

Production d'énergie renouvelable de sources biologiques : état de l'art

Patrick TURCOTTE
École de technologie supérieure
Université du Québec
TURP09067305
patrick.turcotte.1@ens.etsmtl.ca

Montréal, le 26 juin 2020
 Patrick Turcotte, 2020

RÉSUMÉ

Les dernières décennies ont été fertiles en progrès dans le domaine du génie biologique et biochimique. Des avancées technologiques, particulièrement dans l'édition des génomes, ont grandement élargi l'éventail des options disponibles pour l'utilisation d'organismes vivants dans l'élaboration de solutions industrielles. L'objectif de cette dissertation est d'effectuer un tour d'horizon de l'état de l'art dans l'utilisation de plantes et de micro-organismes pour la production renouvelable d'énergie utilisable. Ce survol inclut les technologies déjà utilisées en industrie autant que les percées récentes, et examine particulièrement leurs avantages et inconvénients, leur potentiel à grande échelle, et leurs coûts.

Mots-clés: énergies renouvelables, biomasse, génétique, biocarburant, énergie biochimique, bioprocédés industriels

INTRODUCTION

Face aux différents défis énergétiques auxquels l'humanité est confrontée depuis la fin du 20^{ème} siècle, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables d'origine biologique et biochimique, comme les résidus forestiers ou le bio-éthanol, peut sembler être une solution idéale à de nombreux enjeux. Pourtant, au cours des trente dernières années, l'utilisation de sources biologiques d'énergie ne semble pas avoir partagé l'explosion d'autres sources d'énergie renouvelables tels le solaire ou l'éolien [1], et ce malgré des avancées spectaculaires dans les domaines de la génétique et du génie biologique. Ces percées scientifiques et technologiques, comme la modification du génome à l'aide de l'enzyme Cas9 (technique CRISPR [2]), permettent d'adapter plantes, levures, bactéries et algues à des fonctions spécifiques, ouvrant ainsi la porte à la conception d'organismes spécialisés dans la production d'énergie à une échelle industrielle [3]. L'objectif de cette dissertation est de clarifier l'état actuel de la production d'énergie à partir de sources biologiques, et examiner cette situation. Pour l'atteindre, la première étape a été d'effectuer un inventaire sommaire des différentes sources biologiques d'énergie disponibles à ce jour, et d'évaluer l'ampleur de leur utilisation. Ensuite, l'activité de recherche scientifique dans différents domaines liés aux sources biologiques d'énergie a été estimée à l'aide d'une approche indirecte dont la méthodologie et les résultats sont présentés dans les sections suivantes. Finalement, une réflexion sur ces résultats a été effectuée.

SOURCES BIOLOGIQUES D'ÉNERGIE

Les diverses sources biologiques d'énergie couvrent l'ensemble du spectre technologique, des formes les plus primitives (combustion du bois de type feu de camp) à la fine pointe de la science (génération d'hydrogène gazeux par des cyanobactéries génétiquement modifiées [4]). Lors de leur examen, il a rapidement été constaté qu'une tentative de classification méthodique et systématique serait un exercice complexe, à cause du grand nombre de techniques disponibles, des variations sur des approches similaires, etc. Tout particulièrement, la classification des êtres vivants auxquels font appel les diverses techniques est complexe – plantes, algues, levures, bactéries sont des catégories souvent utilisées dans le domaine et qui correspondent généralement à un certain concept lors de leur utilisation commune par les profanes, mais qui s'entrecroisent et se superposent lorsqu'on tente de remonter à leurs définitions formelles.

¹ Il est à noter que, dans le présent document, les expressions « source d'énergie » et « production d'énergie » sont utilisées afin d'alléger le texte, et incluent les concepts de collecte, de concentration, de transformation et d'entreposage d'énergie dans un but d'utilisation par l'être humain, que ce soit au niveau individuel, collectif ou industriel. De même, « sources biologiques d'énergie » est employé pour faire référence aux diverses sources d'énergie renouvelables d'origine biologique et biochimique abordées ici.

Commenté [RD1]: Le format imposé est entièrement respecté. Ce format n'est pas dogmatique en ce sens qu'il ne constitue pas un absolu. Il est imposé pour ne pas que les différents formats interviennent dans l'évaluation du travail. Ils doivent être tous semblables.

