/points-de-vue/non-il-nest-pas-etabli-que-les-aliments-bio, dernier accès 2020-02-05.

Hemler EC, Chavarro JE, Hu FB. 2018. Organic Foods for Cancer Prevention—Worth the Investment?, *JAMA Intern Medicine*, 178 (12), 1606–1607.

INPES. 2012. *Recommandations relatives à l'alimentation, à l'activité physique et à la sédentarité pour les adultes*, http:/inpes.santepubliquefrance.fr/CFESBases/catalogue/pdf/581.pdf, dernier accès 2020-02-05.

Ioannidis JPA. 2018. The Challenge of Reforming Nutritional Epidemiologic Research, *JAMA Intern Medicine*, 320 (10), 969–970 .

Lavalette C, Adjibade M, Srour B, Sellem L, Fiolet T, Hercberg S, Latino-Martel P, Fassier P, Deschasaux M, Kesse-Guyot E, Touvier M. 2018. Cancer-Specific and General Nutritional Scores and Cancer Risk: Results from the Prospective NutriNet-Santé Cohort. *Cancer Research*, 78 (15), 4427-4435.

Prud'homme L (ed). 2018. *Compte rendu de la Commission d'enquête sur l'alimentation industrielle : qualité nutritionnelle, rôle dans l'émergence de pathologies chroniques, impact social et environnemental de sa provenance*. http://www.assemblee-nationale.fr/15/pdf/cr-cealimindu/17-18/c1718009.pdf, dernier accès 2020-02-05.

Schnabel L, Kesse-Guyot E, Allès B, et al., 2019. Association Between Ultraprocessed Food Consumption and Risk of Mortality Among Middle-aged Adults in France. *JAMA Intern Medicine*, 179 (4), 490–498.

Stoop P. 2019. *Consommer bio : quel effet sur le cancer ? (attention, il y a un piège...)*, http://www.forumphyto.fr/2017/10/30/consommer-bio-quel-effet-sur-le-cancer-attention-il-y-a-un-piege/, dernier accès 2020-02-05.

Timsit J-F, Alberti C, Chevret S. 2005. Le modèle de Cox – Cox proportional hazards regression analysis. *Revue des maladies respiratoires*, 22 (6), 1058-1064.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)
Note de recherche

Edité par
Alain Pavé, biométricien, professeur émérite à l'Université Claude Bernard Lyon 1, membre de l'Académie des technologies et membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs

Sandrine Charles est professeur des universités, à l'Université Claude Bernard (Lyon 1) et dirige l'équipe « Modélisation et Écotoxicologie Prédictive » du Laboratoire de Biométrie et Biologie Évolutive (UMR 5558, UCBL, École Vétérinaire de Lyon, CNRS, INRIA et Hospices Civils de Lyon), membre junior de l'iUF (2011-2016).

Muriel Rabilloud, Maître de conférence des universités à l'Université Claude Bernard (Lyon 1) et praticien hospitalier, Service de Biostatistique et Bioinformatique des Hospices Civils de Lyon et Laboratoire Biostatistique Santé, LBBE UMR 5558.

Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Notes de recherche » des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
24 avril 2019

Accepté
5 février 2020

Publié
17 février 2020

Citation
Stoop P. 2020. Santé et alimentation : attention aux faux-semblants statistiques, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 9(1), 1-20. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a655672.

Philippe Stoop est Directeur Recherche et Innovation de la société iTK (développement d'outils d'aide à la décision et d'objets connectés pour l'agriculture et l'élevage), et membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France (section 9 : Agrofournitures).

Table supplémentaire 1. On donne page suivante le tableau 1 de Baudry et al. *(2018), qui montre la liaison entre la consommation d'aliments bio et les principaux facteurs enregistrés dans la cohorte NutriNet Santé. Exemple de lecture : il y a une liaison hautement significative (p < 0,01) entre l'âge et la consommation d'aliments bio. En effet, les 25 % de personnes ayant la plus forte consommation de bio (Q4) ont un âge moyen de 45,89 ans, alors que les personnes ayant la consommation la plus faible (Q1) sont âgées en moyenne de 42,99 ans.*

En conséquence, il est légitime de corriger les incidences de cancer observées dans le Q4 de l'effet de cette différence d'âge, pour ne pas attribuer aux aliments bio une augmentation du risque de cancer qui serait en fait due à la différence d'âge entre le Q1 et le Q4. Le problème est ici qu'il y a une vingtaine de facteurs corrélés à la consommation de bio, ce qui rend les redressements statistiques très difficiles.

*De surcroît, on note qu'à l'exception de l'âge, du sexe, et des antécédents familiaux de cancer (*family history of cancer*), tous ces facteurs jouent dans le sens d'une réduction du risque de cancer chez les forts consommateurs de bio. Si les ajustements statistiques multiples réalisés dans les modèles 2 et 3 de cette publication n'ont que très peu d'effet, ce n'est donc pas parce que les effets de facteurs négatifs compenseraient les effets d'autres facteurs positifs : c'est bien que le modèle statistique utilisé ne trouve pour ces variables qu'un effet faible à nul sur le risque de cancer, même pour la consommation de tabac ou d'alcool, et de viande rouge ou transformée.*

Characteristic	Q1	Q2	Q3	Q4	P value
Organic food score, mean (SD) range, 0-32 points	0.72 (0.82)	4.95 (1.41)	10.36 (1.69	19.36 (4.28)	<0.001
Participants, No	16811	17644	17240	17231	NA
Age, mean (SD), y	42.99 (15.24)	43.31 (14.78)	44.72 (14.30)	45.89 (13.37)	< 0.001
Female, %	74.2	78.2	78.7	80.9	<0.001
Month of inclusion, mean (SD)	6.08 (2.56)	6.11 (2.57)	6.10(2.74)	5.99 (2.93	0.002
Occupational status, %					
Unemployed	5.9	5.7	5.6	6.3	
Student	9.5	9.3	7.3	4.6	
Self-employed, farmer	1.6	1.7	1.7	2.5	
Employee, manual worker	24.4	20.6	17.4	14.9	
Intermediate professions	16.3	17.6	17.8	18.8	<0.001
Managerial staff, intellectual profession	17.8	21.6	25.9	29.1	
Retired	19.0	17.9	18.9	17.8	
Never employed	5.5	5.6	5.4	6.1	
Educational level					
Unidentified	0.6	0.7	0.5	0.8	
<High school diploma	22.8	19.4	16.4	14.4	<0.001
High school diploma	19.7	17.4	15.7	13.7	
Postsecondary graduate	56.9	62.6	67.4	71.1	
Marital status %					
Cohabiting	79.6	80.6	81.8	85.3	<0.001
Monthly income per household unit, e, %					
<1200	20.7	17.0	14.0	13.2	
1200-1800	26.9	25.3	22.9	23.5	
1800-2700	21.2	23.3	24.7	25.6	<0.001
> 2700	18.8	22.4	27.6	26.2	
Unwilling to answer	12.4	12.0	10.8	9.5	
Physical activity, %					
Low, < 30 min of brisk walking per day or equivalent	26.8	27.3	29.5	31.3	
Moderate, 30-60 min of brisk walking per day or equivalent	33.7	37.3	38.8	40.6	<0.01
High, >60 min of brisk walking per day or equivalent	24.0	20.8	19.0	17.2	
Missing data	15.5	14.5	12.7	11.0	
Smoking status, %					
Never smoker	52.0	51.9	50.2	49.4	
Former smoker	31.6	31.9	34.5	36.8	<0.001
Current smoker	16.4	16.2	15.3	13.8	
Alcohol intake, mean (SD), g/d	8.34 (13.84)	8.18 (13.11)	8.17 (12.19)	7.54 (11.30)	
Family history of cancer, %	33.8	34.5	36.8	38.6	< 0.001
MBI, mean (SD)	24.46 (4.92)	23.92 (4.63)	23.64 (4.32)	22.92 (3.89	< 0.001
Height, mean (SD)	166.91 (8.27)	166.58 (8.05)	166.54 (8.11)	166.40 (7.98)	< 0.001
Energy intake, mean (SD), g/d	1881.71 (493.19)	1855.10 (469.03)	1848.42 (474.71)	1841.24 (484.11)	< 0.001
mPNNS-GS, mean (SD)	7.41 (1.72)	7.70 (1.71)	7.95 (1.71)	8.19 (1.69)	< 0.001
Fiber intake, mean (SD), g/d	17.80 (6.55)	18.87 (6.84)	20.05 (7.20)	22.60 (8.31)	< 0.001
Processed meat intake, mean (SD), g/d	23.67 (29.40)	21.15 (27.12)	18.85 (24.92)	15.12 (22.49)	< 0.001
Red meat intake, mean (SD), g/d	48.72 (44.51)	44.59 (41.44)	40.77 (40.67)	31.44 (36.81)	< 0.001
Parity, mean (SD)	1.26 (1.26)	1.27 (1.23)	1.34 (1.23)	1.41 (1.21	< 0.001
Postmenopausal status, %	16.6	19.3	22.4	24.7	< 0.001
Use of hormonal treatment for menopause, %	4.0	4.6	5.0	4.9	0.01
Use of oral contraception, %	24.7	23.2	19.1	14.0	< 0.001

Figure supplémentaire 1. Figure 1 de Lavalette et al. *(2018) : dans cet article, qui porte également sur la cohorte* NutriNet Santé*, les auteurs ont comparé le degré de liaison de l'incidence des cancers avec plusieurs indicateurs de qualité nutritionnelle des régimes alimentaires. Ils ont observé que l'indicateur américain W*CRF/AICR *est le mieux corrélé avec le risque de cancer : les personnes dont le régime est bien classé selon cet indice ont un risque significativement réduit pour la plupart des cancers majeurs. Ce résultat est logique, car cet indicateur a été créé pour ce but. En revanche, le* PNNS-GS*, qui mesure la conformité du régime alimentaire aux recommandations du PNNS, est un indicateur beaucoup moins net du risque de cancer : son respect n'est pas corrélé à une baisse statistiquement significative du risque de cancer, sauf pour les cancers colorectaux. Ce résultat est logique, car le* PNNS-GS *a des objectifs plus généralistes que le* WCRF/AICR*. Compte tenu de ce résultat, on ne comprend pas bien pourquoi la même équipe a redressé les résultats de Baudry* et al. *(qui portaient sur la liaison entre cancer et alimentation bio) par le* mPNNS-GS *(variante du* PNNS-GS *qui ne prend pas en compte l'activité physique) : d'après Lavalette* et al.*, c'est le* WCRF/AICR *qu'il faudrait prendre comme référence pour l'effet protecteur du régime alimentaire (hors effet du bio), et non le* mPNNS-GS*. Il en de même dans Fiolet* et al.*, sur les aliments « ultratransformés », ou c'est encore un troisième indicateur, le* Western Diet Pattern*, qui a été retenu, à la place du* WCRF/AICR*. De surcroît, pour être plus cohérent avec le consensus scientifique actuel, il eut été préférable de stratifier la cohorte* NutriNet Santé *selon son* WCRF/AICR *et de vérifier ensuite si le niveau de consommation d'aliments bio (ou « ultra-transformés ») a un effet significatif dans chaque quartile de* WCRF/AICR*.*

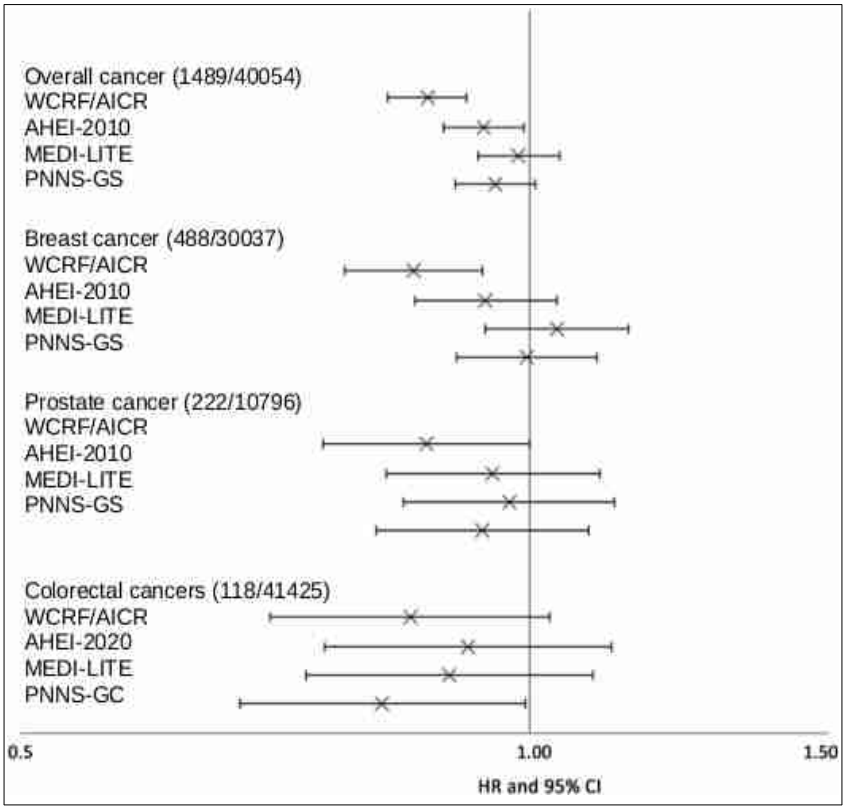
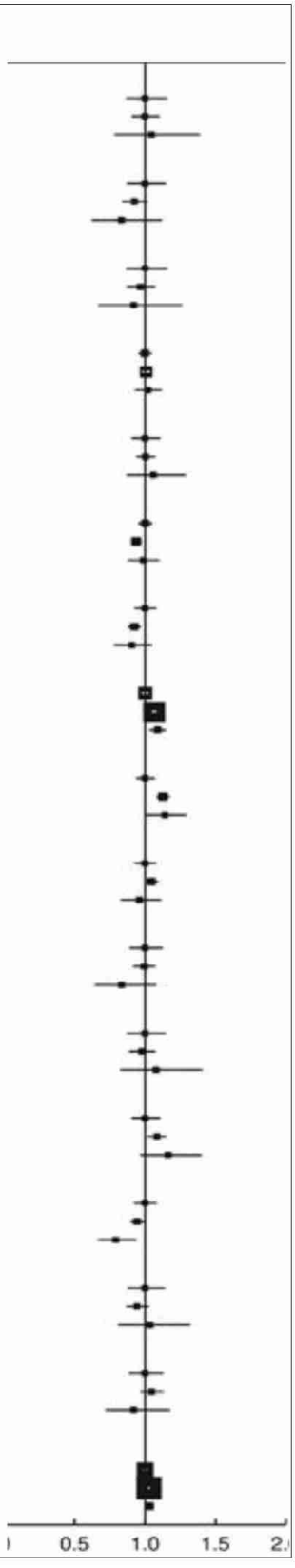


Figure supplémentaire 2. Figure 2 de Bradbury et al. *(2014), sur l'incidence des cancers chez les consommatrices de bio dans la cohorte britannique* One Million Women. *Contrairement à la présentation tronquée qui en est le plus souvent propagée en France, cette étude (qui a employé la même méthode statistique que celle qui a été appliquée à la cohorte* NutriNet Santé*) est très loin de confirmer les résultats de Baudry* et al. *sur une liaison négative entre alimentation bio et cancer. Le seul point commun est que l'on trouve dans les deux cohortes une incidence réduite de lymphome non hodgkinien chez les fortes consommatrices de bio. En revanche, on trouve chez les consommatrices britanniques de bio une incidence significativement augmentée des cancers du sein, de l'utérus et du cerveau (pour les deux derniers cancers, l'excès n'est significatif que pour les consommatrices occasionnelles, mais on observe aussi un excès non significatif aussi fort, voire plus, chez les consommatrices les plus fortes). Et, pour l'ensemble des cancers, l'excès chez les fortes consommatrices de bio était tout proche de la significativité à 5 % (*hazard ratio *de 1,03, avec un intervalle de confiance à 95 % de [1.00-1.06].*

Bien sûr, personne de sérieux n'en conclurait que l'alimentation bio provoque des cancers : il s'agit sans doute de l'effet de facteurs de confusion associés à la consommation d'aliments bio chez les femmes britanniques. Toutefois cette publication montre bien que la méthode statistique employée est incapable de corriger correctement l'effet des facteurs de confusion associés au bio. Et sa réception médiatique est révélatrice de la partialité avec laquelle les études scientifiques sur ces sujets sont examinées.

Cancer site	Number of cases	Rr (95 % g-s CI)
Oral cavity		
Never	210	1.00 (0.87-1.15)
Sometimes	375	1.00 (0.90 -1.10)
Usually/always	46	1.04 (0.78-1.39)
Oesophagus		
Never	236	1.00 (0.87-1.15)
Sometimes	400	0.92 (0.84-1.01)
Usually/always	46	0.83 (0.62-1.12)
Stomach		
Never	208	1.00 (0.87-1.16)
Sometimes	350	0.97 (0.87-1.07)
Usually/always	39	0.92(0.67-1.26)
Colorectum		
Never	1890	1.00 (0.85-1.05
Sometimes	3845	1.01 (0.98-1.04)
Usually/always	488	1.02 (0.93-1.12)
Pancreas		
Never	424	1.00 (0.90-1.11)
Sometimes	795	1.00 (0.94-1.07)
Usually/always	104	1.06 (0.87-1.29)
Lung		
Never	1762	1.00 (0.95-1.05)
Sometimes	2399	0.94 (0.90-0.98)
Usually/always	308	0.98 (0.88-1.10)
Malignant melanoma		
Never	724	1.00 (0.93-1.08)
Sometimes	1528	0.92 (0.88-0.97)
Usually/always	182	0.00 (0.78-1.05)
Breast		
Never	5450	1.00 (0.97-1.03)
Sometimes	11888	1.07 (1.05-1.08)
Usually/always	1353	1.09 (1.03-1.15)
Uterus		
Never	988	1.00 (0.94-1.07)
Sometimes	2213	1.13 (1.08-1.17)
Usually/always	250	1.14 (1.00 -1.29)
Ovary		
Never	770	1.00 (0.93-1.08)
Sometimes	1675	1.04 (1.00-1.09)
Usually/always	182	0.96 (0.83-1.11)
Kidney		
Never	324	1.00 (0.89-1.12)
Sometimes	593	0.99 (0.92-1.07)
Usually/always	59	0.83 (0.64-1.08)
Bladder		
Never	234	1.00 (0.87-1.15)
Sometimes	412	0.97 (0.89-1.07)
Usually/always	55	1.08 (0.82-1.41)
Brain		
Never	420	1.00 (0.90-1.11)
Sometimes	916	1.08 (1.01-1.15)
Usually/always	115	1.16 (0.97-1.40)
Non-Hodgkin lymphoma		
Never	685	1.00 (0.92-1.08)
Sometimes	1310	0.94 (0.90-0.99)
Usually/always	133	0.79 (0.67-1.40)
Multiple myeloma		
Never	248	1.00 (0.88-1.14)
Sometimes	490	0.94 (0.87-1.03)
Usually/always	66	1.03 (0.81-1.32)
Leukemia		
Never	296	1.00 (0.89-1.13)
Sometimes	601	1.04 (0.97-1.13)
Usually/always	65	0.92 (0.72-1.18)
All cancers		
Never	16250	1.00 (0.98-1.02)
Sometimes	33307	1.03 (1.01-1.04)
Usually/always	3942	1.03 (1.00-1.06)



Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)
Note de lecture

L'analyse critique des manuscrits et les conseils d'amélioration donnés aux auteurs. *A propos des publications : Klebel et al.*, 2020, Stern and O'Shea, 2019; Sarabipour *et al.*, 2019; Inrae, 2016.

Critical analysis of manuscripts and advice for improvement given to authors. About the publications: Klebel et al, 2020, Stern and O'Shea, 2019; Sarabipour et al, 2019; Inrae, 2016.

Hervé This [1]

[1] *INRAE, UMR 0782 SayFood, France.*

Correspondance :
Groupe de gastronomie moléculaire, AgroParisTech, 16 rue Claude Bernard, Paris France
herve.this@inrae.fr

Résumé
L'avènement des systèmes numériques de traitement de l'information et l'afflux des manuscrits soumis aux revues scientifiques ont modifié l'organisation de l'édition scientifique, ce qui a conduit à discuter le processus nommé « évaluation par les pairs ». On examine ici les circonstances qui ont progressivement concouru à l'organisation des modalités modernes de publication scientifique, et l'on discute les principes qui peuvent fonder des organisations nouvelles de publication. Des propositions de modifications terminologiques, associées à des pratiques éditoriales, sont faites.

Abstract
The development of digital systems of information and the increase of the number of manuscripts submitted to scientific journals have been triggering major changes in scientific publishing, in particular about what is called "peer review". In this article, the circumstances that generated the old

organisation of scientific publishing are recalled, the individual and collective interests of various features of the system are analyzed, and the principles that can lead to a modernization of the publication process are discussed. Changes in terminology, as well as of editorial practices, are proposed.

Mots clés
publication, manuscrit, revue, accès, libre, rapporteurs

Keywords
scientific publishing, manuscript, journal, access, free, peer review

Introduction

Depuis plusieurs années, les techniques numériques du traitement de l'information bouleversent l'édition scientifique et technologique. Notamment les chercheurs et leurs tutelles ont pris acte de la réduction du travail des éditeurs privés auxquels les revues étaient confiées, alors que se développait un mouvement en faveur de la gratuité de l'accès aux publications (Inra, 2016). Ces mutations ont été largement discutées par des scientifiques ou par des institutions telles que l'Inrae (Inra, 2016) ou encore l'*Académie des sciences* (Bach et Jérome, 2014) et l'*Académie d'agriculture de France* (N3AF, 2016 ; This, 2016).
Plus récemment, des dispositifs variés de publication des travaux scientifiques ont été proposés, notamment dans les articles qui font l'objet de cette note de lecture et que l'on discute, en insistant tout particulièrement sur le dernier (Kleber *et al.*, 2020).

L'évaluation par les pairs ?

Commençons par examiner le fondement du dispositif encore largement actuel, associé aux terminologies d' « évaluation par les pairs », d' « expertise par les pairs » ou de « validation par les pairs » (Bach et Jérome, 2014 ; Naegelen, 2016). Observons d'abord que ces expressions ne sont pas la stricte traduction de *peer review*, qui serait plutôt « rapport par des pairs », mais on note surtout que ces dénominations, ainsi que la pratique courante aujourd'hui qui les accompagne, ne sont ni universelles ni fixes. Notamment, il y a moins d'un siècle seulement (précisément en 1936), Albert Einstein (1879-1955) retira un manuscrit d'une revue américaine à laquelle il l'avait soumis, parce que la revue avait demandé une évaluation de son texte (à un jeune chercheur). Il écrivit à la revue : "*We (Mr Rosen and I) had sent you our manuscript for publication and had not authorized you to show it to specialists before it is printed. I see no reason to address the -in any case erroneous- comments of your anonymous expert. On the basis of this incident I prefer to publish the paper elsewhere*"[1] (Kennefick, 2005). De fait, un auteur qui produit un texte en endosse la responsabilité, et les rapports demandés par les revues peuvent s'apparenter à une censure indue.
Avant d'analyser cette pratique très générale des revues scientifiques modernes, discutons les termes de l'expression qui la désigne. D'une part, à propos du second membre (les « pairs »), on comprend qu'il peut y avoir hésitation et abus à se prétendre le « pair » d'Einstein, par exemple, en tout cas si le terme est pris dans son sens original (TLFi, 2019a). En outre, même si la valeur n'attend pas le nombre des années, l'évaluation d'un manuscrit envoyé par un scientifique chevronné peut choquer quand elle est faite par un jeune scientifique encore imparfaitement formé, même si l'éditeur qui a demandé le rapport est capable de filtrer les commentaires et d'arbitrer en cas de désaccord. Or l'afflux actuel des manuscrits dans les revues à fort facteur d'impact (Vesper, 2018) conduit les éditeurs à solliciter tous ceux qu'ils repèrent dans un champ voisin de celui du manuscrit, ce qui peut conduire à des incohérences :

1 « Nous (Mr Rosen et moi) vous avons envoyé notre manuscrit pour publication, et nous ne vous avons pas autorisé à le montrer à des spécialistes avant qu'il soit imprimé. Je ne vois aucune raison de tenir compte des commentaires -en l'occurence erronés- de votre expert anonyme. Du fait de cet incident, je préfère publier l'article ailleurs. » [traduction personnelle]

d'expérience, je sais au moins deux revues scientifiques internationales "de qualité" (d'après le « facteur d'impact », considéré comme bon ou excellent par les institutions scientifiques) qui ont envoyé pour évaluation des manuscrits à de très jeunes collègues de mon groupe (des doctorants en début de thèse, lesquels, d'ailleurs, m'ont sollicité pour les aider à faire le travail de rapport). Bref, peut-être devons nous abandonner ce terme de « pairs », quand nous désignons la procédure dont nous discutons ici, et simplement parler de « rapporteurs » quand un rapport est demandé par un membre du comité éditorial d'une publication.

Que demande-t-on, d'ailleurs, à ces rapporteurs ? Le mot « évaluation », dans une des expressions que nous discutons ici, est contestable, car l'objectif n'est pas de savoir si un article est mauvais, passable, bon ou excellent, mais d'aboutir à la publication d'articles de qualité. A cette fin, les rapporteurs doivent surtout identifier des insuffisances ou des possibilités d'amélioration, afin que les rapports, transmis aux auteurs, conduisent les auteurs à préparer des manuscrits aussi irréprochables que possible du point de vue scientifique et littéraire, de la discussion conceptuelle des résultats à la faute d'orthographe. *In fine*, les auteurs devraient avoir la responsabilité de leurs textes, l'éditeur se réservant la possibilité d'accompagner certaines publications de « Commentaires » ou de « Lettres à l'éditeur », qui discuteraient des points de désaccord, notamment dans les interprétations des résultats.

Les revues ont-elles besoin de ces rapports ? Peuvent-elles s'arrêter au point de vue personnel qui était celui d'Einstein ? Ce serait oublier que la publication d'un article scientifique s'inscrit dans le cadre d'un travail collectif, que les scientifiques sont le plus souvent payés par des institutions, et que, de ce fait, ils doivent placer leurs travaux « en relation » avec la collectivité. Il serait également naïf de croire que tous les scientifiques sont honnêtes et parfaitement consciencieux, que tous ceux qui proposent des manuscrits ont toujours correctement examiné les travaux antérieurs, que leurs validations sont toujours suffisantes, que leur production est littérairement sans faute. En outre, même si l'on conserve le point de vue d'Einstein, il faut être un esprit puissant pour assumer seul la responsabilité complète de sa production scientifique, et personne ne perd rien, de toute façon, à voir son manuscrit lu avant publication, afin de bénéficier de conseils en vue de l'amélioration du texte. Les auteurs les moins chevronnés, eux, ont tout intérêt à bénéficier de l'expertise des « rapporteurs » et de la « revue » qui accepte la publication de leur manuscrit.

La raison pour laquelle nous avons placé les mots « rapporteurs » et « revue » entre guillemets et la suivante : nous verrons plus loin que le premier terme est historiquement justifié, mais nous observerons sans attendre que le mot « revue » ne s'applique plus aux systèmes de publications modernes, numériques, en ligne (TLFi, 2019b) ; il serait plus juste de considérer des « publications scientifiques », termes que nous retiendrons pour la suite de ce texte.