Commenté [RD2]: Titre bien choisi. Avec la structure bipartite en vogue, pour préciser le type dans ce cas particulier.

Commenté [RD3]: Résumé parfait. Court, équilibré, il comprend les résultats et la synthèse. Les mots clés sont adéquats

Commenté [RD4]: Bon renvoi, explication A1. Ce type de renvoi est facultatif mais ici il précise la pensée de l'auteur.

Commenté [RD5]: Il existe deux grands types de renvois aux références. Ici, le gabarit demande d'employer une numérotation successive. C'est ce que l'auteur fait.

Commenté [RD6]: Fin du sujet amené, la contextualisation

Commenté [RD7]: Sujet posé : but et objectif

Commenté [RD8]: Ici commence le sujet divisé. En fait une courte description du contenu.

Commenté [RD9]: Cette seconde section campe bien l'étude qui est par la suite effectuée. La classification effectuée est excellente.

Commenté [RD10]: Le style de rédaction est approprié. Pas de forme personnelle, nous, notre, nos. Par ailleurs, il apparaît évident que l'Auteur a prêté une attention particulière à la langue. Dans cette première page : pas de faute ou coquille.





Cependant, une distinction naturelle est apparue entre les techniques qui exploitent la structure et/ou les réserves d'énergie chimique de l'organisme, et celles qui reposent sur un sous-produit généré dans le cadre de ses fonctions métaboliques. Dans la première catégorie, désignée ici comme celle des « accumulateurs biologiques », l'exploitation de la ressource passe quasi-systématiquement par sa destruction. Dans la seconde catégorie, désignée ici comme celle des « transformateurs biologiques », l'organisme reste généralement vivant, au moins sur plusieurs cycles de production. Cette division est donc utilisée comme premier niveau de classification dans la présente section.

Le second niveau de classification a été établi sur la base du type d'énergie (ou du vecteur d'énergie) produit par la technique, soit la chaleur, les hydrocarbures et alcools, l'hydrogène et l'électricité.

ACCUMULATEURS BIOLOGIQUES

La catégorie des accumulateurs biologiques inclut les sources classiques comme le bois et autres plantes, mais aussi des approches plus récentes comme l'exploitation de certaines algues [5]. L'accumulation de réserves d'énergie se fait sous forme de polysaccharides ou de lipides; ces deux types de réserves peuvent être transformés et utilisés à l'échelle individuelle ou industrielle.

Production de chaleur

La combustion de matière organique (biomasse classique en tête) est la source d'énergie la plus ancienne et la plus simple à exploiter. Celle-ci est encore couramment utilisée pour la cuisson, souvent de façon peu efficace, et pour le chauffage domestique. Elle représentait 6,9% de la consommation mondiale finale d'énergie en 2018 [6].

Production d'hydrocarbures et d'alcools

La conversion de matière organique en éthanol ou divers biocarburants est courante dans certains pays, généralement dans le but de réduire leur dépendance aux carburants fossiles. Elle représente 1% de la consommation mondiale finale d'énergie en 2018 [6].

Production d'hydrogène

Au travers de la pyrolyse et de la gazéification, la biomasse peut être transformée en syngas, composé en majeure partie d'hydrogène.

Production d'électricité

Bien que certaines espèces (comme les gymnotes, par exemple) présentent des formes d'entreposage d'énergie électrique, aucun accumulateur biologique n'est utilisé comme source d'énergie électrique.

TRANSFORMATEURS BIOLOGIQUES

La catégorie des transformateurs inclut les divers micro-organismes qui transforment la matière organique, comme dans le contexte du compostage, de la fermentation, etc.

Production de chaleur

Les micro-organismes qui transforment la matière organique lors du compostage produisent une quantité significative de chaleur. Cette forme de génération d'énergie thermique est parfois utilisée dans des contextes résidentiels, mais très rarement à une échelle industrielle [7].

Production d'hydrocarbures et d'alcools

Cette catégorie inclut les divers « biocatalyseurs » responsables de la méthanisation, de la production de divers carburants comme l'éthanol. C'est le domaine de transformation le plus actif et le plus mature à ce jour.

Production d'hydrogène

Ce domaine d'activité est encore embryonnaire, et limité à des preuves de concept en laboratoire.

Production d'électricité

Ce domaine d'activité est encore embryonnaire, et limité à des preuves de concept en laboratoire.