Finalement on observe que, surtout dans les dernières décennies, les éditeurs des publications scientifiques ont trouvé une sécurité et de l'aide à solliciter des rapporteurs grâce auxquels ils s'assurent de la qualité de leurs publications, mais qui les aident aussi à filtrer les trop nombreuses propositions qu'ils reçoivent. Toutefois, avant de discuter des possibles transformations du système des publications scientifiques, à la lumière des évolutions qui ont conduit au système actuel, on observe que c'est d'un examen critique constructif, et non pas d'une évaluation, dont la communauté scientifique a besoin, et l'on comprend l'intérêt d'un processus positif d'amélioration des manuscrits, en vue de la publication d'articles de bonne qualité. Il n'est donc pas question d' « évaluation », mais d'analyse critique, ou d'aide à la publication, ou encore d'examen constructif. Puisque le travail des rapporteurs n'est pas de faire passer un examen, nous proposons l'expression « analyse critique des manuscrits », que nous utiliserons dans la suite de ce texte.

L'évolution du système

Ces discussions terminologiques étant faites,

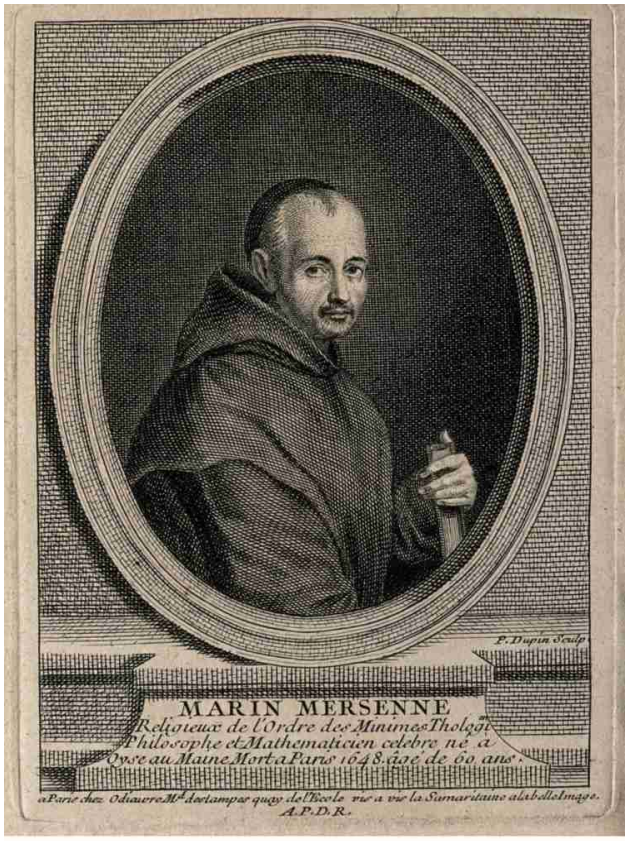


*Figure 1. Marin Mersenne (1588-1648) était un religieux de l'ordre des Minimes, érudit, mathématicien et philosophe. Avec ses amis de l'*Academia Parisiensis *(l'"Académie de Mersenne", qui préfigura celle qui fut créée par Colbert en 1666), qui se tenait dans les maisons de chacun de ses membres, la question était de chercher des « vérités démontrées ». Mersenne fut le centre d'un réseau d'échange d'informations qui préfigura l'Académie des sciences.*

l'examen de l'histoire de l'édition scientifique permet de mieux comprendre la situation actuelle, ainsi que les possibles évolutions du système.

Ray Spier (2002) trouve en médecine l'origine du système des rapports : au 9e siècle, Shap bin Ali Al Rawhi publie une *Éthique du médecin*, où il propose que le praticien conserve des notes de ses consultations, afin de justifier de sa pratique, le cas échéant (Al Kazi, 1997 ; Ajlouni et Al-Khalidi, 1997).

Puis, après la Renaissance, quand des individus plus nombreux se livrent à des pratiques de « philosophie de la nature », selon une méthodologie progressivement explicitée grâce à Francis Bacon, Galilée ou d'autres (Bacon, 1620 ; Galilée, 1640), les scientifiques (le terme n'existait pas encore, comme on l'indique plus loin) communiquent directement les uns avec les autres, par oral ou par courrier. Pour leurs correspondances, ils ont donc la charge de recopier leurs manuscrits pour les diffuser, ou bien de les faire imprimer à leurs frais. Marin Mersenne (1588-1648), en France (Taussig, 2010), ou Henry Oldenburg (1619-1677), en Angleterre (Boas Hall, 1965), mettent alors les scientifiques en relation, mais c'est sans doute le *Journal des Sçavans*, créé par Denis de Sallo (1629 -1669) en 1665 (Rémond, 2015), puis les *Philosophical Transactions*, plus tard la même année, qui sont les premières publications scientifiques institutionnelles. Oldenburg, notamment, était secrétaire de la *Royal Society of London*, et le journal lui permit de simplifier sa correspondance (Cocheris, 1860). Aucune de ces deux revues n'avait de système de rapporteurs.

Ces derniers apparaissent l'année suivante, en France, quand le roi Louis XIV charge l'*Académie royale des sciences* d'évaluer les inventions et les découvertes. Les académiciens sont payés par l'État, et le gouvernement tient compte de leurs rapports, qui prévalent sur les avis de la Censure.

Grâce aux procès-verbaux de l'*Académie royale des sciences*, on connaît les missions dévolues aux académiciens. Ceux-ci doivent d'abord assurer une veille scientifique et technique, par le compte-rendu des publications et recherches menées en province ou dans d'autres pays. *L'Académie* est aussi, et surtout, un lieu de « validation » de la recherche scientifique et technique : tout savant étranger à *l'Académie* peut soumettre ses découvertes ou ses inventions, qui sont valiées par une commission composée de deux à trois académiciens. Un

Table 1. L'introduction de l'Histoire de l'Académie royale des sciences, pour l'année 1669.

« Selon le Règlement donné par le Roy à l'Académie des Sciences au commencement de l'année 1699 cette Histoire auroit dû paraître à la fin de cette même année. Mais comme par ce Règlement l'Académie entière se renouveloit, il a fallu quelques temps pour donner à toutes choses un premier mouvement, qu'il sera désormais facile d'entretenir. Sans entrer dans le détail de tout ce qui a retardé une Impression qui auroit dû être faite deux ans plus tôt, il suffit de dire ici que l'Histoire de l'année 1700 est commencée d'imprimer du jour que celle-cy a été finie, et que l'année 1701 suivra immédiatement après,& qu'enfin l'on ne discontinuera point que l'on ne soit mis dans les termes précis de Règlement.
L'Histoire de l'Académie des Sciences n'est proprement que l'Histoire de ses Ouvrages, & de ses pensées, si on en excepte quelques faits qui regardent son nouvel établissement, & qui sont particuliers à l'année 1699. Cette Histoire contient deux Parties. L'une que l'on a voulu appeler plus particulièrement Histoire, est l'Extrait & l'Abrégé de tout ce qui s'est dit de remarquable dans l'Académie, soit par écrit, soit de vive voix. L'autre Partie, ce sont les Mémoires, c'est-à-dire, celles d'entre toutes les pièces lues dans l'Académie qui ont été jugées les plus importantes, & les plus dignes d'être données au public dans toute leur étendue. Ces Mémoires sont à peu près icy ce que sont dans une Histoire ordinaire des Actes originaux ou des Preuves, que l'on imprime quelquefois à la fin.
L'Histoire comprend plus de choses que les Mémoires. On a voulu qu'outre les matières dont ils traitent, elle recueillit ce qu'on ne croyait pas à propos de donner tout au long, & qu'on ne vouloit pourtant pas perdre entièrement, & en même temps on a eu dessein que sur tous les sujets, soit qu'ils lui fussent commun avec les Mémoires, soit qu'ils lui fussent particuliers, elle fut plus proportionnée à la portée de ceux qui n'ont qu'une médiocre teinture de Mathématique & de Physique, car pour ceux qui absolument n'en ont aucune, il feroient mieux de prendre les choses d'un peu plus haut, & il aurait fallu de trop grands discours pour remonter en leur considération jusqu'aux premiers Elément des Sciences. »

rapport favorable est une forme de reconnaissance destinée à encourager les vocations scientifiques et l'innovation technique ; il peut déboucher sur une publication, sous le patronage de l'*Académie*, dans les *Mémoires des savants étrangers* ou dans le *Recueil des machines et inventions approuvé par l'Académie royale des sciences*. C'est souvent une première étape vers une carrière scientifique ou, pour les inventeurs, l'occasion d'obtenir un privilège d'exploitation, ancêtre du brevet, ou de lever des fonds auprès de mécènes (Chabot, 2017).
A l'époque, le mot « expert » existe en français, mais pas en anglais : cela signifiait être auteur de rapports. En pratique, les académiciens chargés de rapports n'étaient pas désignés par ce terme d'expert ; ils étaient des « rapporteurs » qui devaient non seulement valider ou non le travail présenté, comme indiqué précédemment, mais discuter tout autant la forme (logique du plan, cohérence des assertions formulées) que le fond (reconnaissance des savoirs, validité des expériences décrites, intérêt du travail). Une fois datés et signés, les rapports étaient transmis à l'*Académie* au cours de ses « travaux ordinaires » : les rapporteurs proposaient soit le rejet, soit l'approbation du mémoire, et, parfois, son impression dans les recueils académiques (Mafarette-Dayries, 2000).
En 1699, quand l'*Académie royale des sciences* fut réformée, Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657-1757) inventa un genre nouveau, avec la série des volumes de l'*Histoire et Mémoires de l'Académie royale des sciences couvrant la période de 1699 à 1740*, pour une publication entre 1702 et 1742 (Seguin, 2012) ; ce modèle fut adopté par ses successeurs, du moins jusqu'en 1786. Chacun des volumes de l'*Histoire de l'Académie royale des sciences* était composé de deux sections, reliées en un seul volume, mais reconnaissables à leur pagination particulière. La première partie, désignée par le titre d'*Histoire*, était rédigée par le secrétaire perpétuel de l'*Académie* et se terminait par les *Éloges des académiciens décédés dans l'année*. La seconde partie était celle des *Mémoires*, où étaient rassemblés les travaux présentés par les académiciens ou envoyés par les correspondants étrangers et approuvés par la compagnie.

Figure 2. Le physicien William Whewell (1794-1866) fut le premier à introduire des rapports, pour accompagner les publications scientifiques. A l'époque, il s'agissait de textes destinés à promouvoir des publications.

Ainsi l'*Histoire de* l'*Académie royale des sciences* proprement dite constituait une présentation d'ensemble des activités des savants pendant une année civile, donnant au lecteur un panorama général des principales découvertes réalisées durant ce temps et fournissant les mémoires proprement dits dans la seconde partie (Table 1).
Quand un auteur écrit seul, comme le faisait Denis de Sallo, il est libre et responsable de ses choix, mais quand une revue publie les manuscrits de plusieurs auteurs, elle doit prendre des décisions : en 1752, après des critiques portées contre les *Philosophical Transactions*, la *Royal Society of London* créa un comité pour décider des publications et éviter que l'on considère ses choix comme arbitraires. Toutefois ce n'est qu'au début du 19e siècle que le premier système de rapporteurs – bien différent de celui de l'*Académie royale des sciences* - fut mis en place par les sociétés scientifiques anglaises (Csiszar, 2016).
En effet, après la publication, en 1830, de *Reflections on the Decline of Science in England*, par le mathématicien et ingénieur Charles Babbage (1791-1871), le physicien William Whewell (1794-1866), à Cambridge, convainquit la *Royal Society of London* de demander des rapports pour les manuscrits soumis pour publication dans les *Philosophical Transactions :* écrits par d'éminents scientifiques, ces rapports pourraient « être souvent plus intéressants que les mémoires eux-mêmes » et « être une source de publicité pour la science » (Whewell, 1831).
A l'époque, la *Royal Society of London* créait les *Proceedings of the Royal Society*, un mensuel moins coûteux que les *Philosophical Transactions*, afin d'inclure des articles présentés à la société, et Whewell était moins préoccupé de « mauvais » manuscrits que de promouvoir les sciences (c'est lui qui introduisit le terme *scientist*). Il se proposa pour écrire le premier rapport avec un de ses anciens étudiants de Cambridge, le mathématicien et astronome John William Lubbock (1803-1865), qui était également trésorier de la *Royal Society*. Ils sélectionnèrent un manuscrit intitulé *On an inequality of Long Period in the Motions of the Earth and Venus*, où l'astronome George Biddell Airy (1801-1892) proposait des méthodes mathématiques pour calculer les orbites de la Terre et de Vénus.
Toutefois Whewell et Lubbock s'opposèrent sur la qualité de l'article : pour Whewell, la question étudiée était essentielle, et les conclusions remarquables ; en revanche, Lubbock critiquait l'exposé mathématique d'Airy, de sorte que le rapport commun fut difficile à préparer. Whewell écrivit à Lubbock : « *Je ne pense pas que le travail des rapporteurs soit de critiquer des parties particulières de l'article ; il s'agit plutôt de montrer sa place* », et il proposait, le cas échéant, d'avertir les auteurs d'erreurs

éventuelles. Lubbock, en revanche, voyait « *mal comment nous pourrions faire abstraction d'erreurs importantes* » .
Airy fut irrité qu'on l'invite à améliorer son texte : « *L'article est ainsi, et j'en prends la responsabilité* », écrivit-il à Whewell. Finalement Lubbock n'accepta de signer le rapport final que parce que c'était le premier du genre (Lubbock, 1832). Ce rapport fut lu publiquement, et imprimé dans les *Proceedings*, tandis que l'article d'Airy paraissait dans les *Transactions*.
Peu après, l'*Astronomical Society of London* et la *Geological Society of London* firent de même. C'est d'ailleurs le géologue George Bellas Greenough (1778-1855) qui introduisit le mot *referee* en 1817, faisant venir en science un terme de droit (Despeaux, 2011) : à l'époque, le mot *referee* désignait un individu à qui l'on se réfère, particulièrement pour une décision ou un jugement.
La pratique des rapports se généralisa en Angleterre et en Écosse. Toutefois, selon le président de la *Royal Society*, Augustus Frederick, le système des rapporteurs ne fonctionnait bien qu'avec des personnes « élevées par leur caractère et leur réputation au-dessus de l'influence des sentiments personnels de concurrence ou de jalousie mesquine » (Despeaux, 2011).
En 1833, les rapports cessèrent d'être publiés : ils devinrent confidentiels et anonymes. Puis, en 1836, Whewell en vint à considérer que les *referees* devaient être des garants de la qualité des publications. Toutefois les refus qui résultèrent des évaluations négatives suscitèrent des critiques, comme le savait bien l'*Académie royale des sciences* : on a même attribué en partie l'exécution d'Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794) à l'animosité qui naquit des critiques portées contre un manuscrit soumis par Jean-Paul Marat (1743-1793). En 1845, un magazine londonien dépeint les referees comme « pleins de jalousie, de haine, de malice, dénués de charité » (Wade, 1845).
En 1892, un mouvement (fondé sur le texte *On the Organisation of Science*) propose de standardiser la sélection et la distribution des articles scientifiques. Puis, au début du 20e siècle, on commence à vouloir généraliser l'idée des éditeurs et des rapporteurs, afin d'éviter « l'épandage d'ordures dans le pur courant de la science » (Foster, 1894).
En 1903, la *Geological Society of London* s'interroge explicitement sur la pratique des rapports, parfois sévèrement critiquée. Le système des rapporteurs est alors surtout pratiqué en Grande Bretagne et en Amérique du nord, où les rapporteurs sont le « pivot de la science » (Ziman, 1968). La pratique différente en Allemagne, par exemple, explique la réaction d'Einstein, qui, jusque là, publiait en allemand dans les *Annalen der Physik*, dont le taux d'acceptation des articles atteignait 95 % (Spicer et Roulet, 2014).
Cependant, dès 1920, on avait observé que le système des rapporteurs, plus complexe que la publication directe sous la responsabilité des auteurs, était un obstacle au progrès scientifique. Certains considérèrent même que l'examen des manuscrits était une pratique désuète, « qui a été utile par le passé, mais qu'il faudrait dépasser » (Csiszar, 2016). Enfin, dès les années 1960, l'expression « communauté scientifique » apparaît, et le « systèmes de rapporteurs » devient « l'examen par les pairs » ou l'« évaluation par les pairs ». En 1973, l'examen par des scientifiques devient la règle pour la revue *Nature* (Baldwin, 2015).
L'apparition d'*Internet* bouleverse le système : en 1991, apparaît un service numérique (*xxx.lanl.gov*) pour partager des « pré-prints » (ou « manuscrits auteur »), c'est-à-dire des manuscrits non examinés : il s'agit notamment d'éviter de retarder la publication de résultats importants (CNRS, 2020). Cette plate-forme sera ultérieurement relocalisée à *arXiv.org* (Université Cornell), et figure au centre des débats relatifs à l'analyse par les rapporteurs (arXiv.org, 2019).
Puis, en 2006, la *Public Library of Science* lance un journal de consultation gratuite, *PLoS ONE*, qui ne veut plus tenir compte de l' « importance » des travaux, à condition qu'ils soient de qualité académique ; les coûts de publication sont alors supportés par les auteurs.
En 2007, l'*EMBO Journal*, les *Frontiers series* et

Table 2. Des erreurs relevées dans les manuscrits scientifiques soumis. Document établi à partir de Davies (1974), Manske (2006), Kamat et al. *(2012), Liumbruno* et al. *(2013), Kamat* et al. *(2014a ; 2014b), Amrhein (2019).*

Principaux défauts :
- une originalité insuffisante (reproduction de travaux antérieurs qui ne sont pas cités et/ou connus des auteurs)
- des expériences mal conduites
- des interprétations mal établies.

Plus en détails, on peut observer, pour l'introduction des manuscrits :
- les phrases ne sont pas toutes étayées par des références ;
- les phrases contiennent des adjectifs et des adverbes, qui sont sources d'imprécision, et auraient gagné à être remplacés par la réponse à la question « Combien ? » ;
- les travaux antérieurs sur le sujet n'ont pas correctement été évoqués ;
- les auteurs n'ont pas présenté des travaux parfaitement originaux.

Pour la section des matériels et des méthodes :
- la description n'est pas assez précise pour que l'expérience présentée puisse être refaite dans les mêmes conditions ;
- les choix des matériels et des méthodes n'ont pas été suffisamment justifiés (par exemple, des réactifs ont une pureté qui n'a pas été contrôlée) ;
- les matériels et les méthodes ne sont pas bien appropriés aux objectifs scientifiques indiqués dans l'introduction ;
- les conditions d'expérimentation (hygrométrie, température...) ne sont pas fournies ;
- les méthodes n'ont pas été validées, soit par les auteurs, soit antérieurement ;
- les expériences n'ont pas été suffisamment reproduites.

Pour les résultats :
- les résultats ne sont pas bien établis ;
- les résultats des mesures ne sont pas assortis d'incertitudes ou d'écarts-types ;
- les chiffres publiés ne sont pas significatifs ;
- les graphiques qui présentent les résultats ne donnent pas clairement les unités des grandeurs représentées ;
- les points de mesure affichés ne sont pas assortis de leur incertitudes ;
- les points de mesure sont reliés par des courbes qui ne correspondent pas à des modélisations théoriques.

Pour les interprétations/discussions :
- les interprétations sont mêlées aux résultats ;
- les résultats ne sont pas bien analysés statistiquement ;
- des validations n'ont pas été faites ou pas été données ;
- les interprétations sont de simples hypothèses évoquées, et non pas des idées étayées par des calculs qui en examinent la plausibilité ;
- les auteurs se limitent à des caractérisations, au lieu de proposer des interprétations en termes mécanistiques ;
- des corrélations sont confondues avec des causalités.

publiant les noms des rapporteurs et les notes de ces derniers.
D'autres innovations apparaissent progressivement, une des plus récentes étant les *Peers Communities In...* (PCI, 2019) : il s'agit de créer des communautés composées de scientifiques d'un même domaine qui lisent des manuscrits déposés dans des « archives numériques » telles que *arXiv.org* ou *bioRxiv.org* et qui les « recommandent » ; le système est gratuit et « transparent », et les rapports et les recommandations -signés- peuvent être consultés.
Surtout les innovations nombreuses qui sont nées de la généralisation des méthodes numériques du traitement de l'information, avec notamment la disparition des tâches de mise en page ou d'impression, ont conduit à estimer que les services des éditeurs privés étaient devenus quasi inutiles, permettant à la communauté scientifique de se structurer pour éviter de dépenser des sommes considérables (Bach et Jérome, 2014 ; PCI, 2019). Ces évolutions sont encouragées par les institutions de recherche, tel l'Inrae pour les champs qui sont ceux des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France* : alimentation, agriculture, environnement.
Plus généralement, et sans être exhaustif (la liste est trop longue), on pourra observer - notamment en lisant les textes qui font l'objet de cette note de lecture - que les propositions évoluent vers un modèle où ni les auteurs ni les lecteurs ne paient plus, avec une transparence de fonctionnement qui reste à améliorer, mais qui va croissant (Klebel *et al.,* 2020). Que les auteurs ne payent plus peut conduire à éviter des conflits d'intérêts signalés précédemment, et que les lecteurs ne paient plus permet une meilleure diffusion des connaissances produites par la science.
Pour mémoire, on donne ici quelques unes des propositions importantes pour comprendre le chantier de la rénovation des publications scientifiques :
- l'*Appel de Jussieu* (Collectif, 2017) : c'est un document émis par un groupe de scientifiques français qui veulent élaborer des modèles nouveaux de publication, appelant à la constitution d'un consortium international d'acteurs pour fédérer les initiatives. Un des objectifs est de basculer rapidement vers le modèle de publication en accès ouvert, sans que le modèle de libre accès ne retarde le processus.
- les plate-formes de l'*Agence nationale de recherche pour l'environnement* (AllEnvi, 2017) : ici, l'objectif est principalement de reconnaître le manuscrit auteur (pré-print) comme une forme recevable de communication scientifique, comme cela est le cas dans certaines communautés (mathématiques, par exemple).
- le blog *Openscience* de l'Inrae (2018): c'est une charte de l'Inrae pour favoriser le libre accès aux publications, avec notamment la mise à disposition des données, dans un objectif de transparence et de preuve en appui aux publications, et aussi en vue de faciliter la réutilisation de données, afin d'accélérer l'innovation.
- le modèle *Episcience* (2020) : il envisage à la fois des publications classiques et des archives ouvertes : l'organisation *Episciences.org* veut combiner deux voies de libre accès, à savoir la voie « dorée », qui comprend l'animation de journaux en accès libre, et la voie « verte », où les articles sont soumis aux publications par dépôt sur une archive ouverte.
- les *Peer Community In...* (PCI, 2020): déjà évoquées, ces communautés sont fondées sur des réseaux de spécialistes, et des *recommenders* qui labellisent notamment des manuscrits ou des textes.

Conclusion

Dans toutes les discussions récentes sur la publication scientifique, un large consensus se dégage en faveur de l'idée selon laquelle les textes publiés doivent être de qualité, ce qui impose évidemment des critères explicites de qualité. Certaines revues en indiquent dans les « conseils aux auteurs » (AAS, 2019 ; Liumbruno *et al.*, 2013). *A contrario*, des défauts à corriger sont répertoriés (Table 2) (Davies, 1974 ; Kamat *et al.*, 2012 ; Kamat *et al.*, 2014a ; Kamat *et al.*, 2014b). Évidemment la liste est

longue, mais la bibliographie réunie par Liumbruno *et al.* (2013) pourra être complétée, notamment avec Manske (2006) ou Amrhein (2019).

Cela étant, et même avec de bons manuscrits, la question de la saturation du système actuel de publication scientifique demeure, ce qui a conduit la communauté scientifique à chercher de nouvelles méthodes de publication. Diverses tentatives ont été faites, par diverses communautés, qui ont en commun de bénéficier des possibilités nouvelles (informatique) et de ne plus supporter des coûts de l'ancien système (considérés comme excessifs), où la gestion des revues était souvent confiée, ou déléguée, à des sociétés privées. Des groupes variés, tels que (en France) l'*Académie des sciences*, l'*Inrae*, le *CNRS* ou l'*Académie d'agriculture de France* (Bach et Jérome, 2016 ; N3AF, 2016 ; Inra, 2016 ; CNRS, 2020) ont discuté des possibilités et préconisé des solutions.

Dans les discussions actuelles, certains continuent de craindre les échanges avec les rapporteurs, et l'importance excessive de ces derniers (Sarabipour, 2019), souvent parce qu'ils continuent de raisonner en termes d' « évaluation », mais la proposition d'examen critique et de conseils aux auteurs, avec l'objectif de publier les textes quand ils ont la qualité suffisante, permet de repousser cette crainte. En outre, la présence de ces analyses critiques conduit certainement certains auteurs à rechercher plus de qualité de leurs manuscrits que s'ils étaient assurés d'une publication immédiate, automatique.

En tout cas, Davies (1974) explicite bien les raisons pour lesquelles le double anonymat (les auteurs ignorent qui sont les rapporteurs et *vice versa*) semble s'imposer, ce qui n'interdit pas que l'anonymat puisse être levé si les rapporteurs l'acceptent. Les membres des comités éditoriaux, d'autre part, doivent mieux identifier les abus des rapporteurs, et arbitrer.

Enfin, si certains ont proposé l'analyse critique ouverte, en supposant que ce serait la meilleure façon d'éviter des commentaires malveillants, de mettre fin au plagiat, d'éviter que les examinateurs s'en tiennent uniquement à leur analyse et d'encourager un examen honnête et ouvert, il a été répondu que l'analyse serait faussée, car la politesse et la peur de représailles peuvent amener les rapporteurs à minimiser leurs critiques.

Les querelles d'antériorité, qui ont été évoquées dans nombre de discussions relatives à l'analyse critique des manuscrits, sont à l'origine des archives ouvertes, mais on observera qu'il existe depuis très longtemps le système des plis cachetés de l'*Académie des sciences* : l'équivalent numérique de ce système suffit à établir les antériorités. De surcroît, de même que les publications demandent aujourd'hui aux rapporteurs d'éviter des conflits d'intérêt qui conduiraient à des analyses critiques excessivement complaisantes (Elsevier, 2019), il n'est pas difficile de proposer que les concurrences soient signalées explicitement (Rodman, 1970). Un tel système aurait de surcroît l'intérêt qu'il amoindrirait la critique parfois faite par les auteurs aux publications, à propos de délais qui les handicaperaient dans la concurrence internationale.

En réalité, l'expérience des comités éditoriaux montre que, souvent, les auteurs réclament des réactions rapides alors qu'ils sont eux-mêmes lents à faire les modifications demandées. D'autre part, l'édition scientifique sait bien que, malgré de nombreuses relectures, des imperfections demeurent dans les textes publiés : c'est une raison de ne pas publier hâtivement, surtout si un système de dépôt de manuscrits est mis en place .

Malgré des innovations, il est sans doute illusoire de croire que l'on pourra éviter totalement la publication de mauvais articles, mais la communauté scientifique a tout intérêt à la plus grande vigilance à propos de l'analyse des manuscrits, et c'est en rendant les comités éditoriaux plus actifs que l'on a des chances de parvenir à une amélioration du système. Cette amélioration semble passer par une meilleure reconnaissance du travail des rapporteurs.

Finalement on voit que nos communautés scientifiques ont tout à gagner à bien utiliser les méthodes numériques pour faire évoluer

les publications scientifiques. Le travail d'analyse critique et de conseils donnés aux auteurs, effectué en double anonymat, à partir de manuscrits déposés officiellement, s'impose plus que jamais, et des financements récupérés sur des abonnements coûteux gagneraient à être dirigés vers la mise au point de méthodes rénovées pour que ces analyses soient faites dans de meilleures conditions, allégeant le travail de rapporteurs qui doivent être mieux reconnus des institutions de recherche.

Références

AAS. 2019. *Instructions for preparing an initial manuscript,* https://www.sciencemag.org/authors/instructions-preparing-initial-manuscript, dernier accès 2019-12-03.

Académie des sciences. 2011. *Du bon usage de la bibliométrie pour l'évaluation individuelle des chercheurs*, Rapport de l'Académie des sciences. https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/du-bon-usage-de-la-bibliometrie-pour-l-evaluation-individuelle-des-chercheurs.html, dernier accès 2019-12-11.

Ajlouni KM, Al-Khalidi U. 1997. Medical records, patient outcome, and peer review in eleventh-century Arab medicine*, Annals of Saudi Medicine*, 17, 326–327.

Al Kawi MZ. 1997. History of medical records and peer review, *Annals of Saudi Medicine,* 17, 277–278.

Amrhein V, Greenland S, McShane B. 2019. *Scientists rise up against statistical significance, Nature*, 20 March 2019, 567, 305-307.

arXiv.org. 2019. https://arxiv.org/, dernier accès 2019-12-08.

Alliance nationale de recherche pour l'environnement. 2017. https://www.allenvi.fr/actualites/2017/preprints-communication-scientifique-recevable, dernier accès 2020-03-07.

Athanasiadou A. 2007. Before and after : relations of anteriority and posteriority along 'paths' of conceptual structure, *Annual Review of Cognitive Linguistics,* 5(1), 1-26.

Bach JF, Jérome D (eds.). 2014. *Les nouveaux enjeux de l'édition scientifique*, Académie des sciences, https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rads_241014.pdf, dernier accès 2019-12-08.

Bacon F. 1620. *Novum organum*, https://www.constitution.org/bacon/nov_org.htm, dernier accès 2019-12-04.

Baldwin M. 2015. *Making Nature: The History of a Scientific Journal*, University of Chicago Press, Chicago, USA.

Boas Hall M. 1965. Oldenburg and the art of scientific communication, *The British Journal for the History of Science,* 2 (8), 277-290.

Chabot H. 2017, *L'Origine des institutions scientifiques*, EA 4148,S2HEP, Université Lyon 1, https://urlz.fr/c1B3, dernier accès 2020-03-07.

CNRS. 2020. *Glossaire du libre accès à l'information scientifique et technique*, http://openaccess.inist.fr/spip.php?page=glossaire, dernier accès 2020-01-11.

Cocheris H. 1860. *Histoire du journal des savants depuis sa fondation jusqu'à nos jours*, A. Durand, Paris.

Cokol M, Ozbay F, Rodriguez-Esteban R. 2008. Retraction rates are on the rise, *EMBO Reports*, 9(1), 2.

Collectif. 2017. *Appel de Jussieu pour la science ouverte et la bibliodiversité*, https://jussieucall.org/#call, dernier accès 2020-01-10.

Csiszar A. 2016. Troubled from the start, *Nature*, 532, 21 avril 2016, 306-308.

Davies D. 1974. Editorial: In defence of the anonymous referee, *Nature*, 249, 601.

Despeaux SE. 2011. Fit to print ? Referee reports on mathematics for the nineteenth-century journals of the Royal Society of London, *Notes and Records : the Royal Society Journal*, 65, 233-252.

Elsevier. 2019. *Conflict of interest guidelines for reviewers*. https://www.journals.elsevier.com/journal-of-systems-and-software/policies/conflict-of-interest-guidelines-for-reviewers, dernier accès 2019-12-04.

Episcience. 2020. Overlay *Journal Platform*, https://www.episciences.org/, dernier accès 2020-03-07.

Foster M. 1894. On the organisation of science, The International Medical Congress. *Nature*, 49, 563–567, doi:10.1038/049563a0.

Galilée. 1640. *Lettre à Liceti,* http://homepages.ulb.ac.be/~pmarage/HIST-F-101_notes.pdf, dernier accès 2019-12-06.

Greenough G. 1817. *George Greenough Papers;* University College London [Add. 7918/1621], https://www.ucl.ac.uk/library/special-collections/a-z/greenough, dernier accès 2019-12-06.

Inra. 2016. *Le libre accès à l'Inra.* https://ist.inra.fr/le-libre-acces-a-linra/, dernier acccès 2020-03-07.

Kamat PV, Buriak JM, Schatz GC, Weiss PS. 2014a. Mastering the art of scientific publication, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 5, 20, 3519-3521.

Kamat PV, Prezhdo O, Shea JE, Scholes G, Zaera F, Zwier T. 2014b. Why did you accept my paper, *Journal of Physical Chemistry Letters,* 5, 14, 2443.

Kamat PV, Schatz G. 2012. Getting your submission right and avoiding rejection, *The Journal of Physical Chemistry Letters,* 3, 21, 3088-3089.

Kennefick D. 2005. Einstein versus the Physical Review, *Physics Today,* 59, 9, 43-48, doi: 10.1063/1.2117822.

Klebel T, Reichmann S, Polka J, McDowell G, Penfold N, Hindle S, Ross-Hellauer T. 2020. Peer review and preprint policies are unclear at most major journals, *bioRxiv preprint*, doi: http://dx.doi.org/10.1101/2020.01.24.918995, last access 2020-02-10.

Krief A, Hopf H, Mehta G, Matlin SA. 2018. Repositionnement des sciences chimiques en vue de créer un avenir durable, *Chimie nouvelle,* 127 (1), 1-11.

Liumbruno GM, Velati C, Pasqualetti P, Franchini M. 2013. How to write a scientific manuscript for publication, *Blood Transfus,* 11(2), 217-226.

Lubbock JM. 1832. *J. W. Lubbock to W. Whewell, 27 January 1832*, Trinity College Library, Cambridge [a/216/61].

MacDonald F. 2016. 8 scientific papers that were rejected before going to win a Nobel Prize, *Science Alert*, 19 August 2016, https://www.sciencealert.com/these-8-papers-were-rejected-before-going-on-to-win-the-nobel-prize, dernier accès 2019-01-11.

Mafarette-Dayries P. 2000. *L'Académie royale des sciences et les grandes commissions d'enquête et d'expertise à la fin de l'Ancien Régime*. In *Annales historiques de la Révolution française*, 320, 121-135. doi : https://doi.org/10.3406/ahrf.2000.2318.

Manske PR. 2006. Structure and format of peer-reviewed scientific manuscripts, *Journal of Hand Surgery,* 31, 1051-1055.

Matosin N, Franck E, Engel M, Lum J, Newell

KA. 2014. Negativity towards negative results : a discussion of the disconnect between scientific worth and scientific culture, D*isease Models & Mechanisms,* 7, 171-173.

Naegelen P. 2016. *Evaluation par les pairs, entre pratiques, expérimentations et controverses*, https://openarchiv.hypotheses. org/3528, dernier accès 2020-01-10.

Negative Results. 2019. http://www.negative-results.org/, dernier accès 2019-12-05.

N3AF. 2016. Notes aux auteurs, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France*, https://www.academie-agriculture.fr/publications/les-academiciens-ecrivent/n3af/presentation-des-n3af-instructions-aux-auteurs-16, dernier accès 2020-01-10.

Openscience. 2018. #INRA2025#OPENSCIENCE http://2025.inra.fr/openscience/OpenScience-4 et http://institut.inra.fr/Recherches-resultats/Strategie/Toutes-les-actualites/OpenScience-Ouvrir-les-donnees-et-publier-autrement, dernier accès 2020-03-07.

PCI. 2019. *Peer community in…*, https://peercommunityin.org/, dernier accès 2019-12-09.

Rémond M. 2015. *Le Journal des sçavans, Conserver, enseigner, chercher,* https://tresoramu.hypotheses.org/462, dernier accès 2019-12-04.

Rodman H. 1970. The moral responsability of journal editors and referrees, *The American sociologist,* 3 (11), 331-337.

Sarabipour S, Debat HJ, Emmott E, Burgess SJ, Schwessinger B, Hensel Z. 2019. On the value of preprints: An early career researcher perspective. *PLoS Biol,* 17(2): e3000151.

Seguin MS. 2012. *Fontenelle et l'Histoire de l'Académie royale des sciences*. In *Dix-huitième siècle*, 1(44), 365-379. https://www.cairn.info/revue-dix-huitieme-siecle-2012-1-page-365.htm#, dernier accès 2019-12-04.

Spicer A, Roulet T. 2014. Hate the peer-review process ? Einstein did too, *The Conversation*, https://theconversation.com/hate-the-peer-review-process-einstein-did-too-27405, dernier accès 2019-12-08.

Spier R. 2002. The history of the peer-review process, *Trends in Biotechnology*, 20(8), 357.

Stern BM, O'Shea EK. 2019. A proposal for the future of scientific publishing in the life sciences, *PLoS Biol,* 17(2), e3000116.

Taussig S. 2010. *Marin Mersenne, moine mathématicien et philosophe*, Bibnum, Sciences humaines et sociales, http://journals.openedition.org/bibnum/739, last access 2019-12-02.

This H. 2016. Créons des revues scientifiques libres et gratuites, *La Lettre de l'Académie d'agriculture de France*, 36, 1er déc., 10-11.

TLFi. 2019a. *Pairs*, http://atilf.atilf.fr/, dernier accès 2019-12-06.

TLFi. 2019b. *Revue*, http://atilf.atilf.fr/, dernier accès 2019-12-06.

Vesper I. 2018. Peer reviewers unmasked : largest global survey reveals trends, *Nature*, https://www.nature.com/articles/d41586-018-06602-y, dernier accès 2019-12-06.

Wade's London Review. 1845. *Wade's London Rev*, 1, 351–369.

Weber-Wulff D. 2019. Plagiarism detectors are a crutch, and a problem, *Nature*, 567, 28 March 2019, 425.

Whewell W. 1831. W. *Whewell to P. M. Roget, 22 March 183*, Royal Society of London Library [DM/1].

Woolston C. 2016. *Faking it, Nature*, 529, 555-557, doi:10.1038/nj7587-555a.

Ziman J. 1968. *Public Knowledge: An Essay Concerning the Social Dimension of Science,* Cambridge University Press, Cambridge.

Edité par
Nadine Vivier, présidente de l'Académie d'agriculture de France.

Rapporteurs

Claude Debru est philosophe des sciences, professeur émérite à l'*Ecole normale supérieure*, membre de l'*Académie des sciences*, et membre de l'*Académie d'agriculture de France*.

Alain Pavé, biométricien, professeur émérite à l'Université Claude Bernard Lyon 1, membre de l'Académie des technologies et membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

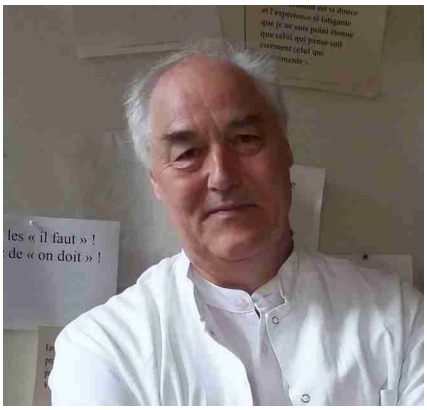
Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Notes de lecture » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
9 décembre 2019

Accepté
6 mars 2020

Publié
16 mars 2020

Citation
This H. 2020. L'analyse critique des manuscrits et les conseils d'amélioration donnés aux auteurs, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)*, 9(2), 1-14.
https://doi.org/10.58630/pubac.not.a582827.



Hervé This est physico-chimiste dans l'UMR 0782 SayFood, directeur de l'Inrae-AgroParisTech International Centre for Molecular and Physical Gastronomy, professeur consultant à AgroParisTech, membre de l'Académie d'agriculture de France, membre correspondant de l'Académie royale des sciences, arts et lettres de Belgique et de l'Académie de Stanislas, membre de l'Académie d'Alsace, sciences, lettres et arts.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France
Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF)
Note de conjoncture

Biofuels in the nexus energy-environment-food

Paul Colonna [1*], Jean-Luc Duplan[2], Jack Legrand[3], Elisabeth Lenet[4], Guillaume Boissonnet[5], Daphné Lorne[2]

[1] *INRAE, France.*
[2] *IFP Energies nouvelles (France)*
[3] *GEPEA - UMR 6144 CNRS/Université de Nantes/IMT Atlantique/ONIRIS*
[4] *Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé) Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives & Université de Paris Saclay (France)*
[5] *Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (France)*

Correspondance:
INRAE. Centre Pays de la Loire. 3 rue Yvette Cauchois. La Géraudière CS 71627. 44316 Nantes Cedex 03 (France)
E-mail: paul.colonna@inrae.fr

Résumé

La production de biocarburants à partir de ressources biologiques a fait l'objet de nombreuses controverses. Leur opportunité mérite d'être revisitée pour la maturité technologique et évaluer leur pertinence en réponse aux préoccupations environnementales actuelles. Les innovations dans les procédés biotechnologiques et chimiques permettent une large gamme de biocarburants liquides et gazeux; leurs caractéristiques concernent le contenu énergétique, la compatibilité avec les carburants fossiles, l'ouverture vers des usages strictement chimiques. Les facteurs d'évolution de ce marché technologique sont l'implantation de politiques publiques foisonnantes, l'évolution des pratiques agronomiques, la préoccupation de séquestration du carbone dans les sols, les attentes du secteur aéronautique avec les biokérosènes, et les comportements des consommateurs. A partir des plantes de grande culture et des forêts, les matières premières mobilisables se sont élargies aux microalgues, aux déchets animaux et végétaux. Les biocarburants s'inscrivent alors dans la bioéconomie territoriale et l'économie circulaire. Les chaines de valeur sont plus complexes que celles anciennes centrées sur le biodiesel à base d'oléagineux et de saccharose de betterave, de canne ou d'amidon de blé ou de maïs. L'intégration des acteurs économiques et le dimensionnement des marchés ont fait l'objet de travaux de prospective aux échelles internationales et francaises. La durabilité environnementale est avérée globalement avec toutefois des réserves pour certaines sources

(soja, palmier à huile). Les biocarburants s'insérent dans un nexus alimentation-énergie-environnement. Les politiques publiques, si elles se fondent sur la durabilité et l'acceptabilité sociale des biotechnologies, orienteront aussi les choix des seuls intérêts économiques. Cet article aborde les travaux de recherche et développement nécessaires pour inscrire durablement les biocarburants dans les politiques énergétiques.

Abstract
The production of biofuels from biological resources has been the subject of much controversy. Their opportunity update deserves to be revisited for technological maturity and assess their relevance in response to current environmental concerns.
Innovations in biotechnological and chemical processes allow a wide range of liquid and gaseous biofuels; their characteristics concern energy content, compatibility with fossil fuels and openness towards strictly chemical uses.
The factors driving this technological market's evolution are the implementation of abundant public policies, the evolution of agronomic practices, the concern for carbon sequestration in soils, the expectations of the aeronautical sector with biokerosenes, and consumer behaviours. From field crops and forests, the mobilizable raw materials have been extended to microalgae, animal, households and plant wastes. Biofuels are then part of the territorial bio-economy and the circular economy. Value chains are more complex than those traditionally focused on biodiesel based on oilseeds and sucrose from beet, cane or starch from wheat or maize. The integration of economic actors and the scaling of markets have been the subject of foresight work at international and French levels. Environmental sustainability is generally proven, with reservations for some sources (soya, oil palm). Biofuels are part of a food-energy-environment nexus. Public policies, if based on the sustainability and social acceptability of biotechnology, will also guide the choices of economic interests alone. This article discusses the research and development work needed to make biofuels a sustainable part of energy policy.

Mots clés
biocarburants, biomasse, technologie, réglements, durabilité

Keywords
biofuels, biomass, technology, regulation, sustainability

Introduction

The ongoing energy transition implies necessary structural modifications of production and consumption of energy. Bioenergy, encompassing all biomass and renewable wastes, is currently the main renewable energy source, accounting for 63.8 % of renewable energy consumption in the European Union (EU) and 66.1 % in France.
A particular feature of the bioenergy market in the EU28 (before the Brexit) is that it is based principally (96 %) on European resources. For import-export of wood fuels from non-EU-countries, EU28 is a net importer: these imports account for just around 4.2 % of the total wood fuel production (Eurostat, 2016). In contrast EU28 imports 8.1 % of liquid biofuels. France imports 22.9 % of liquids biofuels and 0.3 % of solid biofuels. This reflects the importation of oilseeds, driven by animal feed. Whereas EU28 is a net exporter of grains and sucrose, with both high exports and low imports, EU imports represent about half of the oilseed used in animal feed annually. Crushing the oilseeds provides vegetables oils and meal. Vegetable oil is generally used in the food industry or to produce biodiesel, while oilseed meals are an important component of animal feed.
Despite the rapid growth of other renewable resources like wind and photovoltaic, bioenergy is expected to remain the main renewable energy source for decades to come. Its outstanding

Table 1. Importance of petroleum products and biofuels for transportation. Liquid petroleum gas (LPG, butane and propane); Compressed natural gas (CNG) and Liquid natural gas (LNG, methane and ethane), the last two encompassing the former GNV (in French, "gas naturel pour vehicule").

Final Consumption	Gas and Petroleum products	Diesel	Gasoline	LPG and CNG	Biofuels	Biodiesel	Biogasoline	Biogas CNG and GNV
EU28	14,063	8 ,385	3,243	498	579-631	475	112	5.6 – 6.3
France	1,930	1,352	288	4	127-138	108	18.7	0.014

versatility (heat, electricity, fuel), far above other renewable energy sources, questions us about its use for fuel. In the near future 2030, four main sources (BioEnergy Europe, 2020; Kluts *et al.*, 2017) have to be considered: energy crops ranging from 3.3 to 15.8 exajoules (10^{18} J, EJ) agricultural residues from 1.9 to 2.8 EJ, forest biomass from 0.2 EJ to 7.3 EJ and wastes from 1.7 to 5 EJ. However, each country has its own energy policy and package of bioresources. Ensuring the viability of a sovereign energy supply then leads each country to focus on its specific national resources; they differ considerably from one country to another.

Fuel operators are facing radical breaks related to:

- the markets now subject to the pressure of externalities for the climate challenge and local pollutions (NOx and fine particle emissions from exhaust gas),
- a multiplicity of emerging technological solutions, some being biomass-based ;
- the need to integrate any biomass-based solution in local territorial policies integrating the different stages of the value chains,
- the regulatory status of CO_2 according to its origin biogenic or fossil-based processes.

In the future, biofuels should increase their contribution to transportation fuels. The World Energy Outlook (WEO) provides a way of exploring different possible futures, the levers that could bring them about, and the interactions that arise across a complex energy system. Using the World Energy Model, the International Energy Agency (World Energy Outlook, 2018) describes a sustainable development scenario (SDS), in which accelerated clean energy transitions put the world on track to achieve the long-term objectives of the Paris Agreement.

Meeting the SDS goals would require greater use of biofuels (from 3.45 EJ up to 10.51 EJ in 2030) in more countries and also for shipping and aviation (12 % share of biofuels). This will be driven by cost reductions of advanced biofuels, widespread sustainability governance and more adoption in aviation and marine transport. Most of the output growth is expected to come from Latin America and non-OECD Asian countries. The consequence is that any process must be able to cope with a large range of biomass.

Biofuels, diesel and gasoline represent an important topic of bioeconomy (Colonna and Valceschini, 2017). Biobased liquefied petroleum gas are neglictable at the european scale and in France. Data quoted in this article come from different sources (2016 and 2017) : ADEME ; Bioenergy Europe; Commissariat général au développement durable, Connaissance des énergies; International Energy Agency; International Renewable Energy Agency; DG Energy EU; Eurostat; USDA Foreign Agriculture Service, Global Agricultural Information Network)

The research domain of biofuels (gasoline,

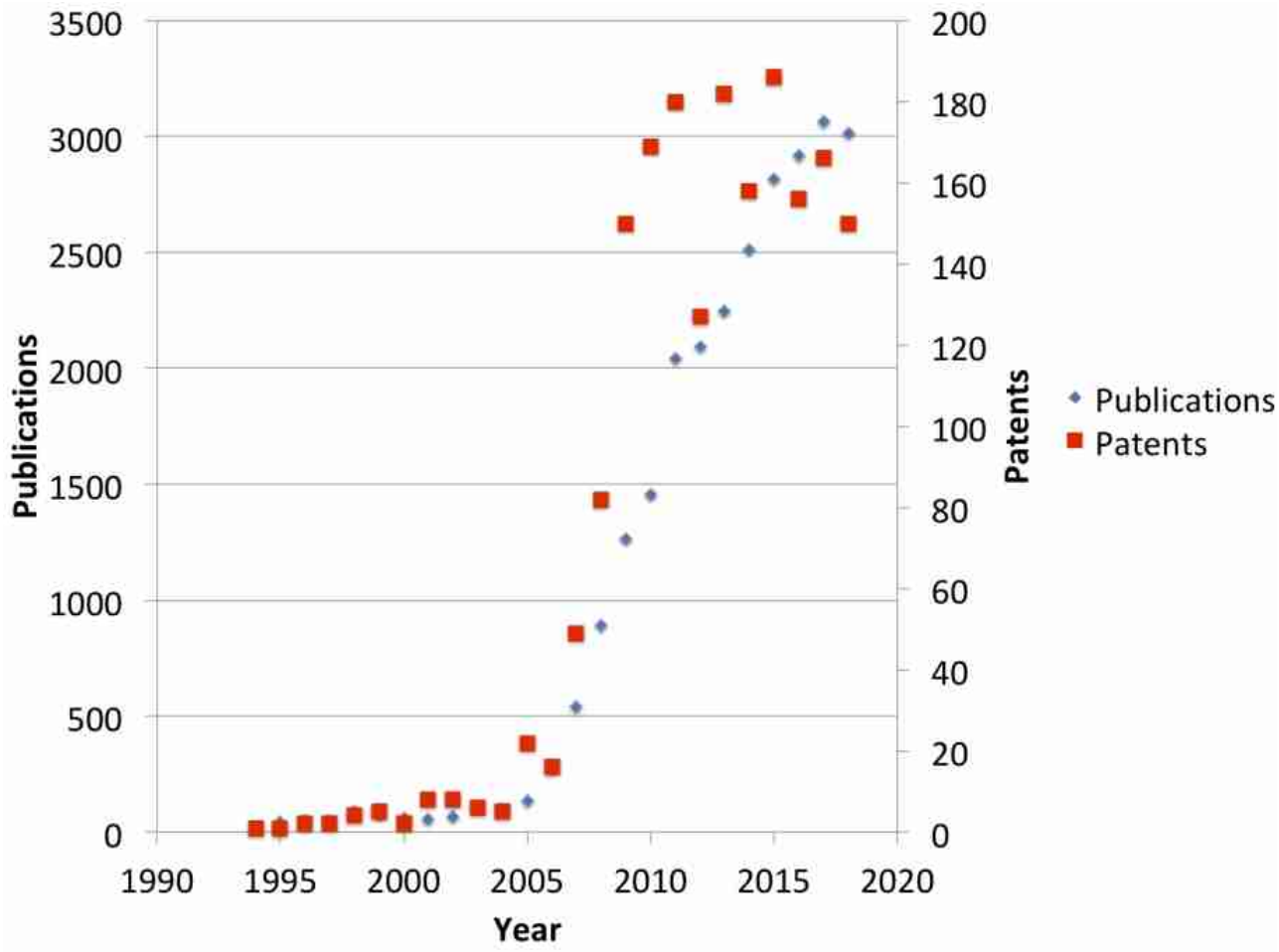


Figure 1. Evolution of publications, according to the Web of knowledge *(keyword "biofuel not cell"), and of patenting (European Patent Office, 2020) from 1994 to 2018.*

diesel and jet fuel) is very active. 672 patents and 25,912 publications can be retrieved from European Patent Office and WOS databases respectively from 1984 to 2018 (Figure 1). Six disciplines from the WOS are mobilized with decreasing contributions of science categories: Energy Fuels, Biotechnology applied microbiology, Chemical Engineering, Environmental Sciences Ecology, Agriculture Engineering and Agriculture and finally Environmental studies.

Any analysis on fuels must take into account the heat engines that will ultimately use biofuels: a co-optimization of fuels, engines and distribution infrastructure is necessary (Figure 2). The starting premise is that no revolution of heat engines requiring a new fuel type is expected before 2050. No foresight publication has been devoted to the future shares of diesel-powered vehicles and gazoline-powered vehicles in the transport sector. ADEME *et al.* (2019) project petrol and diesel consumption for 2030: petrol/diesel ratio (21.5 % - 25.1 % / 74.9 - 78.5 %) increases compared to the situation in 2018 (14.8 % / 85.2 %). So none of the two biofuel technology pathways, diesel or gazoline, has to be preferred.

With regard to fossil fuels, biofuels, either gasoline or diesel, are alternative fuels substituable and compatible with a particular conventional (typically petroleum-derived) fuel. A perfect drop-in fuel does not

Table 2. Definition of conventional and advanced biofuels (from Renewable Energy Directive II, 2018).

Type of biofuel	Source
Conventional biofuels	Sucrose, starch, lipid directly extracted from a plant. The crop is actually or potentially considered to be in competition with food or feed.
Advanced biofuels Part A	• Algae when cultivated on land in ponds or photobioreactors • Biomass fraction of mixed municipal waste • Biowaste from private households subject to separate collection • Biomass fraction of industrial waste not fit for use in the food or feed chain (include waste starch) • Straw, corn cobs • Nut shells • Animal manure and sewage sludge • Palm oil mill effluent and empty palm fruit bunches • Purpose-grown non-food lignocellulosic feedstocks (e.g. Short Rotation Coppice, Energy Grasses) • Crude glycerin • Bagasse • Grape marcs and wine lees
Advanced biofuels Part B : contribution may be limited and may be considered to be twice their energy content.	• Used cooking oil • Some categories of animal fats

require adaptation of the fuel distribution network or the vehicle or equipment engine fuel systems, and can be used “as is” in vehicles and engines that currently operate on that particular fuel. Biojets and other synthetic diesels fulfill these requirements. Some alternative fuels (ethanol, fatty acid methyl ester) have a limited incoporation rate in conventionnal engines (due to material compatibility issue) and need specific vehcile adpatation to be used at high content. The blending wall for ethanol has been upgraded from 15 % to 85 %. Butanol could also bring positive perspectives with high value of blending wall (Liu *et al*., 2019).

Three classes of biofuels are defined on the origin of biomass in the European regulation (Table 2). European governmental bodies use this typology, well detailed in the current Renewable Energy Directive, and is by now used at national level .

In the U.S.A., another classification prevails, bringing confusion when comparing USA and EU28 policies. The Renewable Fuel Standard (RFS) program was created under the Energy Policy Act of 2005 (EPAct), which amended the Clean Air Act (CAA). The Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA) further amended the CAA by expanding the RFS program. EPA implements the program in consultation with U.S. Department of Agriculture and the Department of Energy.

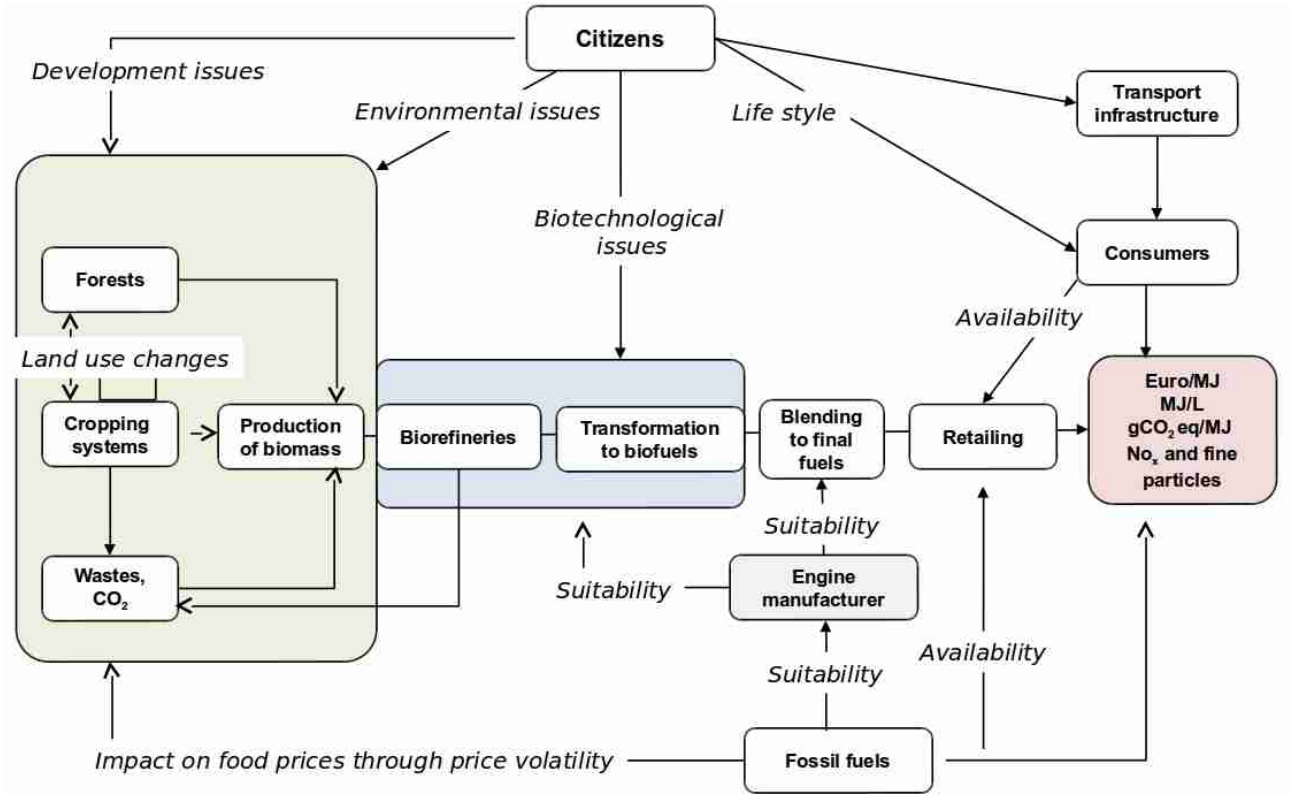


Figure 2. Stakeholders involved in the biofuel system.

The RFS program is a national policy that requires a certain volume of renewable fuel to replace or reduce the quantity of petroleum-based transportation fuel, heating oil or jet fuel. The four renewable fuel categories under the RFS are:
- biomass-based diesel must meet a 50 % lifecycle GHG (greenhouse gas) reduction,
- cellulosic biofuel must meet a 60 % lifecycle GHG reduction,
- advanced biofuel can be produced from qualifying renewable biomass (except corn starch) and must meet a 50 % GHG reduction,
- renewable (or conventional) fuel typically refers to ethanol derived from corn starch and must meet a 20 % lifecycle GHG reduction threshold.

Biofuel facilities (domestic and foreign) that were producing fuel prior to enactment of EISA in 2007 are “grandfathered” under the statute, meaning these facilities are not required to meet the GHG reductions.

This article deals with the current situation and discuss the required contribution of research for biofuels and stakeholders involved (Figure 2). This article is restricted to EU28 and France when considering economics and regulations.

Whereas conventionnal biofuels are technologically mature (Colonna, 2006), most biofuels produced from lignocellulosic biomass have reached high levels (8-9) of technological readiness (TRL) whereas processess based upon microalgae are still matter of research and development (TRL 3-4). Their developments are framed in a bunch of policies and regulatory frameworks that raise questions. Four issues have to be considered in a market-oriented approach:
- technological feasability: what are the technological bottlenecks ?
- competitiveness: how to reduce production cost? And who is able to pay the extra cost ?
- environmental suitability: what are the environnemental issues to consider in order to have biofuels more environnementall friendly

Table 3. Surfaces (in units of 1000 ha) devoted to agricultural and forestry production in EU28 (DG Agriculture and Rural Development of the European Commission, 2016; 2018) and metropolitan France (Agreste 2017-2018).

Production	EU28	France
Agriculture	179 000	28,697
Cereals	57.8	9,320
- Wheat	22,618	4,900
- Maize	8,460	1,436
Sugar beet	1,680	486
Oilseeds	11,429	2,357
Rapeseed	6,299	1,400
Sunflower	3,769	590
Soja	354	142
Forests	182,000	16,933
Commercialized wood fuels	106,707 (1000 m^3)	25,859 (1000 m^3)
Commercialized round woods	461,236 (1000 m^3)	50,791 (1000 m^3)
Commercialized industrial woods	354,529 (1000 m^3)	25,112 (1000 m^3)
Permanent grasslands	57,000	9,811
Temporary grasslands	9,700	2,884
Other feed crops	9,000	1,672
- Including corn silage	5,000	1,440

than fossil ones? how to be in line with public policies?
- availability and scale: beyond the types of biomasses suited for these technologies, what could be the lands to mobilize (Table 3), the way for waste collection, and thereby the targets?

Biofuels from mature technologies

Among technologies currently used for the road transport market in the world, we mainly find conventionnal biofuels (Figure 3) made by combination of sugars, starch and vegetable oils from food crops using standard processing technologies (Colonna, 2006; Ballerini, 2011). For about last five years, these mature technologies used more and more industrial residues like used cooking oil, animal fats, raw alcohol, etc.

Current biofuels for diesel engine

Two biofuel technologies are currently used for diesel engine (Table 4). The first to be developped is fatty acid methyl ester (FAME; lower heating value LHV 37.1 MJ/kg), produced after transesterification of triglycerides. Today around 180 FAME plants are operating in EU28.
More recently a second technology is used to produced a diesel substitute called hydrotreated vegetable oil (HOV). It appeared commercially, with production (12 biorefineries) in Spain (run by the company *CEPSA*), Finland (*UPM*) and Netherlands (*Neste Oils*) and an ongoing starting plant in France. HVO, referred also as hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA), are produced via hydroprocessing of oils and fats. HVO are linear chain paraffinic hydrocarbons that are free of aromatics, oxygen and sulfur, and have high cetane numbers.

Table 4. Final energy consumption of energy (EJ/year), transport fuels (EJ) and biofuels (EJ) for World, EU28 and France (Eurostat Energy Statistics, 2019).

Type	World	EU28	France
Final Energy Consumption of Energy	343	66.4	6.0
Transport Fuels	82.1	14.1	1.90 - 1.93
Biofuels	2.9	0.587 – 0.631	0.123

Synthetic diesel produced by HVO offers a number of benefits over FAME, such as reduced nitrogen oxides emission, better storage stability, and better cold flow properties. Hence HVO can typically be used in all diesel engines. Furthermore the technology co-produced synthetic kerosene or bio-jetfuel already approved to be used in aviation sector and, to a lesser extent, a synthetic gasoline

However this process is not stand-alone: it needs the availability of hydrogen, commonly produced by steam methane reforming in refinery but also by water electrolysis or either by biomass gasification.

Demand for HVO is expected to grow because of the “drop-in” properties of these fuels: they can potentially be used unblended without modifications to engines.

In Europe, rapeseed oil remains the predominant feedstock (6,145 kt) for biodiesel market, in 2017, far above palm oil (2.452 kt) and soybean (700 kt). Almost one third of biodiesel consumption came from non food-based biomass like used cooking oil (UCO, 2,843 kt), animal fats (795 kt), and others (558 kt; tall oils, pine oil, fatty acids) (USDA, 2018; EU Biofuels Annual, 2018).

Current biofuels for gasoline engine

All over the world the main biofuel used as gasoline substitute is bioethanol (29.7 MJ/kg) (Tables 1 and 4). In the European Union, bioethanol is blended in gasoline up to 5 % vol in all conventionnal gasoline fuels and up to 10 % vol. in the SP95-E10 fuel, suitable for a vast majority of gasoline vehicles. It can also be used as superethanol (up to 85 % vol. bioethanol blending) in specific flexfuel vehicles and in gasoline vehicles with E85 conversion switchbox. Main feedstock for bioethanol production in EU are cereals (wheat, corn) and sugarbeet. Raw alcohol is also used in wine-producing countries. Today around 55 ethanol plants are operating in EU28.

In France and a few other European countries, a little part of synthetic gasoline produced from HVO plants is also blended to conventionnal gasoline. This part is probably going to grow with the evolution of HVO market. An important feature of crop-based biofuels, except sugarcane based one, is the link with the production of feeds as by-products. Rapeseed contains 41.5 % of oil and 54.5 % of meal (de-oiled cake). 34 % of cereals are converted to distillers dried grains (DDG) in the production of ethanol. For starch plants, the co-products generated depend on the type of grinding used: dry grinding (dry milling) leads to gluten whereas or grinding with wet milling water leads to DDGS (distiller's dried grain with solubles). As EU is importing soja (~ 33 MT/year), the European sourcing of gluten, DDGS and oilcake reduce this trade deficit.

Current situation of market

In EU28, for 2016, the final consumption of (biodiesel + HVO) and ethanol represent respectively 475 PJ (petajoule, 1 PJ = 10^{15} J) and 112 PJ. 92.2 % of these biofuels are considered sustainable. So far to date, no significant incorporation of biofuels takes place in air or sea transport. The low share of ethanol comparatively to biodiesel differs from the nine main countries outside EU28 (USA, Canada, China, Russia, India, Turkey, Norway, India, Japan) where ethanol represents the major biofuel (609 EJ) comparatively to biodiesel (97 EJ).

Domestic production and consumption of ethanol

are well-balanced. For the EU, four major sources of diesel are rapeseed oil (51 %), imported palm oil (20 %), used cooking oil (UCO, 20 %) and animal fats (9 %). Waste-based biodiesel reinforces the industry's efforts to use different raw materials and contribute to the circular economy.

In France, final consumption of biofuels represent 6.3 % of transport fuels (1 930 PJ), with biodiesel (124 PJ) and ethanol (18 PJ). 100 % of these biofuels are considered sustainable. Ethanol is produced from maize (27.1 %), sugar beet (25.9 %) and wheat (40.0 %), 95 % from France, the remaining from Europe.

Whereas ethanol is always obtained from European raw stocks, biodiesel relies on importations. In France, biodiesels come from rapeseed (82.9 %; 49.9 % is of French origin. 29 countries providing the rest) and palm oil (13.7 %).

For each feedstock, it is not possible to distinguish where and when land is dedicated to biofuel production vs food or other industrial purposes.

Assuming the business-as-usual yields, for 2016, European biofuels productions have required about 0.795 Mha and 3.704 Mha for ethanol and biodiesel respectively, in a total agricultural area of 186.6 Mha. But it is important to keep in mind the different EU28 land-use shares of EU arable land: 22.6, 1.68 and 11.4 Mha for wheat, sugar beet, oil seeds (rapeseed, sunflower and soja) respectively (Table 3).

In France, different incentives for the consumption of biofuels have been introduced. On the diesel side, the exemption of the internal tax on fuels has been extended to pure vegetable oils (HVP). It also promotes the use of diesel fuel B30, containing 30 % biodiesel, since 2007. On the gazoline side, the E85 superethanol, composed of at least 65 % of biofuel (ethanol) and at least 15 % of premium fuel, is suited for vehicles with "flex fuel". Since its launch, the superethanol is about 20 % cheaper than the SP95 unleaded super) and the purchase of the vehicle is easier (ease of payment, reduction or exemption of the tax additional amount related to the registration certificate). The introduction of the bonus-malus system to reward the buyers of new cars emitting the least CO_2 also favors the purchase of flexible fuel vehicles.

The bottleneck of food-based or conventionnal biofuels is the food vs fuel dilemma regarding the risk of diverting farmland or crops for biofuels production to the detriment of food supply. The biofuel and food price debate involves wide-ranging views, and is a long-standing, controversial one in the literature. The own price elasticities of supply equations in the long-term are the key variables to estimate the impact of an increase of biofuel production on agricultural commodity price adjustments (Koizumi, 2015). Nowadays the controversies are less important, conventionnal biofuels being considered as one of the ways to develop agriculture (Kuchler and Linnér, 2012). The impact of biofuel (bioethanol, biodiesel) prices on food prices is statistically significant but explains less than 2 % of the food price variance (Taghizadeh-Hesary *et al.*, 2019).

Lignocellulosic biofuels: technological foresight

If the previous parts describe mature biofuel technologies able to convert conventionnal (food-based) and advanced (industrial residues) biomass, this paragraph deals with technologies under-development able to convert a large range of advanced biomass like lignocellulose (Figure 3). The low LHV of lignocellulosic biomass prevent its direct use for transportation. In contrast heat engines are suited when located in fixed station inside or near a biorefinery (Priou *et al.*, 2014). So main processes aim to convert biomass into liquid and gaseous biofuels.

Methane (Natural Gas for Vehicule, NGV)

Anaerobic fermentation of biomass leads to the production of blends of CO_2 and methane (LHV 50 MJ/Kg). In addition, the overall carbon yield is low because the efficient uses of the digestates are not mature. Today methanisation biogas is more suitable for less demanding uses than

drop'in biofuels (heating, in particular, or well-maintained captive fleets)).
The originality is to use energy crops (mainly in Germany) and wastes, which can be non-hazardous biowaste (from agriculture, industry, household waste, etc.), plant-based materials and mud from waste water treatment plants (WWTP). Methanisation of agricultural wastes is a proven strategy to reduce methane (CH_4) emissions from livestock manure while still allowing nutrients to be recovered and used as fertiliser. Methanization of microalgae is another solution proposed for the long-term.
In France, methanization has developed more recently, and has intentionally favored the use of biowastes, including manure. The use of agricultural residues such as manure is particularly important in countries such as Denmark, France and Italy. This underlying coupling between animal farming and biogas provide a profitable manure management solution and production of digestate, a fertilizing material that can be used instead of traditional fertilizers.
Other biomethane production processes are being tested or are in the demonstration phase, such as gasification of biomass from lignocellulosic resources. In this option, biomethane is produced by CO_2 methanation through reaction with hydrogen.
Another process is based upon the hydrogen methanation technology of CO_2. In this so called Power-To-Gas (PtG) route, electrolysis is used to produce hydrogen. CO_2 is converted either directly or inderectly (though a CO intermediate, produced by reversed water gas shift). The hidden trick is the need to have hydrogen. In contrast biomethanation with *in situ* production of hydrogen, has reached TRL 2-3.
In contrast to liquid petroleum gas (LPG, butane and propane), methane is the major component of compressed natural gas (CNG) and of liquid natural gas (LNG). Methane can be used as a vehicule fuel. It initially interested captive fleet users, ie fleets of vehicles attached to a site equipped with a compressor. Its two advantages are a 75 % reduction in CO_2 emissions and no more fine particle pollution.

At present, the primary energy production of biogas represented 695 PJ and 31.8 PJ for EU28 and France respectively. Among the three scenarios (ADEME *et al.*, 2019), the consumption of methane gas as biofuel appears in scenarios Renewable Energy Directive (REDII) and MaxiG2; factors limiting a quick development of biogas are the supply of methanizers (and gasifiers), and the difficulty and externalities of collecting organic waste.
France ranks fifth among European countries with 20.9 PJ (0.3 % of final energy consumption). In Germany, who is the largest producer of biomethane (194 PJ) in EU28, only 1.6 PJ are used for transportation. The highest contribution of biomethane to transportation is observed in Sweden (4.6 PJ, 41.6 % of total biomethane).

Other gazeous and liquid biofuels

Lignocellulosic processes involve always a multistep process, starting with a pretreatment followed by either the biotechnological one (low-temperature) or the physical one (high-temperature). Nowdays the specific factors that prevent operators to invest in advanced biofuels are high production costs and regulations uncertainities (see part *Feedstock supplies: biomasses ressources*).

Biotechnological approach

It is based upon the enzymatic release of pentoses and hexoses issued from hemicellulose and cellulose, followed by the fermentation into ethanol or isopropanol (30.5 MJ/kg), farnesen, butanol (34.1 MJ/kg), isobutanol (33 MJ/kg), isobutene (45.1 MJ/kg), microbial paraffins (44-45 MJ/kg), or other molecules (Figure 3).
In the litterature, the major change has been the shift from successive hydrolysis and fermentation (SHF) to simultaneous hydrolyse-fermentation (simultaneous saccharification and

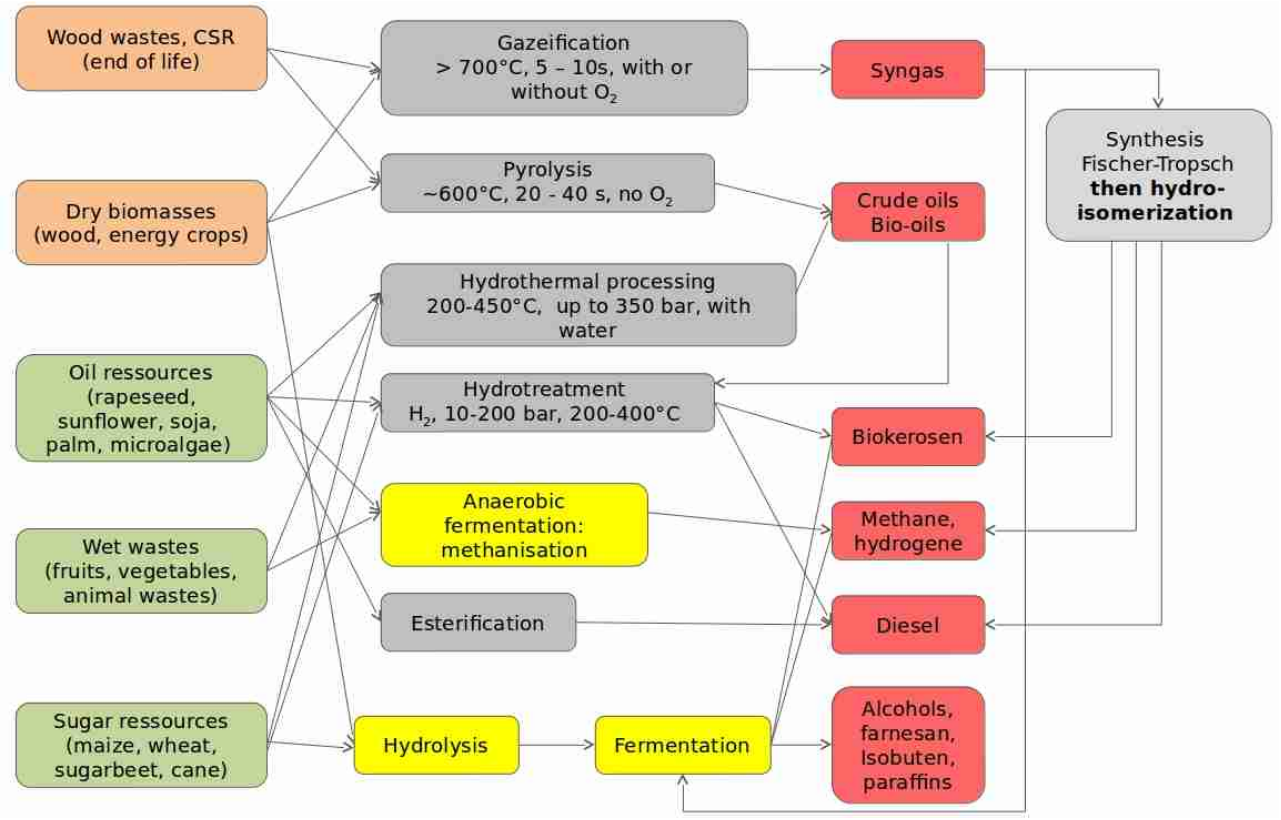


Figure 3. Overview of processes suitable for the production of biofuels.

fermentation, SSF), and finally simultaneous C5 / C6 hydrolysis-co-fermentation (simultaneous saccharification and co-fermentation, SSCF). This choice allows (a) the oligosides to be immediately consumed by the micro-organisms and thus to remove the enzymatic inhibitions induced by their accumulation and (b) reduces the risk of bacterial contaminations. One consequence has been the development of an GMO strain ensuring co-fermentation.

With biotechnological processes, the best operating conditions corresponds to a trade-off between increased susceptibilities of cellulose and hemicelluloses unfermented, and the formation of inhibitory factors (acetic acid, 5-hydroxymethylfurfural and furfural) during pretreatment).

Lignin, by-product of this process, can be burned to produce heat and electricity for the processing plant and possibly for surrounding homes and businesses. The key factors are the enzymes and the microorganism(s) for fermentation. Additional research works are needed to overcome different bottlenecks:

- the choice to use mixes of endo-, exocellulase and β-glucosidases excreted mainly from *Trichoderma* whereas in nature (soils, rumen), additional activities of peroxydases, specially Lytic polysaccharide mono-oxygenases (LPMO) (Villares *et al.*, 2017) are present;
- the high cost of production hydrolases (25 % of manufacturing cost) with cellulases in contrast to 1 % with amylases for conventional biofuels,
- the sensitivity of microbial strains to inhibitory compounds (furfural, 5-hydroxymethylfurfurl, acetic acid) produced during the pretreatment step, to high temperatures,
- the sensitivity of microbial strains to medium temperatures, limitating the simultaneous hydrolysis and fermentation, as enzymes could work at higher temperatures (45-55 °C),
- the paradigmal choice to use one strain instead

of mixed culture which could bring a larger number of enzymes (consolidated bioprocessing, CBP),
- the mass transfer limitations (gas solubility, gas-liquid and gas –solid) with the current stirred tank reactors (CSTR), which limit contacting and cell concentration.
- the energy-intensive distillation process while new emerging distillation technologies are appearing such as ohmic-assisted hydrodistillation, membrane assisted distillation, and heat integrated technologies.

A last point is the excessive focalisation on ethanol, whereas other molecules could be reachable by fermentation. It must be noticed that two molecules (farnesan, for Amyris; isobuten for Global Bioenergie) are already obtained after studies involving synthetic biology. These two products are notably aimed for aviation fuel market. Developments in synthetic biology and modern enzymology should help to overcome all bottlenecks previously described.

Thermochemical processes

The thermochemical conversion of lignocellulosic biomass involves a temperature gradient applied to biomass particles in order to "break" their chemical bonds by thermal cracking and to obtain liquid or gaseous products that can be used as biofuels after treatment. Depending on the temperature and residence time conditions, it is possible to obtain four main families of thermochemical conversion processes (Figure 3).

Liquefaction in hydrothermal media is performed under high pressure (around 100 bars) and moderate temperature (around 300 °C). It can produce liquid oily products (biocrudes) from a wide range of wet feedstocks. However, these liquid products fall short of diesel or biodiesel standards.

Gasification is performed under moderate pressure (1 to 40 bars) and high temperature (800 to 1500° C). It yields a mixture of gases, called synthesis gas (or syngas) including H_2, CO, CO_2, CH_4 (lower temperature) and other hydrocarbons, and water. The gas can either be fermented or chemically transformed into a range of fuels (biomass-to-liquid, BtL). Gasification is mainly aimed at ligno-cellulosic materials: wood and wood products, straw, and various wood by-products of agriculture. It can be carried out in equipments able to handle conventional feedstocks such as coal and crude oil as well as forest and agricultural residues. Purified syngas can be transformed via Fischer-Tropsch synthesis into a large range of products: diesel fuel, methanol, bio-DME (dimethylether), gasoline or methane. The key factor is the catalyst. One important advantage of thermochemical processing is the ability to generate a large range of molecules following Fischer-Tropsch step, whatever the future needs of gasoline, diesel and kerosene. Biomass gasification technology is still facing many cleaning issues of syngas. Tar and aromatics production in biomass gasification process is one of the biggest challenges for this technology.

Comparatively to coal, gasification of biomass is rather recent. Additional research works are needed to overcome different botlenecks:
- the low flexibility of biomass gasification due to some characteristics of biomass: moisture content, poor flow characteristics (linked to injection and flame issues), specific ash content (0.2 – 3 % on dry basis) and ash composition, presence of nitrogen, potassium and chloride;
- slagging, fouling and emissions during processing;
- gas cleaning mainly when lower-quality biomass is considered;
- specific catalysts suited for deoxygentation and denitrogenation.

Overall improvement of mechanistic understanding should lead to models useful for reactor design and optimisation of operating conditions.

Due to the increased processing and resource requirements (*e.g.*, hydrogen and catalysts) needed to make advanced biofuels as compared to conventional biofuels, large scale production of cost-competitive drop-in biofuels is not expected to occur in the near to midterm.

Pretreatments

Both biochemical and thermochemical routes require pretreatment of raw lignocellulose (Figure 3). A pre-treatment step is required in most of the cases for two purposes:
- it increases the amount of energy per volume or mass (up to 800 kg/m^3) related to the geographical dispersion of biomass,
- it adapts and optimizes feedstock type to primary conversion process. Additional research works are needed to overcome two bottlenecks : (a) the composition that may vary a lot depending on the type of resource, as well as on the harvest season (water), (b) the ordered structures of macromolecules in their native state often makes them largely inaccessible to enzymes.

For biochemical processes, physical pretreatments (grinding, steam explosion) help reduce particle size and cellulose crystallinity, alkali (and acid) pretreatments remove lignin and hemicelluloses and can lead to loss of cellulose, solvent fractionation leads to disruption of biomass components with lesser impact on lignin, while liquid hot water mainly removes hemicelluloses. Because of the variety of lignocellulosic composition found among feedstocks, not all feedstocks require the same pretreatment. The recovery of lignin represents a gap in current processes, after pretreatment. The difficulty lies in the recapture of products derived from oxygenated aromatic monomers monomers, dimers and trimers.

In thermochemical processes, some specificities of native lignocellulose (higher oxygen content and moisture content, lower calorific value, lower bulk density than coal, minerals) are shortcomings, determining unpredictable combustion process characteristics. The bottleneck is to obtain densification of biomass as (because) biomass pellets have the increased and fixed energetic and bulk density and the controllable moisture content. Biomass washing to decrease the minerals is considered.

An area that is especially important is the development of flexible and milder feedstock pre-treatment technologies in order to avoid the transportation of native biomasses. Torrefaction raises a lot of interest (Nhuchen *et al.*, 2014). Once treated at 200 - 300 °C in an inert environment at an atmospheric pressure, hydrophobicity, grindability and bulk energy density are increased from 1-3 GJ/m^3 to 14-18 GJ/m^3, enabling more efficient syngas production. This challenge is more demanding for the thermochemical route, because the transformation units are very capital-intensive (very high-temperature technologies and demanding catalysis) and therefore cannot be spread over the territory

Industrial actors in advanced biofuels

Different demonstration plants should bring results in the near future. Three types of actors (Table 5) are noticable: those coming from the paper industry, those from biotechnological tools and the last with complete process. There are many externalities: added value and job creation, trade balance, energy independence. The evaluation of externalities remains difficult due to the lack significant data for certain sectors, which required many assumptions to be made for the complete calculations.

Conclusions on lignocellulosic biofuels

All these processes open the possibility to get drop-in biofuels. While the biological transformation of lignocellulosic biomass leads presently to the production of ethanol and butanol, thermochemical conversion such as flash pyrolysis or gasification / synthesis is very oriented towards the production of biokerosene and biodiesel. Consequently, even if these processes are competing with the resource (lignocellulose), it should be noted here that they meet different objectives in terms of market.

Besides 2030 renewable energy targets for transport sector fixed in REDII, no policies measures (e.g., tax breaks, subsidies etc.) differentiate conventionnal from advanced bio-

Table 5. Main industrial actors in advanced biofuels.

Domain of expertise	**Companies**
Pretreatment	Andritz, Valmet: Expertise from the paper industry Renmatix, Midori Renewables
Enzymes	Novozymes, Genencor subsidiary of Dupont, DSM: Expertise from the food industry IFP-EN, Dyadic, Codexis OPX Biotechnologies now Cargill
Yeast, synthetic biology	Novozymes, DSM, Lesaffre: Expertise from the food industry Amyris, Mascoma, Global Bioenergies, Coskata now Synata CO_2: Lanzatech Butanol : Gevo, Butamax, Cobalt Technologies
Microalgae	Solazyme then Terra Via (closed), Algenol, Boeing, Cellana Abengoa Bioenergy (closed), Aqualia, A4F, Aurora Algae, Euglena, Solazyme, Synthetic Genomics
Complete process with biotechnologies	POET-DSM, IOgen now GrandBio, Abengoa, GranBio, Clariant, BP, Sweetwater Energy, ZeaChem, American Process now GrandBio Celluapp (Sekab) Futurol-P2G-ARD (ARD, IFPEN, INRA, Lesaffre) Beta Renewables now Versalis (ENI)
Technologies	
Complete process with thermochemical step	Enerkem, Fulcrum BioEnergy, Neste, Virent BioT-Fuel (Avril, Axens, CEA, IFP Energies nouvelles, Thyssenkrupp, Total), Engie: 2G biojet fuel & biodiesel from ligno-cellulose biomass. Expertise from the coal industry. Bio-TCatTM process: Anellotech, IFPEN, Johnson Matthey, Axens : 2G bio-BTX & bio-gasoline from ligno-cellulosic biomass. Gaya (Engie, Ucff, Repotec, LGC, LRGP, UCCS, CEA, CIRAD) Haffner Industries (H2) GoBiGas, Elevance, TorrGas

fuels. For the moment investors are not jostling because of the instability of the legislative and regulatory environment. It is a strong demand of the industrial actors, that a long term legislative and regulatory environment is implemented by the policy actors.

Main Drivers

Once the feasibility of suitable biofuels has been demonstrated in the three previous chapters, attention must be given to public policies which set the biofuels cap, adopted in a nexus energy-

environment-food. The challenge inherent in the transition from fossil carbon sources to renewable sources is to decrease the impacts of human activity on ecosystems and not to displace the issues. This transition involves a wide range of stakes, making it necessary to carry it out in a clear, careful and methodical manner. Eliminating the ambiguities related to sustainability will make it possible to generate a non-economic value, to consolidate the integration of stakeholders into value chains and to justify public policies. These public policies have to be considered at european and french levels.

Driver 1: Climate change policies and european regulatory perspectives

Even though it has no common energy policy, the EU-28 expressed common objectives through several directives, the main one being the Climate and Energy Package (CCP) adopted in 2008 and revised in October 2014. This plan notably includes Directive 2009/29/EC on the promotion of renewable energies, and Directive 2009/28/EC on the improvement and extension of the Community greenhouse gas (GHG) emission allowance trading scheme.
Two starting premises are that:
- biofuels have to bring high GHG emission savingsTheir reference values are 93.3 g CO_2 eq/MJ for gasoline and 95.1 g CO_2 eq/MJ for diesel (EU Directive 2015/652 of the Council of April 20, 2015)
- biofuels have to mainly rely on European resources in order to reduce dependence on imports.

The Renewable Energy Directive (RED) 2009/28/EC of the European Parliament and Council of April 23, 2009, which is part of EU Energy and Climate Change Package (CCP), and revised in November 2018, established the following sustainability criteria:
- the GHG emission saving from the use of biofuels and bioliquids shall be at least 50 % compared to fossil fuels, 60 % for biofuels plants build after October 2015, and finally, 65 % for biofuels plants build after 2021.
- biofuels must not be produced from raw materials on land with high biodiversity value (primary forests, protected natural areas and natural grasslands).
- biofuels must not be produced from raw materials on land with large carbon stores (wetlands, forests and bogs).
- cultivated agricultural raw materials must be obtained in compliance with the minimum requirements for the maintenance of sound agricultural and environmental conditions.

The Directive (EU) 2015/1513 concerning the quality of gasoline and diesel fuels set the share food-based biofuels of the final energy consumed in transport in 2020 at a maximum of 7 %, and favored the development of “advanced biofuels” produced from agricultural and forest by-products, waste or microalgae in order to, in particular, restrict changes in the use of agricultural lands (forests, grasslands) for crops intended for the production of biofuels.
The choice of a cap of 7 % for food-based biofuels should be compared to the US policy based upon statutory requirements. This latter establishes new specific volume standards (Renewable Fuel Standard) in order to separate the issues of fuel quality and volume of fuel. This could be another way to ensure a long term energy diversity and to minimize the volume of fossil fuels, according to the needs.
Liquid and gaseous biofuels for all modes of transport are compliant with this Directive 2009/28/EC. A special attention must be given to biofuels produced from wastes, residues, non-food cellulosic materials and lignocellulosic materials, where a multiplier of 2 is applied to reach the targets.
Finally a last directive REDII (April 18, 2018) was adopted by the European Parliament on the circular economy. This directive aims to increase the efficiency of raw material use by decreasing the impact on the environment. The key is circular production and design, with industrial symbioses for recycling and cascading uses. The development of cascade uses will stimulate the biorefineries in a context where food wastage should decrease by a factor of 2 in relation to 2014. After a trilogue betweeen

European Council, Parliamant and Commission, the targets for incorporating biofuels are for 2030, a maximum threshold for food-based biofuels at the consumption level registered in 2020 in each Member State with a maximum of 7 % (which is the case in France). Moreover an increasing target for advanced biofuels from 1.5 % in 2021 to minimum 3.5 % in 2030.

Historical Eurostat transport fuel statistics and EU projections for transport fuel use (Capros *et al.*, 2016) combined with the 7 % cap for conventional biofuels in the RED II translate to a consumption maximum of conventional and advanced biofuels combined of about 879 PJ in 2030, including 418 PJ for advanced biofuels (Phillips *et al.*, 2019). This volume can be cut by the proposed multipliers for reaching the overall mandate of 14 % renewable energy in transport: electric transport (4 x for road, and 1.5 x for rail transport), the use of biofuels by the aviation and maritime sector (1.2 x), and advanced biofuels which count double to the mandate.

There is insufficient transparency in the Commission Impact Assessment on how the caps and cut multipliers have been determined.

The revised Energy Efficiency Directive (EU) 2018/2002 and the new Governance Regulation (EU) 2018/1999 also entered into force on 24 December 2018. Biofuels produced from High ILUC (Indirect Land Use Change) risk feedstocks will have to fall under graduate phase out by 2030 unless firms can certify sustainable production. At this stage only biofuels produced from palm oil are concerned by this specific phase-out measure.

In Europe biodiesel from UCO and animal fat provides already 95 PJ in 2016 (Eurostat, Bioenergy Europe, 2019). In the Renewable Energy Directive, biofuels from these two specific feedstock are limited up to 1.7 % of a country's fuel production in 2030. This maximum target is established in order to prevent the advanced biofuels target being an incentive to generate or import disproportionate amount of waste vegetable oils. This emphasis on producing transport fuel from biomass waste may be seen as a forstering to the anaerobic fermentation sector, as biogas utilised as fuel is counted in the same manner. Furthermore many anaerobic digestion plants utilise waste feedstocks to qualify for advanced biofuel status (notably animal manures).

RED II also acknowledges that heating and cooling are decarbonising at a lesser rate than electricity, and so to prevent member states from putting all their eggs in one basket by focusing on renewable electricity, all member states should raise their levels of renewable heating and/or cooling by 1.3 % per year, including waste heat and cold.

Worth of anaerobic fermentation lies in its versatility and scalability. The Directive encourages decentralisation of energy grids, encouraging the establishment of local heat networks. As anaerobic fermentation can be set at relatively small scale when compared to the capacity of other technologies, this emphasis on local generation plays into anaerobic fermentation's hands nicely, if member states choose to go down this route with their own renewable energy strategies.

For 2050, the former Reference Scenario (2013) has been updated into a new "EU Reference Scenario 2016" ("Reference Scenario", Capros *et al.*, 2016). It focuses on trend projections – not forecasts. It starts from the assumption that the legally binding GHG and RES targets for 2020 will be achieved and that the policies agreed at EU and Member State level until December 2014 will be implemented. In the EU Reference Scenario 2016, the activity of the transport sector shows minor growth up to 14,864 PJ energy demand including 2.3 % electricity in road transport. LNG enters the market, especially over the mid and long term horizon, for road freight and inland navigation transportation. The share of LNG in total consumption of heavy duty trucks would go up to 2.8 % and 8.2 % in 2030 and 2050, respectively. The share of biofuels in total fuels reach 6.6 % in 2050. Only after 2035 biofuels (biokerosene) slowly start penetrating the aviation fuel mix-driven by higher, compared to the medium term, European Union Emissions Trading System (EU ETS) prices.

Last point, the adopted European regulation

(2019) on emission standard for passenger car and light duty vehicles (LDV) sets targets of 37.5 % reduction in greenhouse gas emissions by 2030 for new passenger cars, 31 % for new LDV and possible 30 % reduction for heavy duty vehicles.

Driver 2: French climate change policies and regulatory perspectives

The French framework encompasses fuels, fuelwood and gas. The overall objectives for France are set out in the French Energy Transition Law for Green Growth (Loi transition énergétique pour la croissance verte, LTECV) enacted on August 17, 2015) with a dual dynamics: reduction of fossil fuel consumption, compensated by the progression in renewable energies. Without omitting qualitative objectives like the emergence of a competitive economy, supply security and the reduction of dependence on imports, the LTECV also sets out major quantified objectives concerning the bioenergies:

- reducing greenhouse gas emissions by 40 % between 1990 and 2030, and by 3/4 between 1990 and 2050;
- reducing the final energy consumption by 50 % in 2050 compared to the reference year 2012, aiming at an intermediate target of 20 % in 2030;
- increasing the share of renewable energies to 23 % of the final energy consumption in 2020 and to 32 % of this consumption in 2030 (14 % in 2012); in order to reach this target by that date, renewable energies must represent 40 % of electricity production, 38 % of final heat consumption, 15 % of final fuel consumption and 10 % of gas consumption in 2030. Thereby ADEME *et al.* (2019) project a level of 209 PJ for biofuels (petrol, diesel, gas) consumption for 2030.
- contributing to fulfilling the atmospheric pollution reduction objectives laid out in the national plan for the reduction of atmospheric pollutant emissions defined in Article L. 222-9 of the French Environment Code;
- achieving energy self-sufficiency in the French overseas departments by 2030, with the intermediate target of 50 % of renewable energies by 2020 and 100 % by 2030.

The LTECV also includes the circular economy with the reduction of waste by recycling carbon through cascading uses and closing the N, P and K cycles. The key measure concerning the bioenergies is the generalization of on-site sorting of biowastes between now and 2025, so that they can be recycled in the form of organic amendments.

In addition, the energy methanisation autonomy nitrogen plan (Plan Énergie Methanisation Autonomie Azote, EMAA), has a a target of installing 1000 methanisation units on farms by 2020, as compared to 90 at the end of 2012.

The French National Low-Carbon Strategy (SNBC) introduced by the LTECV in 2016 defines the course of action to reduce GHG emissions and to implement the transition towards a low-carbon and sustainable economy. The SNBC indicatively sets the evolution of GHG emissions associated with waste treatment to 18 Mt CO_2 eq for 2015-2018, 15 Mt CO_2 eq for 2019-2023, and 13 Mt CO_2 eq for 2024-2028.

The French Multiannual Energy Plan (PPE), pursuant to Article 176 of the LTECV, defines the short-term objectives for 2028 in relation to 2012:

- reduction of the consumption of petroleum products by 35 % in 2028 compared to 2012,
- advanced biofuels: gasoline sector from 1.2 % in 2023 to 3.8 % in 2028 and diesel sector from 0.4 % in 2023 to 2.8 % in 2028.

Finally two laws will complete the regulatory framework:

- the Mobility Orientation Law (LOM, adopted on November 18th, 2019) provides a framework for the objective of carbon neutrality in land transport by 2050, with a ban on the sale of fossil fuel vehicule by 2040. Meanwhile public support for biogas production units, opens opportunities to NGV.
- the energy and climate law will set decarbonization targets, including carbon neutrality by 2050.

Driver 3: Land-use changes on cropping systems

New production systems include agroforestry and agroecology. The first is based on the association of an annual plant (crop) and a perennial plant (tree) on the same agricultural plot, on the edge or in the field (Dupraz and Capillon, 2005). Agroecology (Francis *et al.*, 2003; Meynard, 2017) is a way of designing production systems that are based on the principles of ecology with the functionalities offered by ecosystems. It amplifies them while aiming to reduce pressures on the environment (greenhouse gases, synthetic fertilizers and phytosanitary products, etc.) and to preserve natural resources (water, energy, mineral elements, etc.) by placing them on the scale of the farm or even the production area.
In both cases, the necessary insertion of woody species leads to a diversification of production, including lignocellulose, which can be used for both energy and chemistry purposes.
For 2050, Ademe *et al.* (2018) has projected a potential harvest of Multi-Service Cover Crops (MSCC) reaching 50 Mt MS (million tonnes of dry material). By adding Multi-Service Cover Crop and crop residues (20 % of the crop residue production, 14 Mt MS), the potential of plant material usable in methanisation, excluding main crop, goes from 79 Mt MS currently to 110 Mt MS. The potential for producing biogas of agricultural origin is estimated at 443 PJ PCS, in a global gas consumption steadily decreasing to reach 984 PJ PCI or 1.098 PJ PCS, in 2050.

Sequestration of carbon in the soils

Dynamics of Soil Organic Carbon (SOC) extends the analytical framework beyond the fractions harvested. Direct and indirect land-use changes (LUCs) are critical points (Searchinger et al., 2008) that may increase (crops) or decrease (waste) contributions to the net balance of GHG emissions.
Indirect land-use changes are due to the planting of a crop, for energy or chemical application in this case, in the place of a food crop that will then be moved to another carbon-rich ecosystem. Without an attributional assessment for each parcel, this evaluation presents technical difficulties, particularly at the global level. Consequently, simulation on the basis of different models (US EPA, California Air Resources Board) is an essential tool to better grasp the consequences of indirect land uses when a forest or wetland is converted to intensive agriculture. For EU, this issue is covered by European Union's Directive (EU) 2015/1513 and the revised Directive 2009/28/EC (RES Directive).
In field crop soils in France, additional storage could exceed the 0.4 % target, which is largely due to the low inherited stocks (Pellerin and Bamière, 2019).
The forest resource warrants another particular attention for the export of mineral elements that could create an imbalance in the soil, risks in terms of public health, fire and storms and, finally, a threat to the stability of organic carbon in the ground.
French forest can be considered for example: it is at the intersection of the 3S: Sequestration of carbon in the forest (70 to 90 Mt eq CO_2/year, equivalent to 14 to 18 % of GHG emissions), Storage in wood products, and Substitution (27 to 42 Mt eq CO_2/year, or 5 to 9 % of GHG emissions) (Deleuze, 2017). Sequestration of carbon in the french forest could reach 100 Mt eq CO_2/year (EPE, 2019). When brought back to the wooded area, trees in French forests store an average of 79 t C/ha. However, there is a high degree of variability within the national territory.
The high amount of forest sequestration comes from the annual biological increase of forest biomass. It depends on the choice of silviculture scenario: high withdrawals reduce the sink but produce more wood material and energy, thus avoiding CO_2 emissions by substituting fossil fuels or materials, while reducing the risk of accidental destocking (fires, diseases, storms) and increasing the resilience of the forest (Roux *et al.*, 2017).
In French forests, no better storage practices than current practices have been identified

(Pellerin and Bamière, 2019). The challenge for forest ecosystems is to preserve existing stocks and silvicultural management methods that allow positive trend sequestration to be maintained. However the complete carbon balance of the forest-wood sector includes carry-over and offsetting phenomena (between different stocks, between stocks and substitution) that ensure a certain stability. This compensation mechanism between storage in forests and substitution in the sector underlines the importance of the most integrative modelling possible of the forest system.

However the pursuit of the accumulation of organic carbon remains a point of scientific controversy: Nabuurs *et al.* (2013) indicates a future saturation of soils in European forests. Orienting forests towards a preferential storage of carbon would lead to a smaller reduction (-199 Mt CO_2 eq/year over the period 2000-2030), compared to a business-as-usual scenario (1.118 Mt CO_2 eq/year) .

Generally speaking, the diversity of worldwide forest covers leads to highly heterogeneous values of the LUCs (Land Use Changes) (Bispo *et al.*, 2017). The main experimental difficulty is the inventory of emissions in the field linked to inputs (fertilizers, pesticides) that often play a major role in the impacts. The factors underlying land use in crop rotations are critical and poorly understood in meta-analyses that are not adapted to long transitions.

Transitions from forests to grasslands and grasslands to crops provide a margin that makes it possible to adjust biomass production areas to the type of biomasses expected. Consequently, Taylor *et al.* (2015) and McClean *et al.* (2015) showed that transitions to short rotation coppice (SRC) of miscanthus and willow are globally neutral in terms of organic carbon in the soil, whereas transitions from arable land to SRC lead to an increase in the level of organic carbon in the soil. Methodological progress is necessary in terms of LCA to improve both transparency and validation if stakeholders are to have confidence in complex bioenergetic systems linked to degrees of uncertainty (Finkbeiner, 2014; Searle and Giuntoli, 2017). Overall, there is a general lack of shared and tracable data to validate these models in terms of the content of organic carbon in the soil and GHG emissions. Emissions savings and carbone missions resulting from land-use changes, adoption of improved agricultural pratices, carbon capture and storage, processing, transport and distribution are included.

Valin *et al.* (2015) made a significant critical contribution by putting the environmental impacts of biofuels into perspective. Some crops even have net positive balances of atmospheric carbon fixation over their entire life cycle, consistent with the logic of carbon sequestration in the soil (Global Research Alliance, 2020). In RED II, the GHG emission threshold is fixed at 65 % compared to the reference fossil fuel. This threshold is respected for biofuels made from rapeseed and sunflower (63-65 g CO_2 eq/MJ), 1G ethanol made from sucrose (cane: 17 g CO_2 eq/MJ; beet: 15 g CO_2 eq/MJ) or starch (maize: 14 g CO_2 eq/MJ; wheat: 34 g CO_2 eq/MJ) and ethanol produced biotechnically from poplar, miscanthus (-29 to –12 g CO_2 eq/MJ) or straw (16 g CO_2 eq/MJ) or thermochemically (BtL) (17 g CO_2 eq/MJ). In contrast palm (231 g CO_2 eq/MJ) and soybean (150 g CO_2 eq/MJ) don't fulfill these requirements.

Conversely, fossil fuel emmissions (93.3 g CO_2 eq/MJ for gasoline; 95.1 g CO_2 eq/MJ for diesel) may widely differ from the reference value for non-conventional sources of fossil fuels. In Europe, current controversies revolve around the use of palm (Strapasson *et al.*, 2019) soy, corn and sugar cane in South America may also bring significant ILUC (Indirect Land Use Change) (Searle and Giuntoli, 2017).

Additional research works are needed to mitigate ILUC effects:

- develop process suited for the use of residues and by-products: residues from crops and forests, secondary residues from industry & waste;
- develop cropping systems involving abandoned, unused, marginal, fallow, under-utilised or polluted lands.

In the future, a major improvement is to adopt the same methodological rigour for these life cycle calculations wathever fossil fuels and those biobased. Deviations and potential inconsistencies should be reduced (Kavelkamp and Karbe, 2018) with better calculation and allocation rules. The other indicators of environmental impact (water, biodiversity) are rarely documented.

Finally, crop production on polluted ground and industrial wasteland makes it possible to consider dedicated crop production without any restrictions as to use. Two databases co-exist: BASOL (French Ministry of Ecology), with 6442 polluted or potentially polluted sites and soils, calling for a curative or preventive action on the part of the public authorities (2016); and BASIAS (BRGM), with some 300,000 abandoned and unabandoned industrial sites and services capable of causing environmental pollution (soil, water, air). Abandoned industrial wasteland represents 100,000 ha in France (16.2 % of the total land in Europe); efforts are required to remove obstacles linked to pollution risks depending on the projected use. Reconversion of agricultural plots targeted for energy production (potential of 17 GJ/year) provides a temporary solution while waiting for the progressive disappearance of pollution.

Driver 4: Biokerosene

Out of all of the energy users, the aeronautics sector is of particular concern in terms of environmental impacts because of its exclusive dependence on fossil kerosene. The aeronautics sector is growing worldwide, from 5 to 6 % per year, which should continue at a rhythm of 4.7 % per year, at least until 2025, even if this figure varies depending on the region.

In 2016, the ATAG (Air Transport Action Group), representing all of the manufacturers in the sector, reached a single global Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) agreement that included three objectives:

- an objective to improve energy efficiency from 1.5 % per year until 2020, and 2 % per year until 2040 (International Civil Aviation Organization);
- an objective “Carbon Neutral Growth 2020” to cap CO_2 emissions from air transport as of 2020;
- a global reduction of CO_2 emissions of 50 % in 2050 compared to their 2005 level.

In the absence of major changes expected in the engine technologies, and considering the lifespan of aircraft (approximately 25 years), biokerosenes represent a solution to reach these ambitious objectives. The lack of robust data on the “GHG content” of biokerosenes does not allow us today to estimate the potential contribution of the latter to reach the emission reduction targets to 2050 (in relation to a business-as-usual scenario).

On the basis of six worldwide certified alternative kerosene production processes (2 obtained by hydrotreatment of lipids – HEFA-SPK, 2 by Fischer-Tropsch synthesis – FT-SPK, 2 by fermentation- farnesane and Alcohol-to-Jet), more than 2000 demonstration commercial flights with fuels known as experimental “drop-ins” have taken place as of this time. The specificities of biokerosene can currently be obtained by the generation of synthetic kerosene from BtL (Biomass-to-Liquid) technology or by hydrotreating lipids and fatty acids (HVO) process. Regarding the certification rules, these two products can be blended up to 50 % vol. into traditional petroleum-based kerosenes. Alcohol-to-jet is certified up to 30 % vol. blending and farnesane up to 10 %.

Moreover, political ambitions reveal a preference for incorporation. In 2011, the European Commission launched the project European Advanced Biofuel FlightPath that aimed at a level of incorporation of 2 Mt of biojet for 2020, or 4 % of European consumption. In its White Paper on Transport (2011), the European Commission foresaw an incorporation of 40 % of low-emission engine fuel for aviation by 2050.

In 2015, European kerosene consumption (UE-28) was 1.74 EJ. These two biokerosene markets with 50 % incorporation and biofuels for ground transport have comparable volumes,

leading to competition of biomass uses depending on market opportunities. Among the 3 scenarios (ADEME *et al.*, 2019), the consumption of biokerosene in France appears in scenarios REDII and MaxiG2 for 10.5 and 17.2 PJ respectively in 2030.
Today, the major obstacle is the high production cost of alternative fuels compared to that of fossil fuel, and the absence of political incentives to counterbalance this extra cost (Académie des technologies, Académie de l'air et de l'espace, 2015; Banoun *et al.*, 2015).

Driver 5 : Social drivers

The biofuels development responds to the 4 challenges described in the introduction and more generally to the 12 principles that form the core of green chemistry (Anastas and Warner, 1998). However, the transition from technological invention to innovation involves the adoption of these biofuels by consumers.
The conventionnal biofuels was introduced in drop-in, hiding the innovation step. Controversies over the food vs. fuel dilemma led to a debate (Rulli *et al.*, 2016). Biofuels rely on about 2-3 % of the global water and land used for agriculture, corresponding the needs of about 30 % of the malnourished population. However no one has demonstrated that biomass diverted to biofuels could have been available at low price for foods. Nevertheless this controversy anticipates the introduction of advanced fuels.
The second difficulty is the industrial price difference between sources. On the assumption of a unit of 100,000 t bioethanol / year, the cellulosic ethanol production price varies from 0.75 to 0.80 € / L (motor fuel taxes not inluded) depending on the incoming biomass listed from 55 € / t poplar to 59 € / t miscanthus. For the record, the selling price of food-based ethanol was around 0.65 € / L in Rotterdam, and 0.56 € / L in Brazil in 2017. When expressed on MJ basis, fossile fuels (gasoline 0.008 € /MJ; diesel 0.010 €/MJ) are less expensive than bioethanol (0.019 € /MJ). The same ranking between fossil and biobased fuels was observed in 2018: 0.019, 0.016, 0.021, 0.023, 0.025-0.033 and 0.022-33 € /MJ for gasoline SP95, diesel, food-based ethanol, biodiesel, methane (PCS) and Syngas (PCS) respectively (US Grains Council, 2018).
The development of these biofuels, provided they are sustainable, must be based on criteria other than economic ones and justify the implementation of public policies. Directive 2003/96 / EC provides for the possibility for Member States to apply a reduced rate of taxes on biofuels.
Once consumers' awareness of issues is risen, the presentation of biofuels to consumers must be based on key-determinants of consumer acceptance and drivers' willingness (WTP) to pay for advanced biofuels.
Willingness-to-pay is defined as someone's economic value for such a good, usually stated as the highest amount he/she is prepared to pay more for this good than for its conventional counterpart (i.e. the so-called price premium).
In different countries (Table 6), part of the population is ready to use cellulosic-based biofuels, provided that reasonable information is provided and that the premium price is limited.

Feedstock supplies: biomasses ressources

The main issue is the maximisation of biomass ressources (Table 7) for biorefineries with the security and flexibility of supply, guarantee of biomass quality, environmental sustainability and low cost of biomass feedstock. The rationale is both to increase the carbon stock in agricultural and forestry ecosystems (soils, vegetation) and at the same time to substitute biomass for fossil fuels, if possible without competition between these two functions, if not proposing a balanced equilibrium on the basis of a global greenhouse gas balance.
Another assumption is to ensure that the overall demand of biomass does not significantly increase the EU's or national global land footprint.
Faced with a simplistic view of optimization,

Table 6. Key determinants of consumer acceptance and willingness (WTP) to pay for advanced biofuels.

Authors	Countries	Conclusions
Savvanidou *et al.*, 2010	Greece	76.1 % believe that energy saving should precede the use of an alternative source of energy 80.9 % of the car owners are willing to use biofuels, average amount reported as willing to pay was 0.079 (sic)/L on top of the fuel market price.
Khachatryan *et al.*, 2011	USA	The consideration of future and immediate consequences increase the consumer preference for gasoline, cellulose-based and corn-based ethanol fuels.
Lanzini *et al.*, 2015	Italy	Socio-demographics are not good predictors of drivers' willingness to pay. Knowledge of the topic is negatively correlated to willingness to pay, certification is not an effective tool to convince drivers of the eco-friendliness of biofuels,
Kallas and Gil, 2015	Spain	Consumers' level of knowledge of biodiesel is not very high despite favourable consumers' perception of the product. Consumers are willing to pay 5 % extra to fill up with biodiesel instead of its conventional counterpart.
Sivashankar *et al.*, 2016	Sri Lanka	Mean WTP for biodiesel by the diesel vehicle users was Rs.109 per litre (€ 0.74) for lower bound levels. The median WTP was Rs.124/= per litre (€ 0.85). Elderly respondents with higher education are less likely to pay for biodiesel. Married respondents with higher income are more likely to pay higher prices for biodiesel.
Hacbart and Madlener , 2016.	Germany	About 1/3 of the consumers are oriented towards at least one alternative fuel vehicle. WTF varies considerably across consumer groups. Some vehicle attribute improvements could increase the demand for AFVs cost-effectively.
Paris *et al*, 2018.	France	High sensitivity to a potential increase in food prices due to biofuels production, leading to preference for 2G biofuels. Respondents are willing to pay a positive mean amount for each percentage point of GHG reduction compared to the actual situation. Two classes : - the majority (65 %) of respondents are willing to pay a mean amount of € 2.64 by percentage point of GHG reduction, The former appears to accept the production of agricultural residuals-based biofuels, - a minority (35 %) is rather willing to pay about € 0.68 low acceptance for agricultural-based biofuels and would thus prefers wood residuals-based biofuels
Li and Mc Cluskey, 2017	USA	Mean WTP : + 8 -17 % compared to conventional fuel. Driving distance have a negative effect on WTP Information on biofuel 2G is significantly positive.
Baral and Rabotyagov, 2017	USA North West	Mean WTP : + 6.4 % price premium Offered by price, knowledge on biofuel age and religious affiliation are statistically significant predictors of WTP decisions
Munjur *et al.*, 2017	Finland	50 % of the respondents think that there is a direct effect of biofuel production on food prices and would not buy biofuels derived from food crops - lack of information about biofuels prevents to use biofuels for their transport
Rains *et al.*, 2017	USA	Consumer WTP 13 % extra for biofuel, and overall, consumers felt that using biofuel was a more sustainable practice than using traditional jet fuel.
Mamadzhanov *et al.*, 2019	Korea	Average WTP 4.3 % premium over second generation 6% premium when information about positive environmental effects is given being female and higher income positively affect WTP

Table 7. Main sources of biomasses for biofuels.

Organism	Lipids	Sugars	Starch	Ligno-cellulose	Surface (1,000 ha) necessary to get final energy 1 PJ
Sugar canne, sugar beet	-	+++	0	+ (sugar cane bagasse)	Ethanol : 4.7 – 6.6 sugar canne 6.5 - 6.6 sugar beet.
Cereals (wheat, maize, barley, rice, sorgho)	+ (germ)	+	++++	+ (straws)	Ethanol : 9.3 – 12.5 maize 13.3 – 15,6 wheat Methane by AD : 97-203 maize
Rapeseed, sunflower, Soja, ricin, coton	+++	0	0	+ (straws)	FAME : 16.5 - 28 rapeseed, 56 – 62 soja, 26.7 sunflower
Forests (h > 5 m)	0	0	0	+++ supporting tissues	Ethanol : 12- 16
Multi-Service Cover Crops (MSCC)	0	0	0	+++	Methane by AD: 18-30
Forests (h > 5 m)	0	0	0	+++ supporting tissues	Diesel/Kerosene : 9-14
Energy crops (miscanthus, switchgrass, saule, poplar tree)	0	0	0	+++	Ethanol : 14 – 18 Diesel/Kerosene : 6-11
Tubers	0	0	+++	minor	Ethanol : 6-10
Used Cooking Oils	+++				-
Protein crops (faba, pea, lentil)	0	+	++		No use for bioenergy
Oil palm tree	+++	0	0	Not described to date	FAME : 6.6 – 7.2
Microalgae	+++	+	++	minor	FAME : 3.2 with photo-bioreactor

some countries also aim at supply sovereignty in order to secure their consumer markets and industrial sectors.

Regional pedoclimatic conditions lead to contrasting biomass availabilities. In Northern European countries or Canada, forest is the leading resource. In contrast UK has orientated to other main potential resources as are household waste (414 PJ in 2050), energy crops (360 PJ in 2050) and agricultural by-products (288 EJ in 2050) (Welfe *et al.*, 2014).

Biomass availability is a necessary condition to ensure supply over long periods. It is an important critical structural point for all value chains, especially in the case of biofuels, to avoid dependence on market conditions. A major advantage of plant production, with the exception of sugar beet and sugar cane, is the stability of agricultural and forestry materials once harvested: it is thereby possible to desynchronize production, storage, imports, processing and consumption.

Data come from various data sources not harmonised among each other. Evaluation methods are very different depending on the country, making comparisons between European countries difficult. Overall, the EU-28 exports agricultural products derived from field crops. Therefore, mismatches are hard to solve (Camia *et al.*, 2018).

Concerning the USA, the different sources have been well-identified in the 2016 Billion-Ton Report (Langholtz *et al.*, 2016; Rogers *et al*., 2017). It makes possible to address growth prospects for green chemistry and bioenergy for 2030 by particularly focusing on agricultural residues, woody and herbaceous energy crops, as well as on organic municipal waste, which are in high demand if we are to go from 365 Mt of biomass in 2014 to 1042 Mt biomasse in 2030, without impacting food crops (Rogers *et al*., 2017).

The potential of available biomasses can be evaluated on the basis of agricultural and forest land, competition between uses and certifications of sustainability at the production stage (RSPO: Roundtable on Sustainable Palm Oil; ISCC: International Sustainability and Carbon Certification, FSC: Forest Stewardship Council; PEFC: Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes).

Crops

Annual and perennial plants (not including forests) constitute a resource, the amount of which depends on local pedoclimatic conditions and market conditions. Studies undertaken by the U.S. Department of Energy (Perlack *et al.*, 2005; Downing *et al.,* 2011; Langholtz *et al.*, 2016) are impressive and remain the reference. The methodological difficulties linked to the interconnexions between the sectors food, feed, bioenergy and biobased chemicals make the descriptions difficult. Green chemistry applications represent traditional optimization channels and are often very attractive for small volumes. Biodiesel is representative of systemic effect. One important driving force is the increasing global demand for soybean meal for animal feed and with it the increasing price of soybean meal. Soya oil production is increasing much faster than the food market (edible oil) can absorb. The only other outlet is the biodiesel market (Bockey, 2019). In addition oilseed processing in a one step process gives FAME and at the same time high-grade pharma glycerol, which gradually forced other sources of glycerine out of the market (Bockey, 2019)

Field crops are also a source of lignocellulose when the straws, stems, cobs are harvested. The average rate of sustainable straw harvesting determines the extent to which residues can be extracted in a sustainable way. Current straw harvesting efficiencies are near 50 %. It is highly variable at the regional and sub-regional level and depends on the choice of varieties. Numerous crop rotation and soil tillage factors influence how harvesting crop residues will affect soil conservation and other agrosystem services. Monteleone *et al.* (2015) examined some management strategies of wheat cultivation system and its sustainability in using wheat straw as an energy feedstock. Straw use for energy generation in parallel with the optimization of the cropping system are key

factors in long-term environmental sustainability. So straw harvesting must be rationalized on the scale of the cultivation system. Many studies that claim to take all factors into consideration conclude 25 to 35 % of the straw may be available for energy uses.

Additional research works are needed to overcome uncertainties concerning crop residues: crop models of agricultural residue production taking into account the interrelationships between genetic factors (varietal differences), agro-climatic conditions, and cropping management practices

The use of life cycle assessment (LCA) as a comprehensive tool to assess environmental impacts of bioenergies is an essential tool. Godard *et al.* (2013) demonstrated the large influence of allocation method (economic or mass-based). Simulation models using local data in agricultural LCAs, especially for dynamics of Soil Organic Carbon (SOC) and pesticide from fields are recommended and need additional research works.

For EU28, cereals, oils seeds, other arable crops, fodder (green maize, temp. grassland), set-aside + fallow lands and permanent grassland represent 57.8, 11.5, 9.7, 21.7, 6.6 and 58.3 Mha respectively. One advantage of crops is that annual biomass collection is inherent to the cropping systems. Thereby commercial activities on large volume are easy to forecast.

Dedicated energy crops have very low fertilizer requirements and provide ecosystem services including organic carbon storage. These attractive characteristics cause perennial biomass crops (PBC) to be seen a source of bioenergy with significant potential for growth. Transportation and fertilization were the main contributors of field emissions during feedstock production (Godard *et al.*, 2013). In Germany, biogas from energy crops has played a major role in the Energiewende (2010) to date. In the years 2000 to 2012, the silage maize cultivation area grew from 1.154 Mha to 2.038 Mha (total agricultural area of Germany : 17 Mha) and since has remained constant at ca. 2.1 Mha since 2014.

However, current land use in the EU for the production of dedicated energy crops is marginal (63,907 ha for short rotation coppice, 53,494 ha for grassy energy plants, mainly Miscanthus). To allow the EU to benefit from the promise of dedicated energy crops, political incentives included in the CAP reform should be applied to encourage more widespread plantation of energy crops, like short rotation coppice and miscanthus.

Additional research works are needed to understand the functioning of plants and their adaptation of the raw materials, for boosting of yields by enhanced photosynthesis, integrate new breeding targets (composition and ultrastructure) and increase diversity of varieties and crops.

Forests

Solid biomass coming from forests represents today the main source of bioenergies in EU28 and France, 3,950 – 5,630 PJ and 464 - 661 PJ respectively. This resource is the one likely to have the greatest versatility of uses (electricity, heating, fuel). Of course the choice biofuel vs heatwood is an issue with different stakeholders to take into account. The difficulty is to understand the positions and underlying motivations of stakeholders groups relative to their perception of energy and inform misconceptions about bioenergy.

Additional research works are needed to overcome different bottlenecks of lignocellulose disruption. More reactive lignin (Le Bris *et al*., 2019) leads to better saccharification yieds.

The issue is to determine whether wood biomass could be available for biofuels, either directly in 2G biorefinery, or in a cascade scheme. Forestry biomass is generally considered to have the potential to deliver substantial amounts of biomass for the bioeconomy.

Evaluation of the available biomass from forests combines different steps (Figure 4):

- total theoretical available resource defined as the maximum amount of terrestrial biomass theoretically available over bark,
- environmentally sustainable resources; available resources taking account of eventual constaints (competitive uses,

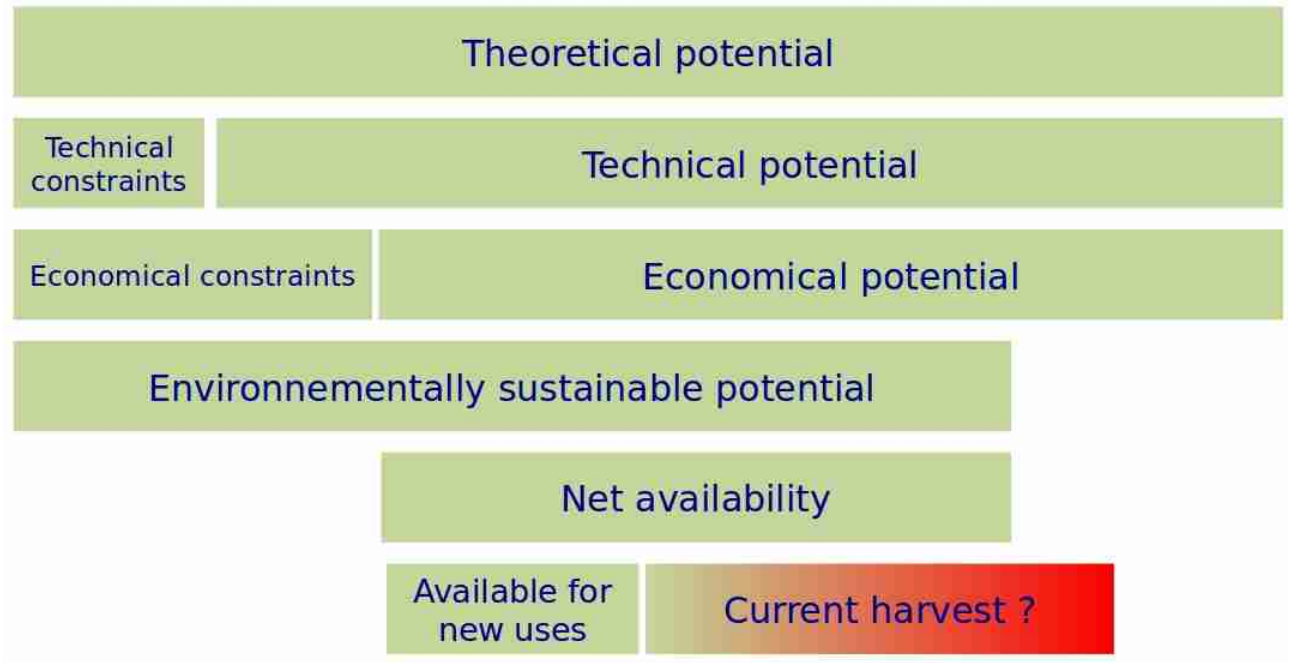


Figure 4. Different types of biomass from forestry.

soil/water/biodiversity preservation, negative impacts linked to its extraction, etc.) and based upon the net annual increment.;
- technically available resources, available under current technologies, with accessibility based on eventual logistical constraints: access, level of dispersion over the territory, ease of transport/storage, etc.;
- economically available resources, share of the technical potential which meets economic criteria within given conditions, covering the cost of production and the price of the biomass feedstock, with the existence of an international market able to supply a domestic market through imports. Biomass collection remains a bottleneck.

The combination of the last three fractions determines the net availability for use in timber, industry and energy. However current harvests might extend beyond this limit, making forest certification necessary.

Local framework conditions across Europe and in France of course are complex and diverse. They are defined by many factors such as forest ecosystem types (hard- and softwood), ownership structures, infrastructure, available harvesting technologies, transportation, logistics and transforming industries. Augmenting sustainable mobilisation consequently requires a multi-actor and multi-factor approach.

A European agrement has been reached for the methodologies devoted to the evaluation of total theoretical available resource In contrast the methodologies implemented for the other types of resources are rarely described, leading to significant disagreements. So the mismatched gaps can reach 15-20 % that is not surprising. Additional research works are needed to overcome these different uncertainties: modern methodologies (satellite data) to estimate harvest levels and removals of woody biomass, with a challenge on household use of fuelwood when non-marketed.

Generally, roundwood production is driven by demand from the wood products industry rather than by demand for bioenergy. This reflects the substantial price difference between industrial roundwood, pulpwood and wood residues from sawmills, which ensures that high quality timber is used for high-value products such as furniture and construction.

The particular difficulty of forest resources is the interweaving of sectors (timber, pulp and particle

board, energy), reinforced by cascade uses, paper recycling and new biorefineries. In France, wood energy comes from three sources, wood energy sensu stricto, losses in the processing of timber and industrial wood. For example, Colin and Thivolle-Cazat (2016) have adopted the following assumptions for the French forests:
- timber: sawing mass yield of 50 % for sawn timber, 38 % for energy and 12 % for sawmill related products (SRP).
- industrial (paper, particle board): technical yield of 70 % for pulp and particle boards, 18 % for energy and 8 % for secondary processing industries,

In addition, the distinction between timber and industrial wood plantations does not result in volumes proportional to the area planted. In France, current withdrawals of potential timber are twice as high as actual timber uses, showing use for crushing or energy (Guinard *et al.*, 2016).

On the basis of an annual worldwide harvest (source: FAOSTAT) of 3,737 Mm^3, 1,863 Mm^3 are used for fuelwood (a considerably underestimated figure), 468 Mm^3 for lumber, 416 Mm^3 for panels and 180 Mt for pulp. At the global level, the report, Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities (FAO, 2016), claims that deforestation is not necessary to meet food challenges in tropical regions in the case of 35 countries, to the benefit of ecosystemic services.

At the same time, the increased production capacity of forests under sustainable management remains an option for three products: lumber, construction and fuelwood. In developed countries, the forest area is slowly increasing, leaving way for an increase in uses. At the global level, fuelwood within the framework of sustainable harvesting (Kraxner *et al*., 2013) is estimated at 115 EJ/year.

EU28 has 182 Mha of forests and other woodded lands, with an average increase of 0.2 % per year (322,000 ha). It represents a stock of 26.3 billion m^3 over bark. The value is of interest only to determine the sequestration of carbon in wood.

In contrast to the trend elsewhere in the world, the area covered by forests and other wooded lands in the EU28 is currently increasing. In the period from 1990 to 2015, the area of forest cover and other wooded land in the EU28 increased by 5.2 %, equivalent to an average increase of 0.2 % per year.

On average 63 % of the annual forest increment is felled and 38 % remain in forest. 53 % of EU28 forest area is certified PEFC and 26 % certified FSC (some forests may be certified both). This perspective is based upon the rationale that the net annual harvest in Europe's forests corresponds to roughly 60 % of the net annual increment, giving a potential to sustainably increase the mobilisation of forest biomass for a variety of uses.

There is no market incentive for bioenergy producers to buy high-quality wood (*i.e.,* sawlogs). Only low-value residues and other unmarketable wood are affordable for the energy sector. However Cyprus, The Netherlands, Denmark, Greece, France, and Italy were the only Member States where more than half of the total roundwood produced in 2016 was destined for fuelwood.

Socioeconomically, EU28 forests are divided into small family holdings, state-owned forests, and large estates owned by companies, which are often exploited by the forest and wood products industry. In total, around 60 % of the EU28´s forests were privately owned in 2010. This percentage is highest (98.4 %) in Portugal and lowest in Bulgaria (13.2 %). The high share of privately owned forests, which are often small and dispersed among many forest owners, makes forest management a challenging proposition. Economic incentives play a major role to sustainable forest management. Bioenergy provides such an incentive by permitting the valorisation of low-quality wood such as tops, branches and early thinnings.

In EU28, net annual increment is about 720 Mm^3 (over bark). The roundwood production is 425 Mm^3, including 98 Mm^3 of fuelwood. Wood and agglomerated wood products such as pellets and briquettes provided the highest share of energy from organic, non-fossil materials of biological origin, accounting for almost half (45 %) of the EU-28's gross inland energy

consumption of renewables in 2014. However measures of actual fuelwood consumption by households are not realized with the same rigour all over the different european countries.

EU28 market for biomass intended for the household and industrial production of heat or power represents 22.7 Mt of pellets (2017), 8.1 Mt being imported.

In addressing the complexity of sustainable mobilisation of forest biomass, EIP-AGRI Focus Group (2018) has identified three major bottlenecks:

- the importance of incentives in public policies and no study of their impact and effectiveness,
- the low diffusion of user-friendly information systems,
- the lack of cross-regional value-chains and production systems.

In France, net annual increment is about 83 Mm^3 (over bark). The roundwood production is 52 Mm^3, including 27 Mm^3 of fuelwood.

French forests (Kurtek *et al.*, 2018) represent 17.4 Mha, up by 6 % since the period 2006-2014. In France, the harvesting rate is only 55 % of the annual organic production, well below that of other European countries (72 %). In France, in 2014, the volume of standing timber was more than 2.9 billion m^3. Of the 92.3 Mm^3 of the net annual organic production, 40 Mm^3 were harvested and marketed in 2013, including 21 Mm^3 for fuelwood, 12 Mm^3 for industrial wood (pulpwood, pickets) and 22 Mm^3 for lumber (sawlogs, veneer). A large part of the production (25 Mm^3) was directly harvested and self-consumed by the owners. The rest was simply not harvested, allowing the forest biomass to increase year after year. The sector's lack of efficiency is well known compared to other European countries with timber harvesting rates on the order of 72 %.

Fuelwood, not including direct harvesting, includes 6.6 Mm^3 of trees outside forests, 11.6 Mm^3 of by-produits and waste from the wood industry (half of which are linked to sawmills), 3.6 Mm^3 of black liquors and 2.2 Mm^3 of recovered wood. This represents a potential of 120 - 290 PJ/year.

On the basis of a productive area of 16.8 Mha, the volumes of timber that can be harvested between now and 2035 (Kurtek *et al.*, 2018) in quantity and in quality, in order to contribute to the development of national and regional forest-wood policies (FCBA-IGN, 2016) were considered according to two scenarii: continuous silviculture and progressive dynamic management. The demand for industrial and fuelwood estimated between 54 and 64 Mm^3 (or 1 m^3 – 750 kg – 5.940 GJ) per year in both less ambitious scenarios can be satisfied provided that round wood and products linked to the wood industries are made available and that the potential hardwood lumber not currently used is used as lumber.

The Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) reports, first Demolis *et al.* (2015), and then Galbert *et al.* (2015), project a theoretical volume of 40 Mm^3 of wood available for the processing industries, compared to the 35.2 Mm^3 of wood marketed in 2012. By considering the cascading uses of wood, excluding energy, the energy potential is increased compared to when fuelwood alone is considered (Mantau, 2015). Consequently, 42 to 55 % of the lumber used in sawmills consists of related products such as bark, sawdust, chips and non-compliant logs. ADEME supplemented this analysis for 2030 with an estimate of potentials of 50 Mm^3 of wood from forests, 3.6 Mm^3 from hedges, and 27 Mm^3 from waste and urban trees.

Longer-term foresight work conducted by ECOFOR is aimed at the horizon of 2100. Finally, Roux *et al.* (2017) brings a Dynamic Silviculture scenario, the gross availability in 2035 is 97 Mm^3 of wood, the technical and economic availability 74 Mm^3. These are the volumes of timber, industrial and energy wood and wood losses, after operating losses. For 2050, Roux *et al.* (2017) projected the trends of this scenario, which leads to a sampling assumption of 82 Mm^3. The 91 Mm^3 sampled in the forest in 2050 breaks down into 9 Mm^3 losses, 26 Mm^3 in timber, 24 9 Mm^3 in industrial wood (12 current + 12 future), and 33 Mm^3 for energy. In total, wood energy represents a potential of 824 PJ in 2050.

Table 8. Biomass sources to include in a cascade approach.

Sector	Source	Comment
Wood industry	By-products resulting from the sawing	-
-	Crude tall oil from pulp pressing of softwoods	Double counting in the biofuels quota
-	waste wood products	Ecoconception is needed to avoid polluants and inhibitory products
Cereal industry	shriveled grains, other cereals, grains damaged by pests, grains in which the germ is discolored, sprouted grains	1% harvested cereals
Food industry	Used Cooking Oil (UCO)	See 5.3
Slaugtherhouse	Animal fats	See UCO
Wine industry	Grape marcs and wine lees	-

Cascade uses

The cascading use principle applied to biomass gives priority to higher value uses (materials, foods) that allow the reuse and recycling of products and raw materials and promotes energy use only when previous options are starting to run out. It concretely prioritizes material uses of biomass before energy use since burning implies the molecules being lost (table 8).
Cascade uses of wood have already been described previously. When the remaining physical and chemical properties are no longer satisfactory for industrial wood and lumber, the opportunities of re-using and recycling have disappeared. Regulation either hinders (Poland, Spain) or promotes (Germany, UK) cascading uses of wood (Dammer *et al.*, 2016). The main idea is to reject the use of wood straight from the forest to produce energy. The consequence is that more wood ressources would be considered in these conditions. The bottleneck is to better integrate and implement existing bio-energy and waste policies.
Biodiesel (FAME and HVO) can be obtained from Used Cooking Oil (UCO) or animal fats and thereby fits with the concept of cascade use in bioeconomy. For the EU-27, Ecofys (2019) estimated in 2017 a total UCO potential of 3.55 106 t/year, including the catering sector, food processors and households (1.75 106 t/year). Green gas emissions from the production and consumtion of biodiesel from UCO are betweeen 60-90 % lower than the emissions from conventional diesel. However the bottleneck is the logistics involved in collecting small amounts of UCO from a very large number of individual households.

Algae biofuels: technological foresight

Cultivation of such feedstock types as algae is only at the early stages of development and the supply is currently marginal for biofuels.
Microalgae still attract (Moody *et al.*, 2014; Afzal *et al.*, 2017) a great deal of interest. Algae are expected to have several advantages by comparison with agricultural crops: possible settlement on non farmlands; better photosynthetic efficiency; higher oil productivity and possible growth by using CO_2

from gaseous effluent. Algae cultivation can also be coupled with wastewater treatment for biofuels production. Moreover, the biorefinery concept can be applied because different types of co-products (chemicals, pigments, agrochemicals, feed, food) can be obtained from algae together with the production of biofuels, within a biorefinery concept. In outside conditions close to those of a commercial operation, the production of eukaryotic and prokaryotic microalgae (50-70 t dry matter/ha.year) is greater than that of rapeseed, maize and switchgrass (10 to 30 t/ha.year), and may even exceed that of sugar cane (plants in C4). The main steps of the biofuels production are the biomass cultivation, the harvesting, the lipids extraction and the conversion to biofuels and the co-products valorisation. Hydrothermal conversion are possible with algae, in order to convert 100 % of the algae. However, the nitrogen content, the ash content and sulfur content can be problematic. The major technological obstacle today is the large scale production and the harvest stage (sedimentation, flocculation, filtering and drying). Moreover, the incorporation of microalgae (*Spirulina* and *Chlorella* at this time) in the energy system will surpass current applications (proteins, omega-3 acid, carotenoids, phycobiliproteins) provided that major progress is made in the laboratory/pilot/industry transition.

The algae cultivation and harvest is similar to agriculture, in a certain way. The main bottleneck to cope with are as follows:

- the water use is of great concern, as algaes grow in a 90 % water solution. The water management, inside the process must be treated with attention.
- the marine algaes contain up to 50 % of inorganics (ashes) in mass. The non-marine algae contain up to 20 % of inorganics in mass.
- K and P nutrients are necessary for the growth of algaes.

Industrial CO_2 constitutes the last available resource. This inert molecule must first be broken down using energy to obtain platform molecules depending on the chemical or biotechnological catalyzer implemented. Urea synthesis is the most frequent use of carbon dioxide in organic synthesis at this time. Industrial CO_2 presents two advantages:

- its abundance in industrial smoke (7 to 9 %) and fermentations, compared to its content in the atmosphere (403 ppm of CO_2 in the atmosphere in 2016).
- the possible link with industrial biotechnologies with bacteria, archaea and microalgae that use light, heat or electrical energy. The major advantage of the biotechnologies is that they can use CO_2 from power plants or industry without purification. LanzaTech (New Zealand) has developed fermentation systems to produce ethanol, butane and other products from non-purified gas emissions from the steel industry.

An important feature of microalgae is the co-production of protein-rich residues useful as feeds. However, in terms of biofuel production, it is a drawback, since it contains much more nitrogen (up to 10 %) than the tolerate amount in biofuels.

Nowdays industrial production is restricted to a small numer of species *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis* (~ 7000 t dry matter / year), *Chlorella* sp. (~ 4000 t dry matter/year) and *Dunadiella salina* (~ 2000 t/year) essentially for cosmetics, foods and feeds.

The transition to photo-bioreactor for cultivation of microalagae allows to increase production potential to 79.2 PJPCI on 250,000 ha.

Additional research works are needed to overcome different bottlenecks. The development of synthetic biology for photosynthetic strain optimisation is nowadays a real challenge. The implementation and the operating large scale production system is also an important issue, together with largely positive energy production processes, including innovating downstream processing for very wet biomass.

Wastes

Biogas, containing CH_4, can be obtained from all kinds of feedstock (ADEME, 2016a). However

the different kinds of feedstock used, often very diffuse and difficult to transport, have a large influence on how plants operate, and the associated costs (collection, transportation and handling).
Any whole plant has to be considered around the main feedstock it intends to use. The use of biogas technology as part of integrated waste management and ressource management relies on large scales. 1 PJ can be obtained from biowaste from housholds (800,000 - 1,200,000 habitants) or 40,000 - 60,000 cattle.
Kampman *et al.* (2016) estimated European potential biogas production from waste at between 1.25 - 1.67 EJ by 2030, around 3 % of European energy consumption and approximately 10 % of gas consumption within that timeframe. Transport & Environment (2017) estimated lower values 264-327 PJ for advanced biofuels from wastes and residues (Annex IX part A) in 2030.
For France, Solagro and Inddigo (2013) estimated the potential at 167 PJ in 2030, a value equal to that produced by the United Kingdom and Italy. It was based upon methanization at 180 PJ in 2030, *i.e.*, a volume similar to that established in the European study. Some analyses by Negawatt (2011) predict a potential in excess of 335 PJ by 2040.
The more recent scenario Gas mix 100 % renewable in 2050 ? (ADEME, 2018) relies on the mobilisation of 10 MtMS of livestock manure, *i.e.*, 67 % of the mass produced. The potential for producing biogas of agricultural origin is estimated at 442.8 PJ PCS. of which 27 PJ are from livestock and 51 PJ from intermediate crops. Additional research works are needed to overcome different botlenecks:
- designing technical solutions that allow the use of heterogeneous feedstock and/or with high dry matter content.
- reliability of supply of feedstock (in terms of both quantity and quality) for the entire duration of projects.
- digestate represents another value of this process, with the advantage to close the loops of nitrogen, potassium and phosphorus. The large areas of land required to spread the digestate are not always available in close proximity to anaerobic digestion units.
The sector's complexity comes from he variety of stakeholders (from agriculture, industry, local authorities, etc.). Ways to integrate these different stakeholders needs to be investigated.

Conclusions on resources

The current consumption of biofuels represents 127 PJ/year , 23 % of bioenergies in France with mainly conventional biofuels (Dussud *et al.,* 2018). The roadmap advanced fuels for France (ADEME, 2011) has to be updated with five main sources : forest products (chips, related products and end-of-life wood products), wastes, agricultural residues, MSCC and energy crops. All these figures given in this chapter highlight that there is still the possibility for a large increase of bioenergy usage and a real need to promote biofuel as one of the reliable solutions for a low-carbon energy transition in France.
At the european scale, existing studies have calculated the domestically available potential for biomass for energy to be from 7,076 PJ up to 30,857 PJ each year in Europe from 2050 onwards. A literature review concludes that the middle range potential of 16,998 PJ, which is around 24 % of the total energy consumption in EU-28 in 2017, can be achieved by 2050 – considering different constraints (*e.g.,* costs). This means that, compared to the actual 6,028 PJ used in 2017, the potential gives enough room to almost triple the amount of bioenergy in the EU-28 energy mix.

Integration

Biofuels have to be considered in a system integrating production – transformation – distribution - use with three core dimensions:
- environmental sustainability, which covers preservation of biodiversity, water resources, carbon sink (cropping and forestry systems) and reduction of ghg emissions;
- land use competition to fulfil food security including the ongoing transformation to healthy

diets by 2050 will require substantial dietary shifts (Willett *et al.*, 2019). with generational evolutions (lower consumption of animal products),
- quantitative relevance of biofuels present either as a goal and an agricultural input (fertilizer….) in the energy system.

Balancing these three critical but sometimes conflicting goals is what we define as the nexus energy-environment-food. This nexus can be assessed from life cycle analysis to integrated assessment models.

Foresights

Energy has been the topic of many foresights, at world (Table 9) and national scales. Different scenarios have been published: they are not predictions of what is likely to happen. They explore the possible implications of different assumptions. They all include a share of biofuels. The most important uncertainity about the future of energy is the interaction with national policies: biomass use could evolve in a “sustainable” or “unsustainable” way depending on the governance context.

Biomass in 2013 contributed ~ 60 EJ (10 %) to global primary energy (2011). More than half was traditional biomass, predominately used for cooking and heating in developing regions, bioelectricity accounted for ~1.7 EJ, and transport biofuels for 3.19 EJ. The Special Report on Renewable Energy Sources (Smith *et al.,* 2014; Creutzig *et al.*, 2015) concluded that biomass supply for energy could reach 100-300 EJ/yr by 2050 with the caveat that the technical potential cannot be determined precisely while societal preferences are unclear. If limited by water and land availability, bioenergy is a somewhat lower range of 80-190 EJ/year (17 EJ for Europe).

Sustainability and emergence of new technologies (wind, solar, biotechnology) and ressources (gas) are the game changers involved of these exercices. Some factors should need deeper investigation:
- the development of agroecological practices, with the evolution of species-variety-cropping system to longer rotations, including nonfood crops,
- the potential role of carbon sequestration (0.4 %),
- the evolution of human diets towards less animal products.

Those which are considered here (Table 9) have expressed special attention to biofuels. These prospects are unquestionably the most developed, even though they face several difficulties, including the multiplicity of sources (primary energy including nuclear source), uses (heat, transport) and the cost of infrastructures, to be amortized over long periods.

Growth of bioenergies, at all scales is present in all scenarios. Microalgae are appearing in 2040. Enough agricultural and forest lands are available to produce biofuels sustainably (see Ecofys and Solagro). The weakness of some exercises is the lack of explanation of the biomass ressources that will be mobilized.

A very interesting work has been published by IPCC (2019) where three Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarii (Table 10) are considered to obtain the net emission reductions necessary to limit global warming in 2050 and 2100. It clearly points out that there is just limited land for food, feed and limited water while population is growing. SSP1 is focused on sustainability including human development, technological development, nature conservation, globalised economy, economic convergence and early international cooperation including moderate levels of trade. The scenario assumes a low population growth, relatively high agricultural yields and a move towards less-meat intensive diets. Dietary change and reductions in food waste reduce agricultural demands and well-managed land systems enable reforestation and/or afforestation. SSP2 is a scenario in which societal as well as technological development follows historical patterns (middle of the road). Land-based Carbon Dioxyde Removal is achieved through bioenergy and (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage). (BECCS), and to a lesser degree by afforestation and reforestation. SSP3 is a scenario with limited technological progress and land-use regulation.

Table 9. World foresigths (energy on year basis; 100 Mtep = 4,2 EJ) (to be continued on next page).

Author and year	Time frame	Title	Bioenergies
Fischer and Schrat-tenholzer, 2001	2050		Potential : 370 - 450 EJ/year
Smeets *et al.*, 2007	2050	A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050.	Potential : 215 - 1272 EJ, depending upon technologies involved
Beringer *et al.* , 2011			Potential of 130 to 270 EJ/year, including 20 to 60 % from energy crops
WWF-ECOFYS, 2011	2050	100% Renewable Energy Future	
Turner, 2013	2030	Bloomberg, Energy Finance Global renewable energy market outlook	Bioenergies : 4,7 à 6,4 EJ
Creuzig *et al.,* 2014			100 to 300 EJ/year in a sustainable scenario
International Renewable Energy Agency, IRENA, 2014	2030	Global Bioenergy REmap 2030	In 2030 : agricultural residues and waste (37-66 EJ), energy crops (33-39 EJ) and forest products, (24-43 EJ). Increse of land for crop production from 1.5 bln ha (2010) to 2.7 bln ha (2030)
Reilly *et al.*,, 2015	2050	Energy and climate Outlook. Perspectives from 2015	Renewables Land use for biofuels 2010 : 38.6 Mha to 41.2 Mha in 2050
Greenpeace et al., 2015	2050	Energy (r)evolution 100% renewables -Reference scenario (REF) (~ Current Policies Scenarios IEA) - Energy [r]evolution scenario (e[r]) - Advanced energy [r]evolution scenario (adv e[r])	- Reference scenario (REF) : 86.7 EJ - Energy [r]evolution scenario (e[r]) : 76.3 EJ - Advanced energy [r]evolution scenario (adv e[r]) : 77.5 EJ Mainly for cogeneration in the 3 scenarios
World Energy Council, 2016	2060		- Scénario Jazz, economic growth. - Scenario Symphony, environnemental sustainability ; - Scenario Hard rock : no governance
International Renewable Energy Agency, 2016	2050	Energy technology prospective	
IEA, 2016	2040	Energy technology perspectives :towards sustainable urban energy systems	Primary Demand - Current Policy : 76.8 EJ - New policies scenario : 78.8 EJ - 450 scenario (2°C) : 96.8 EJ
OECD-FAO, 2018	2027	Agricultural Outlook 2018-2027	-
IRENA, 2018	2050	Global energy transformation : a roadmap to 2050	Two scenarios : - Ref Case : planned and current policies

Table 9. (continuation of previous page)

			- Remap Case : deploiement of low carbon technologies - Bioenergies : 33% of renewables
ExxonMobil, 2018	2040	Outlook for energy 2040	65.5 EJ (mainly heating)
World Energy Outlook, 2018	2040		- Current Policies Scenario - New Policies Scenario : Sustainable Development Scenario SDS: renewable technologies Only SDS is compatible with the 2°C warming target
Enerdata (2019)	2050	Enerdata projections : Energreen scenario	87.5 EJ
World Energy Council, 2019	2040 and 2060	Exploring Innovation Pathways to 2040 - Scenario Modern Jazz, economic growth, market-led, innovative, and digitally disrupted : 44.2 EJ. - Scenario Unfinished Symphony, environnemental sustainability, strong, coordinated, policy-led world : 51.2 EJ. - Scenario Hard Rock : fragmented world with inward looking policies : 52.4 EJ.	- Scenario Modern Jazz : liquid biofuels 7,201 PJ (12,811 PJ for 2060), gazeous biofuels 335 PJ (711 PJ for 2060). - Scenario Unfinished Symphony, biomass and liquid biofuels 27,4 EJ. - Scenario Hard Rock : biomass and liquid biofuels 16,3 EJ.
BP, 2019	2040	Energy Outlook 2019	Rapid transition Evolving transition : lower –carbon transport

Agricultural demands are high due to resource-intensive consumption and a regionalised world leads to reduced flows for agricultural goods. In SSP3, forest mitigation activities and abatement of agricultural GHG emissions are limited due to major implementation barriers such as low institutional capacities in developing countries and delayed as a consequence of low international cooperation. Emissions reductions are achieved primarily through the energy sector, including the use of bioenergy and BECCS. IPCC(2019) highlights the need for bioenergy and BECCS as part of an overall strategy to limit global warming to 1.5 °C or well below 2 °C.
Commercial biomass conversions present cost reduction: 30-50 % with high technology improvements in SSP1, 20-40 % with medium assuptions in SSP2 and 10-30 % with low technology improvements and SSP3.
The current trajectories of the different countries are insufficient. All pathways use CO_2 capture (CDS Carbon capture and storage) with contributions from bioenergy at the expense of fossil fuels, carbon capture and sequestration (BECCS) and uptake by soils (agriculture, forestry, AFOLU) and deep geological layers. The BECCS solution negative emissions. But this technology has not been experimented on a large scale, which can lead to competition over land use, with negative effects on agricultural production. Its potential for sequestration in soils is controversial (Harper *et*

Table 10. Breakdown of contributions to global net CO_2 emissions in three illustrative Shared Socioeconomic Pathways (IPCC, 2018) : SSP 1 low challenges to mitigation and adaptation, SSP2 medium challenges to mitigation and high challenges and SSP3 high challenges to mitigation and high challenges to adaptation (AFOLU Agriculture, forestry and other Land Use).

Scenario	Target	SSP1	SSP1	SSP2	SSP2	SSP3
Radiative forcing		1.9 $W.m^{-2}$ mean (min, max)	4.5 $W.m^{-2}$ mean (min, max)	1.9 $W.m^{-2}$ mean (min, max)	4.5 $W.m^{-2}$ mean (min, max)	4.5 $W.m^{-2}$ mean (min, max)
Change in forest cover (Mkm^2)	2050	3.4 (9.4, – 0.1)	0.6 (4.2, – 0.7)	3.4 (7.0, – 0.9)	0.9 (2.9, – 2.5)	2.4 (1.0, -4.0)
-	2100	7.5 (15.8, 0.4)	3.9 (8.8, 0.2)	6.4 (9.5, -0.8)	-0.5 (5.9 ; -3.1)	-3.1 (-0.3, 5.5)
Change in cropland (Mkm^2)	2050	- 1.2 (0.3, – 4.6)	0.1 (1.5, - 3.2)	- 1.2 (0.3, - 2.0)	1.2 (2.7, - 0.9)	2.3 (3.0, - 1.2)
-	2100	5.2 (-1.8, - 7.6)	-2.3 (-1.6, -6.4)	-2.9 (0.1, - 4.0)	0.7 (3.1, -2.6)	3.4 (4.5, 1.9)
Change in energy cropland (Mkm^2)	2050	2.1 (5.0, 0.9)	0.8 (1.3, 0.5)	4.5 (7.0, 2.1)	1.5 (2.1, 0.1)	1.3 (2.0, 1.3)
-	2100	4.3 (7.2, 1.5)	1.9 (3.7, 1.4)	6.6 (11.0, 3.6)	4.1 (6.3, 0.4)	4.6 (7.1, 1.5)
Food price (index 2010=1)	2050	1.2 (1.8, 0.8)	0. 9 (1.1, 0.7)	1.6 (2.0, - 1.4)	1.1 (1.2, 1.0)	1.2 (1.7, 1.1)
-	2100	1.9 (7.0), 0.4)	0.8 (1.2, 0.4)	6.5 (13.1, 1.8)	1.1 (2.5, 0.9)	1.7 (3.4, 1.3)
Increase in warming above pre-industrial (°C)	2050	1.5 (1.7, 1.5)	1.9 (2.1, 1.8)	1.6 (1.7, 1.5)	2.0 (2.0 , 1.9)	2.0 (2.1, 2.0
-	2100	1.3 (1.3, 1.3)	2.6 (2.7, 2.4)	1.3 (1.3, 1.3)	2.6 (2.7, 2.4)	2.6 (2.6, 2.6)
Cumulative Energy CO_2 emissions until 2100 (Gt CO_2)	2100	482.2 (1009.9, 307.6)	2787.6 (3213.3, 2594.0)	380.8 (552.8, -9.4)	2642.3 (2928.3, 2515.8)	2994.5 (2447.4, 2084.6)
Cumulative AFOLU CO_2 emissions until 2100 (Gt CO_2)	2100	-127.3 (5.9, -683.0)	-54.9 (52.1, -545.2)	-126.8 (153.0, -400.7)	40.8 (277.0, -372.9)	188.8 (426.6, 77.9)

Table 11. Foresigths for France (annual basis) (to be continued on next page).

Source , year of publication	Time frame	Energy frame	Bioenergies	Biofuels
ANCRE, 2014	2050	Scenarios for the energy transition	3 scenarios: - SOB reinforced sobriety: 226 PJ - ELE decarbonization by electricity : 341 PJ - DIV diversified vectors: 703 PJ	12.6 (SOB) to 60.1 PJ (DIV with 51,000 km^2)
ADEME, 2013 and 2017	2030-2050	Visions 2030-2050 Visions 2035-2050 GES reduction 70-72%	Primary demand : 1,214 PJ with 699 PJ from forest, 239 PJ from agriculture Final demand : 925 PJ with 264 PJ from methanisation, 63 PJ from gazeification and 615 PJ from heating 5,15 EJ 2 scénarios : 6,3 EJ and 3,4 EJ	Biofuels 126 PJ (only 2G) Share of methane used in transport is not given Energy wood 16,670 PJ; biogas 242 PJ ; biofuel, 3,330 PJ ; wastes 58 PJ ; Energy wood 0.7 EJ ; biogas 0.4 EJ ; biofuel 0.23 EJ ; wastes 54 PJ
SOLAGRO, 2014	2050	Afterres Crop with energy co-production : 1.3 Mha Forests : 45-50 Mm^3	In 2050: 1.5 EJ including 856 PJ from forest, 612 PJ from biogas	46 PJ from 1G and 57.6 PJ 16 from 2G
Capros *et al.*, 2016	2050	EU reference scenario 2016. Energy, transport and ghg emissions trends to 2050	Bioenergies 845 PJ	Biofuels 144 PJ
ADEME, 2016b	2050	Mix électrique 100 % renouvelable à 2050 ?	1/3 of the remaining demand for fossil fuels from industry (544 PJ) and transport (586 PJ) in 2050 is met by biofuels or biogas (293 PJ).	293 PJ from biofuels and biogas for industries and transport
■ NegaWatt, 2017	2050	- Négawatt and 100% ENR en 2050 et Afterres. - Baisse consommation 50 % - Food diet	3 main pillars: sobriety and energy efficiency on the demand side and, on the supply side, massive use of renewable energies. Implicit output nuclear energy and reducing the share of fossil fuels.	Liquid biofuels 0.5 EJ

Table 11 (continuation of the previous page).

		change - No nuclear, no fossil Release of 5-8 Mha from food to energy l	- 1.50 EJ from biomass : 0.90 EJ from solid biomass, 0.12 EJ of biofuels, 0.48 EJ biogas, 19.8 PJ wastes	
Acket *et al.*, 2017	2050	Negatep Divide by 4 CO_2 emissions due to energy Maintenance of nuclear. Reducing consumptions by 20 %	Ranging from 1256 to 1465 PJ	470 PJ from biomass. A share of electricity is needed. F
ADEME, 2018	2050	Gas mix 100% renewable in 2050?	Primary demand : 1,440 PJ , including 828 PJ from wood and by-products, 468 PJ PCS from agriculture , 54 PJ PCS from wastes and 50 PJ PCS from algae	No information 381 PJ PCS for transport
EPE Entreprises pour l'Environnement, 2019	2050	ZEN Exploring a carbon neutral France ZEN (zero emission) - forests also active as carbon sinks: 100 Mt eq CO_2/year	- 1210 PJ (673 PJ from wood, 50 PJ from MSCC and 31 PJ from wastes,	- No information - Replacement of thermal vehicles by zero-emission vehicles (GNV, electricty plug-in hybrid electric vehicle (PHEV))
ADEME et al., 2019	2030	Evaluation of the impacts of 3 biofuels development scenarios for LTECV	No information	no palm oil imports 3 scenarios, established at 213 PJ /year, to meet the objective of 15% renewable energy in transport by 2030,.They differ in the development of advanced fuels: 3 % in: scenario 1 : RED II trend, 7 % in scenario 2 Maxi G2, 1 % in scenario 3: no G2 and other fuels 5 % scenario 1, 7 % scenario 2 and 7 % scenario 3.

al., 2018, Lugato *et al.*, 2018, Schipper and Smith, 2018).
The originality of this IPCC (2019) report is to look at systems rather than targeted technology streams or innovations. The key points are:
- the limitation of energy demand, while developing carbon sequestration solutions by forest sinks in a limited scale,
- the drastic reduction of fossil fuels, in particular for the production of electricity,
- a transport revolution with the efficiency of vehicles, the change of fuel; with the electrification of the park, the use of biofuels, according to the specificities of the countries. By 2020, low-emission fuels account for only about 5 % of all fuels. However, the scenarii propose to increase from 35 % to 65 % the share of low-emission fuels by 2050,
- the structural and organizational changes in the evolution of urban infrastructure food systems, land use,
- the absence of a generic solution, each country having to react in a specific way in its context, depending on the constraints. The question of equity is at the heart of national and international policies according to the social realities of each country. For France, whatever the scenario (table 11), the major problem is the current lack of integration between the different activities, whether it is the shift or the integration of crop production and initial transformation.
It would be necessary to go from a sector approach to a (Figure 2) systemic approach capable of formulating the different uses of the biomass in terms of human needs. The bioeconomy concept offers this possibility of integrated strategies (Directorate-General for Research and Innovation, 2019). Only the Solagro's foresight study is based on this integrated vision (Table 11).
This could offer the opportunity to develop the cascading use. This is a strategy to use raw materials such as wood, or other biomass, in chronologically sequential steps as long, often and efficiently as possible for materials and only to recover energy from them at the end of the product life cycle. Increased cascading use of wood will contribute to more resource efficiency and consequently reduce pressure on the environment.

Value chain

In a market oriented approach, the classical approach is to combine the design of the supply chain with the most appropriate feedstocks for a specific conversion route and the choice of best technology options (equipments, chemicals, enzymes, etc.), with biofuels to the energy sector.
A wide range of feedstocks can be used to produce advanced biofuels. The crucial factor for the economics of using biomass for energy is the cost of the feedstock, which today ranges from a negative for waste wood (based on credit for waste disposal costs avoided) through inexpensive residual materials to the more expensive energy crops. Taking into consideration the current costs of wood and agriculture residue, the feedstock cost share is 40 % - 70 % of total production costs. Establishing practical, efficient feedstock supply chains at scale, therefore, is crucial for the success of advanced biofuels.
However the low energy content (15-20 MJ/kg.ms) comparatively to fossil fuel (35-40 MJ/kg.ms) gives a direct emission highly dependent on the transport distance of initial biomass. For SRC Poplar fertilized (JRC 2014), the typical GHG emissions (g CO_2 eq/MJ) increase from 8 g CO_2 eq/MJ for a transport distance 1-500 km, then 10 g CO_2 eq/MJ for 500-2,500 km, then 15 g g CO_2 eq/MJ for 2,500-10,000 km and finally 24 g CO_2 eq/MJ above10,000 km.
Biofuels have led to the large development of biorefineries. This concept is analogous to today's petroleum refinery, which produces multiple fuels and products from petroleum. Comparatively to chemicals, biofuels need to be produced with the same quality all over the world as motors are designed for world markets. The consequence is that biofuels

factories must guarantee specifications. Economy of scales is another feature based upon the large volume of biofuel market.
In this approach, the location of the biorefinerie is crucial. It leads to the potential development of a hundred cellulosic bioethanol plants, each with a capacity of 200 million L, in agreement with the expected EU28 volume of biofuels.
In order to overcome the collecting cost, another consequence for 2G biofuel is the need to increase the flexibility of biorefineries in order to transform broad range of feestocks. Nordic forests in EU28 present a small number of species whereas in middle and southern Europe, more species are present. For cellulosic ethanol, an industrial unit producing 40 to 160 kt ethanol / year will need 160 to 640 kt of biomass /year. As biomass availability is limited, a decrease of transport cost and related CO_2 emission looks a good compromise with a radius from 50 to 200 km. For thermochemical routes an order of magnitude is about 500 - 1000 kt/year biomass (dry basis) or about 100 - 200 kt/year biofuel production This gives finally the optimal system size and location.
Different bottlenecks are still requiring research: - the identification of market opportunities for farmers,the identification of suitable and available biomass feedstock available for biofuels production from forests. With annual crops, collection by cooperatives simplifies contracts between biomasse producers and biorefineries.
- the logistics chain to biomass pre-treatment to reduce the specific logistics costs by pretreatment at the field.,
The complexity of sustainable mobilisation of forest biomass is a matter of research since long time (EIP-AGRI Focus Group, 2018). Public incentives has not led to efficient regional forest ownership organisations. The development of user-friendly information system is lagging behind other industrial sectors. The weight of administrative structures and the local differences regarding incentives prevent the development of cross-regional value-chains and production systems.

Sustainability

The food versus fuel conflict has generated a lot of work. The determination of the influence of development of biofuels market on food prices relies on economic models. The choice of model type (partial equilibrium or general equilibrium) and data influences the results: estimates of price increases can range from a few percentage points to a few dozen percentage points. Furthermore, the different types of agrofuels have different impacts on food prices. The development of methods, including typologies, to assess the national potential for agrofuel production taking into account available land and water, population density, food and energy needs, agricultural production, per capita income is needed globally (High-Level Expert Group, 2013).
The pilar of environmental sustainability has now shown that main feedstocks realize significant reductions of GHG for conventionnal and advanced biofuels. More research is needed for algae biofuels. In the perspective of "carbon neutrality", mobilization of agricultural biomass and forestry must also be balance with carbon storage in the grounds. The net carbon footprint of the scenarios agriculture and forestry will have to be estimated in order to to consider the consequences of the choices of silvicultural, agricultural practices, harvesting biomass and return to soil (by degradation, burial, spreading, etc.).
The search for alternative fuels to reduce emission of pollutants into the atmosphere has stimulated few scientific studies. A majority have found positive effects for biofuels (Moore *et al.*, 2017) despite some discrepeancies.
The pilar economy is still a matter of research. Depending on the level considered in the value chain, different choices may be preferable depending on the added value criteria/ha or the added value/mass of matter treated or the reduction of greenhouse gasses emitted/J or the cost €/J. The difficulty is that biofuel quality results from a tradeoff between variables such as cost, efficiency, carbon storage, availability in order to ensure a stable supply all year round.

So multiple-criteria decision analysis should be more present to solve these conflicting criteria. Information and Communications Technologies (ICT) have become an important tool in promoting agricultural value chain efficiency. Further along the chain, technologies offer considerable possibilities to enhance traceability, which is particularly relevant as certification grows in importance.
This difference fossile vs biobased has to be relativised when offset against the abatment costs. However these comparaisons have to carried out on products at the same level ot technological readiness.
Beyond the technico-economic feasibility (cost : raw material, transport, availability of infrastructures), non-market factors are sometimes critical: conformity with the system of values (the conservation of forest environments without harvesting) and the ability to secure the exchange. In the case of private forests in France, the main obstacle is consent in terms of conditions of price and quantities and workload. When a supply plan is drawn up, particularly for projects > 1 MW, corresponding to the consumption of 1,250 t wood/year, this factor is recognized as a major obstacle in France, in constrast with other European countries.

General Conclusions

One of the biggest challenges for fuels is a dual one: the need to meet rising energy demand while at the same time reducing carbon emissions. The use of biofuels is limited by the availability of sustainable grown biomass.
The complete analysis of biofuels throughout this publication demonstrates that biofuels should be part of a transition strategy toward a sustainable energy system as long as they respect sustainability criteria as any energy sources. Reduced consumption and improved energy efficiency are also leading to changes in transport impacts.
Biofuels complete the technological offer for planes (kerosene) and road transportation on long-distance journeys which, by definition, require more autonomy and the shortest filling times possible. The big strength of biofuels is that they are ready to allow a GHG reduction in transportation without major infrastructure investments.
As regional priorities and resources differ, there is no one-size-fits-all solution to this nexus, as.flexibility and adaptability vary across contexts and scales .

References

Académie des technologies-Académie de l'air et de l'espace. 2015. Quel avenir pour les biocarburants aéronautiques ?, EDP Sciences, Paris.

Acket C, Flocard H, Jeandron C, Nifenecker H, Prévot H, Seiler JM. 2017. Negatep. Diviser par quatre les rejets de CO_2 dus à l'énergie: le scénario Négatep 2017, http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdffiles/climat-energie/NegatepV-2017.pdf, last access 2020-03-07.

ADEME. 2011. Feuille de route Biocarburants avancés. https://www.ademe.fr/sites/default/ files/assets/documents/feuille-route-biocarbu rants-avances-2011-6921.pdf, last access 2020-03-07.

ADEME. 2013. Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050. France, http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/85536vision2030-2050documenttechnique.pdf, last access 2020-03-07.

ADEME. 2016a. Etat des lieux des masses de gaspillages alimentaires et de sa gestion aux différentes étapes de la chaîne alimentaire. Angers, https://www.ademe.fr/etat-lieux-masses-gaspillages-alimentaires-gestion-differentes-eta pes-chaine-alimentaire. last access 2020-10-03.

ADEME. 2016b. Mix électrique 100 % renouvelable ? Analyses et optimisations, https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations, last access 2020-03-07.

ADEME. 2017. Actualisation du scénario énergie-climat. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/ademevisions2035-50010305.pdf

ADEME. 2018. *Mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?,* https://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050, last access 2020-03-07.

ADEME, FranceAgriMer, I Care & Consult. 2019. Evaluation des impacts de 3 scénarios de développement de biocarburants pour la LTECV, *Synthèse*, 23 p.

Afzal I, Shahid A, Ibrahim M. 2017. *Microalgae: A promising feedstock for energy and high-value products.* In Zia KM, Zuber M, Ali M (eds). *Microalgae*. Pub Elsevier Sci.

Anastas P, Warner J. 1998. *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press, New York.

Ballerini D. 2011. *Les biocarburants - Etat des lieux, perspectives et enjeux du développement.* Editions Technip, Paris.

Banoun S, Caussade P, Roy C. 2015. *Les biocarburants aéronautiques en France Perspectives de développement de leur production et de leur usage à l'horizon 2020.* Rapport du Commissariat général au développement durable.

Baral N, Rabotyagov S. 2017. How much are wood-based cellulosic biofuels worth in the Pacific Northwest? Ex-ante and ex-post analysis of local people's willingness to pay. *Forest Policy and Economics,* 83, 99-106.

Beringer T, Lucht W, Schaphoff S. 2011. Bioenergy production potentiel of global biomass plantations under environmental and agricultural contraints. *GCB Bioenergy*, 3, 299-312.

BioEnergy Europe. 2020. www.bioenergy-europe.org, last access 2020-03-06.

Bispo A, Andersen L, Angers DA, Bernoux M, Brossard M, Cécillon L, Comans RN J, Harmsen J, Jonassen K, Lamé F, Lhuillery C, Maly S, Martin E, Mcelnea AE, Sakai H, Watabe Y, Eglin TK. 2017. Accounting for Carbon Stocks in Soils and Measuring GHGs Emission Fluxes from Soils: Do We Have the Necessary Standards?, *Frontiers in Environmental Science*. 5, 41. https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00041, last access 2020-03-07.

Bockey D. 2019. The significance and perspective of biodiesel production – A European and global view. Oils&fats, *Crops and Lipids,* 26, 40-47.

BP. 2019. *BP Energy Outlook 2019, Evolving transition 2040*. In BP. https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2019-region-insight-global-et.pdf, last access 2020-03-07.

Camia A, Robert N, Jonsson R, Pilli R, García-Condado S, López-Lozano R, van der Velde M, Ronzon T, Gurría P, M'Barek R, Tamosiunas S, Fiore G, Araujo R, Hoepffner N, Marelli L, Giuntoli J, 2018. *Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN978-92-79-77237-5, doi:10.2760/539520, JRC109869.

Capros, P, De Vita A, Tasios N, Siskos P, Kannavou M, Petropoulos A, Evangelopoulou S, Zampara M, Papadopoulos D, Paroussos L, Fragiadakis K, Tsani S, Fragkos P, Kouvaritakis N, Höglund-Isaksson L, Winiwarter W, Purohit P, Gomez-Sanabria A, Frank S, Forsell N, Gusti M, Havlík P, Obersteiner M, Witzke HP, Kesting M.

2016. *EU reference scenario 2016: energy, transport and GHG emissions trends to 2050*. European Commission, Brussels, Belgium.

Colin A, Thivolle-Cazat A. 2016. *Disponibilités forestières pour l'énergie et les matériaux à l'horizon 2035*. Rapport ADEME, IGN, et FCBA. http://www.ademe.fr/disponibilites-forestieres-lenergiemateriaux-a-lhorizon-2035, last access 2020-03-07.

Colonna P. 2006. *La chimie verte*. Editions Tec&Doc, Paris.

Colonna P, Valceschini E. 2017. *The bio-economy: towards a new organization of agricultural and industrial systems ?* In *Transformations and transitions in agriculture and food production*, Editions Gilles Allaire, Benoit Daviron/Editions Quae, 167-180.

Creutzig F, Ravindranath NH, Bernde SG., Bolwig S, Bright R, Cherubini F, Chum H, Corbera E, Delucchi M, Faaij A, Fargione J, Haberl H, Heath G, Lucon O, Plevin R, Popp A, Robledo-Abad C, Rose S, Smith P, Stromman A, Suh S, Masera O. 2015. Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *GCB Bioenergy*, 7, 916–944.

Dammer L, Bowyer C, Breitmayer E, Eder A, Nanni S, Allen B, Carus M, Essel R. 2016. Mapping Study on Cascading Use of Wood Products. *World Wide Fund For Nature.*

Deleuze C. 2017. *Quel rôle joue la forêt dans la sequestration du carbone atmosphérique ?*, Renecofor. Beaune, 11-13.

Demolis C, Dereix C, Vallance M. 2015. *La filière forêt bois.* Rapport n°14060, CGAER, Paris.

Directive européenne 19/06/2018 - Regulation (EU) 2018/841. 2018. I*nclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU*, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R0841, last access 2020-03-07.

Directorate-General for Research and Innovation. 2012. *Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe,* https://publicationseuropa. eu/en/publication-detail/-/publication/ 1f0d8515-8dc0-4435-ba53-9570e47dbd51, last access 2020-03-07.

Downing M, Eaton LM, Graham RL Langholtz MH, Perlack RD, Turhollow AFJ, Stokes B, Brandt CC. 2011. *US billion-ton update: biomass supply for a bioenergy and bioproducts industry*. (No. ORNL/TM-2011/224). Oak Ridge National Laboratory, Oakridge, TN, USA.

Dupraz C, Capillon A. 2005. L'agroforesterie: une voie de diversification écologique de l'agriculture européenne ?, *Cahier d'étude DEMETER - Économie et Stratégies agricoles*, Paris.

Dussud F-X, Guggemos F, Riedinger N. 2018. *Bilan énergétique de la France pour 2016.* Commissariat général au développement durable, Paris.

EIP-AGRI Focus Group. 2018. *Sustainable mobilisation of forest biomass.* https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/focus-groups/sustainable-mobilisation-forest-biomass, last access 2020-03-07.

Enerdata, 2019. *Global energy Trends*, 2019 Edition.

EPE Entreprises pour l'Environnement. 2019. *Zero Emission nette 2050. Imaginer une France neutre en carbone*. http://www.epe-asso.org/zen-2050-imaginer-et-construire-une-france-neutre-en-carbone-mai-2019/, last access 2020-03-07.

European Patent Office. 2020. https://worldwide.espacenet.com/advancedSearch?locale=en_EP, last access 2020-03-06.

Eurostat. 2016. *Agriculture, forestry and fishery*

statistics. 2016. http://ec.europa.eu/eurostat, last access 2020-03-06.

ExxonMobil. 2018. *Explorez les perspectives énergétiques: perspective à l'horizon 2040,* https://corporate.exxonmobil.com /energy-and-environment/energy-resources/out-look-for-energy, last access 2020-03-06.

FAO. 2016. *State of the world's forests 2016. Forests and agriculture: land-use challenges and opportunities*. Rome. http://www.fao.org/3/a-i5588e.pdf, last access 2020-03-07.

Fischer G, Schrattenholzer L. 2001. Global potential through 2050. *Biomass Bioenergy,* 20, 151-159.

Finkbeiner M. 2014. Indirect land use change – help beyond the hype?, *Biomass Bioenergy,* 62, 218-221.

Francis C, Lieblein G, Gliessman S, Breland TA. 2003. Agroecology: The Ecology of Food Systems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22, 99–118.

Galibert M, Magrum M, Morin G-A. 2015. *Valorisation agricole et forestière de l'espace rural.*https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri /files/cgaaer_14064_2016_rapport.pdf, 2020-03-07.

Global Research Alliance. 2020. http://globalresearchalliance.org/research/integrative/, last access 2020-203-07.

Godard C, Boissy J, Gabrielle B. 2013. Life-cycle assessment of local feedstock supply scenarios to compare candidate biomass sources. *Global Changes Biology-Bioenergy,* 5, 16-29.

Greenpeace international, Global wind energy Council, SolarPowereurope. 2015. *Energy [r]evolution: a sustainable world energy outlook 2015. 100 % renewable energy for all.* https://slidelegend.com/energy-revolution-greenpeace_5a49c4a71723dd31cc3542ca.html, last access 2020-203-07.

Guinard L, Thivolle-Cazat A, Weiler G. 2016. Etude de la disponibilité en bois pour l'énergie et les matériaux en France, à l'horizon 2035. *FCBA Info,* avril 2016

Hacbarth A, Madlener R. 2016. Willingness-to-pay for alternative fuel vehicle characteristics: A stated choice study for Germany. *Transportation Research Part A Policy and Practice*. 85, 89-111.

Harper AB, Powell T, Cox PM, House J, Huntingford C, Lenton TM, Sitch S, Burke E, Chadburn SE, Collins WJ, Comyn-Platt E, Daioglou V, Doelman JC, Hayman G, Robertson E, van Vuuren D, Wiltshire A, Webber CP, Bastos A, Boysen L, Ciais P, Devaraju N, Jain AK, Krause A, Poulter B, Shu S. 2018. Land-use emissions play a critical role in landbased mitigation for Paris climate targets. *Nature Communications*, 9, 2938-2951.

High-Level Expert Group/Groupe d'experts de haut niveau. 2013. *Agrocarburants et sécurité alimentaire*. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition, Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome.

International Energy Agency. 2014. *World Energy Outlook 2014.* IEA, France. http://www.worldenergyoutlook.org/publications/wea-2014/, last access 2020-03-07.

International Renewable Energy Agency. 2016. inrena.org/publications.

International Renewable Energy Agency. 2018. inrena.org/publications.

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2018. *Mitigation pathways compatible with 1.5 °C in the context of sustainable development*, 2, https://www.ipcc.ch/report/sr15/mitigation-pathways-compatible-with-1-5c-in-the-context-of-sustainable-4-development/, last access 2020-03-07.

Intergovernmental Panel on Climate Change

(IPCC). 2019. *Interlinkages between Desertification, Land Degradation, Food Security and GHG fluxes: synergies, trade-offs and Integrated Response Options*. https://www.ipcc.ch/srccl/, last access 2020-03-07.

JRC. 2014. Solid and gaseous bioenergy pathways: input and GHG emissions Calculated according the methodology set in COM (2010) 11 and SWD, 259, https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/solid-and-gaseous-bioenergy-pathways-input-values-and-ghg-emissions-calculated-according, last access 2020-03-07.

Kallas, Z, Gil JM. 2015. Do the Spanish want biodiesel? A case study in the Catalan transport sector. *Renewable energy*, 83, 398-406.

Kalverkamp M., Karbe N. 2019. *Comparability of Life Cycle Assessments: Modelling and Analyzing LCA Using Different Databases*. In Pehlken A, Kalverkamp M, Wittstock R (eds), *Cascade Use in Technologies 2018.* Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Kampman B, Leguijt C, Scholten T, Tallat-Kelsaite J, Bruckmann R, Maroulis G, Leschen JP, Meesters K, Sikirica N, Elbersen B, 2016. *Optimal use of biogas from waste streams. An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020*. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/cedelft3g84biogasbeyond2020finalreport.pdf, last access 2020-03-07.

Khachatryan H. Joireman J. Casavant K. 2011. *Investigating Consumer Preferences for Biofuels: The Effects of the Consideration of Future Consequences.* FPTI Working Paper #3.

Kluts I, Wicke B. Leemans R. Faaij A. 2017. Sustainability constraints in determining European bioenergy potential: A review of existing studies and steps forward. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 719–734.

Koizumi T. 2015. Biofuels and food security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52,829–841.

Kraxner F, Nordstrom EM, Havlik P. 2013. Global bioenergy scenarios – future forests development, land-use implications and trade-offs. *Biomass Bioenergy,* 57, 86-96.

Kuchler M, Björn-Ola Linnér B-L. 2012. Challenging the food vs. fuel dilemma: Genealogical analysis of the biofuel discourse pursued by international organizations. *Food Policy* 37, 581–588.

Kurtek O, Montagné-Huck C, Niedzwiedz A. 2018. *Les comptes de la forêt: un outil de suivi de la forêt française 2007-2014*. Commissariat général au développement durable, Paris.

Langholtz MH, Stokes BJ, Eaton LM. 2016. *Billion-Ton Report: Advancing Domestic Resources for a Thriving Bioeconomy*, ORNL/TM-2016/160. U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, USA, Volume 1: Economic Availability of Feedstocks.

Lanzani P, Testa F, Iraldo F. 2015. Factors affecting drivers' Willingness To Pay for biofuels: the case of Italy. *Journal of Cleaner Production* 112, 2684-2692.

Le Bris P, Wang Y, Barbereau C, Antelme S, Cezard L, Legée F, D'Orlando A, Dalmais M, Bendahmane A, Schuetz M, Lacey Samuels A, Lapierre C, Sibout R. 2019. Inactivation of laccase and laccase genes in Brachypodium distachyon leads to severe decrease in lignin content and high increase in saccharification yield without impacting plant integrity. *Biotechnol Biofuels*, 12, 181.

Li T, McCluskey JJ. 2017. Consumer preferences for second-generation bioethanol. *Energy Economics,* 61, 1-7.

Liu H, Wang X, Zhang D, Dong F, Liu X, Yang Y,

Huang H, Wang Y, Wang Q, Zheng Z. 2019. Investigation on blending effects of gazoline fuel with n-butanol, DMF and ethanol on the fuel consumption and harmful emissions in a GDI vehicle, *Energies*, 12, 1845 ; doi:10.3390/en12101845.

Lugato E, Leip A, Jones A. 2018. Mitigation potential of soil carbon management overestimated by neglecting N2O emissions, *Nature Climate Change*, 8, 219-223.

Mamadzhanov A, McCluskey J, Li T. 2019. Willingness to pay for a second-generation bioethanol: A case study of Korea. *Energy Policy*, 127, 464-474.

Mantau U. 2015. Wood flow analysis: quantification of resources potentials, cascades and carbon effects. *Biomass Bioenergy*, 79, 28-38.

McClean GJ, Rowe RL, Heal KV, Cross A, Bending GD. Soshi SP. 2015. An empirical model approach for assessing soil organic carbon stock changes following biomass crop establishment in Britain. *Biomass Bioenergy,* 83, 141-51.

Meynard J-M. 2017. L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation. *Oils&fats, Crops and Lipids,* 24, 3 1-9.

Moody JW, McGinty CM, Quinn JC. 2014. Global evaluation of biofuel potential from microalgae. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 111, 8691-8696.

Moore R, Kenneth L, Thornhill K, Weinzierl B, Sauer D, D'Ascoli E, Kim J, Lichtenstern M, Scheibe M, Beaton B, Beyersdorf A, Barrick J, Bulzan D, Corr C, Crosbie E, Jurkat T, Martin R, Riddick D, Shook M, Slover G, Voigt C, White, R, Winstead E, Yasky R, Ziemba L, Brown A, Schlager H, Anderson E. 2017. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions. *Nature* 543, 411-415

Monteleone M, Cammerino AR, Garofalo P, Delivand M. 2015. Straw-to-soil or straw-to-energy ? An optimal trade off in a long term sustainability perspective. *Applied Energy*, 154, 891-899.

Munjur, Nyari J, Bartel A. 2017. Public acceptance of biofuels in the transport sector in Finland, *International Journal of Sustainable Built Environment, 6*. doi:10.1016/j.ijsbe.2017.07.008.

Nabuurs G-J, Lindner M, Verkerk H, Gunia K. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change*, 3, 9-14.

Negawatt. 2011. *Scénario négaWatt 2011, Association négaWatt,* Paris, France. https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2011-2050-39, last access 2020-03-07.

NegaWatt, 2017. *Scénario négaWatt 2017-2050*. https://negawatt.org/IMG/pdf/synthesescenario-negawatt2017-2050.pdf, last access 2020-03-07.

Nhuchhen DR, Basu P, Acharya B. 2014. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. *International Journal of Renewable Energy & Biofuels*, 6, 434-441.

OECD-FAO, 2018. *Agricultural Outlook 2018-2027. Biofuels*. www.fao.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook/2018-2027/en/, last access 2020-03-07.

Paris A, Chèze B, Gastineau P, Mahieu P-A. 2018. *Citizens in energy transition: analyzing the case of biofuels acceptance,* https://faere2018.sciencesconf.org/browse/speaker?authorid=60833, last access 2020-03-07.

Pellerin S., Bamière L. 2019. *Stocker du carbone dans les sols français, Quel potentiel au regard de l'objectif 4 pour 1000 et à quel coût ?,* Synthèse du rapport d'étude, INRA (France).

Perlack RD, Wright LL, Turhollow AF, Graham

RL, Stokes B, Erbach D. 2005. *Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply.* Oak Ridge National Lab, Oak Ridge, TN, USA.

Phillips S, Flach B, Lieberz S, Bolla S. 2019. *GAIN report 2019*. USDA Foreign agricultural service, USA.

Piriou B, Rouau X, Vaitilingom G. 2014. *Solid biofuel made of biobased powder.* INPI. N° de dépôt: 1250511, N° de brevet: FR2985735 B1, N° de dépôt international: PCT/IB2013/050364, N° de brevet international: WO2013/108177 A1.

Rains T, Winter SR, Rice S, Milner MN, Bledsaw Z, Anania EC. 2017. Biofuel and commercial aviation: will consumers pay more for it?, *International Journal of Sustainable Aviation*, 3, 217 – 232.

Rogers J, Stokes B, Dunn J, Cai H, Wu M, Haq Z, Baumes H. 2017. An assessment of the potential products and economic and environmental impacts resulting from a billion ton bioeconomy. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11, 110–128.

Roux A, Dhôte JF, Achat D, Bastick C, Colin A, Bailly A, Bastien JC, Berthelot A, Bréda N, Caurla S, Carnus JM, Gardiner B, Jactel H, Leban JM, Lobianco A, Loustau D, Meredieu C, Marçais B, Martel S, Moisy C, Pâques L, Picart-Deshors D, Rigolot E, Saint-André L, Schmitt B. 2017. *Quel rôle pour les forêts et la filière forêt-bois françaises dans l'atténuation du changement climatique? Une étude des freins et leviers forestiers à l'horizon 2050,* Rapport d'étude pour le Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, INRA et IGN.

Rulli MC, Bellomi D, Cazzoli A, de Cariolis G, D'Odorico P. 2016. The water-land-food nexus of first-generation biofuels. *Scientific Reports*, 6, 1-10.

Savvanidou E, Zervas E, Tsagarakis, Konstantinos P. 2010. Public acceptance of biofuels. *Energy Policy*, 38, 3482-3488.

Schipfer F, Kranzl L, Leclere D, Lecuc S, Forsell N, Valin H. 2017. Advanced biomaterials scenarios for the EU28 up to 2050 and their respective *biomass demand.* Biomass Bioenergy, 96, 19-27.

Searchinger T, Heimlich R, Houghton RA, Dong F, Elobied A, Fabiosa J, Tokgoz S, Hayes D, Yu TH. 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319 (5867), 1238–1240.

Searle S, Giuntoli J. 2017. *Analysis of high and low indir48ec land-use change definitions in European Union renewable fuel policy*. International Council on Clean Transportation. Working Paper 2017, 29.

SivaShankar P, WeeraheWa J, PushPakumara G, GaLaGe-Dara L. 2016. An estimation of the willingness to pay for biodiesel: a pilot study of diesel consumers. *Bio-based and Applied Economics*, 5, 27-45.

Solagro and Inddigo. 2013. *Estimation des gisements potentiels de substrats utilisables en méthanisation.* ADEME, France.

Solagro. 2014. Afterres 2050. *Un scénario soutenable pour l'agriculture et l'utilisation des terres en France à l'horizon 2050*. https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f5afterres2050-web.pdf, last access 2020-03-07.

Smeets EMW, Faaji APC, Lewandowski IM, Trukenburg WC. 2007. A bottom-up assessment and review of global bio-energy potentials to 2050. *Progress in Energy Combustion Science,* 33, 56-106.

Smith P, Bustamente M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig E, Tubiello F. 2014. *Agriculture, forestry and other land use*

(AFOLU). In Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Stechow S, Zwickel T, Minx J (eds) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New-York, NY, USA, 1-171.

Strapasson A, Falcão J, Rossberg T, Buss G, Woods J, Peterson S. 2019. Land use change and the european Biofuel Policy: the expansion of oilseed feedstocks on lands with high carbon stocks. *Oils&fats, Crops and Lipids*, 26, 39-51.

Taghizadeh-Hesary F, Rasoulinezhad E, Yoshino N. 2019. Energy and Food Security: Linkages through Price Volatility. *Energy Policy,* 128, 796–806.

Taylor G, Harris Z, Spake R. 2015. Land use change to a meta-analysis of soil carbon and GHG emissions, *Biomass Bioenergy,* 82, 27-39.

Transport and Environment. 2017. A *target for advanced biofuels. T&E's proposal for a sustainable target level in the RED II,* https://www.transportenvironment.org/, last access 2020-03-07

Turner G. 2013. *Global renewable energy market outlook 2013*, Bloomberg New Energy Finance.

Valin H, Peters D, van den Berg M, Frank S, Havlik P, Forsell N, Hamelinck C, Pirker J, Mosnier A, Balkovic J, Schmid E, Dürauer M, di Fulvio F. 2015. *The land use change impact of biofuels consumed in the EU. Quantification of area and greenhouse gas impacts*. Cooperation of Ecofys, IIASA and E4tech UE Project number: BIENL 13120.

Welfe A, Gilbert P, Thornley P. 2014. Increasing biomass resource availability through supply chain analysis, *Biomass Bioenergy*, 70, 249-66.

Villares A, Moreau C, Bennati-Granier C, Garajova S, Foucat L, Falourd X, Saake B, Berrin J-G, Cathala B. 2017. Lytic polysaccharide monooxygenases disrupt the cellulose fibers structure. *Scientific Reports,* 7, 40262; doi: 10.1038/srep40262.

Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett R, Tilman D, DeClerck F, Wood A, Jonell M, Clark M, Gordon LJ, Fanzo J, Hawkes C, Zurayk R, Rivera JA, De Vries W, Sibanda LM, Afshin A, Chaudhary A, Herrero M, Agustine R, Branca F, Lartey A, Fan S, Crona B, Fox E, Bignet V, Troell M, Lindahl T, Singh S, Cornell SE, Reddy KS, Narain S, Nishtar S, Murray CJL. 2019. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet,* 393, 448 – 492.

World Energy Council, 2019. *Exploring Innovation Pathways to 2040.* https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-scenarios-2019-exploring-innovation-pathways-to-2040, last access 2020-03-07

World Energy Outlook. 2016. https://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html, last access 2020-03-07

WWF and Ecofys. 2011. *The energy report: 100 % renewable energy by 2050*. ISBN 978-2-940443-26-0. WWF.

Sources de données

World scale:
International Energy Agency: https://www.iea.org
Connaissance des énergies: https://www.connaissancedesenergies.org/
International Renewable Energy Agency: inrena.org/publications.
FAO : www.fao.org/publications/

European Commission websites:
- DG Energy
http://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/energy-statistical-pocketbook
- Country statistics:
http://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis/country
Energy data and analysis:
http://ec.europa.eu/energy/en/data-analysis
- Eurostat: Eurostat Database:
http://ec.europa.eu/eurostat/data/database
- DG Economic and Financial Affairs: macro-economic database AMECO:
http://ec.europa.eu/economyfinance/dbindicators/ameco/indexen.htm
- Bioenergy Europe, www.bioenergyeurope.org

France
ADEME: https://www.ademe.fr/
Commissariat général au développement durable, Paris.

Rubrique
Cet article a été publié dans la rubrique « Notes de conjoncture » des *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France.*

Reçu
11 décembre 2019

Accepté
17 février 2020

Publié
20 mars 2020

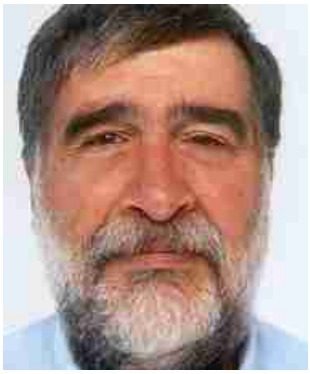
Citation
Colonna P, Duplan JP, Legrand J, Lenet E, Boissonnet G, Lorne D. 2020. Biofuels in the nexus energy-environment-food, *Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture (N3AF),* 9(3), 1-48. https://doi.org/10.58630/pubac.not.a103449.

Edité par
Jean-François Morot-Gaudry est membre de l'Académie d'agriculture de France, coordinateur du livre *Les végétaux, un nouveau Pétrole ?* (Editions Quae /INRAE, AAF).

Rapporteurs

1. Florent Allais est directeur de l'URDI ABI-AgroParisTech, professeur à AgroParisTech, adjunctpProfessor à l'Université Monash (Australie) et courtesy associate professor à l'University de Floride (USA).

2. Anonyme



Paul Colonna est membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France

ACADÉMIE d'AGRICULTURE de FRANCE

AGRICULTURE ■ ALIMENTATION ■ ENVIRONNEMENT