MÉTHODOLOGIE

Afin d'estimer le niveau d'activité de recherche scientifique sur les sources biologiques d'énergie, deux mesures indirectes ont été retenues. La première, sélectionnée comme indicateur principal, est le nombre d'articles scientifiques traitant de ces sujets publiés dans la littérature spécialisée. La seconde, sélectionnée comme indicateur secondaire, est le nombre de brevets reliés aux sources d'énergie renouvelables en général et aux sources biologiques d'énergie en particulier, déposés à l'échelle internationale.

Commenté [RD11]: Remarquez le souci de conjugaison. Ce sont les « types » qui sont transformés et non les réserves. Il est important d'employer correctement la langue.

Commenté [RD12]: En français, le décimales sont exprimées par une virgule et non un point comme en anglais.



ARTICLES SCIENTIFIQUES

L'approche générale pour la mesure de l'activité de publication des articles scientifiques a été conçue ainsi :

1. Recherche d'articles scientifiques comportant certains termes dans leur liste de mots-clés
2. Inspection manuelle des résultats et nettoyage des données
3. Préparation de sous-listes additionnelles comportant ou omettant d'autres termes
4. Extraction du nombre d'articles présents dans chaque liste pour chaque année calendaire

Suite à une phase d'essais préliminaires, les paramètres suivants ont été retenus pour la recherche :

- la période de publication de 2000 à 2019, inclusivement, a été sélectionnée
- les recherches ont été limitées à 1000 retours

Après examen des sources d'articles scientifiques disponibles, les services suivants ont été retenus :

- Directory of Open Access Journals (DOAJ) ([8])
- ScienceDirect (Elsevier) ([9])
- Scopus ([10])
- Taylor & Francis ([11])
- Wiley Online Library ([12])
- Web of Science ([13])

L'étape suivante a été de déterminer une interface d'accès à chaque base de données, afin de faciliter les recherches et la collecte des résultats. La nécessité d'une interface d'extraction automatisée s'est rapidement imposée, à cause des efforts qu'auraient demandé une extraction manuelle. Le DOAJ offre une interface (API) simple et directe, mais les essais préliminaires ont démontré que les recherches retournaient peu de résultats. Cette source a donc été éliminée de la liste. Scopus et Web of Science présentent également une interface automatisée, mais celle-ci demande une authentification qui n'a pu être satisfaite. Éventuellement, il a été constaté que le moteur de recherche Google Scholar inclut les articles de ScienceDirect, Taylor & Francis, Wiley Online Library et maintes autres sources dans sa base informationnelle; il a donc été décidé d'utiliser ce service comme source de données.

Pour automatiser l'extraction, l'outil *Publish Or Perish* de Harzing ([14]) a été retenu; celui-ci offre toutes les fonctionnalités requises pour une recherche sur Google Scholar. La version Windows GUI Edition 7.22.2838.7475 a été utilisée dans le cadre de la présente étude.

Les mots-clés suivants ont été sélectionnés² :

- « renewable » ET « energy »
- « biofuel »
- « genetic engineering » ET « biomass »
- « genetic engineering » ET « biofuel »
- « genetic engineering » ET « hydrogen »
- « photovoltaic »

Le dernier terme, « photovoltaic », a été retenu pour fins de contrôle et pour donner une référence externe de comparaison.

Une fois chaque recherche complétée, les données ont été extraites de la base de données du logiciel en format CSV (*comma-separated variables*). L'inspection manuelle de ces fichiers à l'aide de Microsoft Excel a permis de déterminer que certaines entrées devaient être retirées :

- entrées dont le champ « Year » est vide (triées et effacées à l'aide de Microsoft Excel), puisqu'un des objectifs est un tri par année sur ce champ
- entrées comportant le mot « BOOK » (triées et effacées à l'aide de la commande Linux *grep*), afin de ne pas inclure les articles publiés dans des livres
- entrées comportant l'expression « patents.google.com » (triées et effacées à l'aide de la commande Linux *grep*), afin de ne pas inclure les brevets

Une fois les données nettoyées, des extractions de données supplémentaires ont été créées en recherchant et en excluant la chaîne de caractères « alga » (extraites et éliminées à l'aide de la commande Linux *grep*); cette chaîne a été préférée à « algae » afin de capturer le nom « algae » et l'adjectif « algal » avec la même commande.

Commenté [RD13]: Il existe aussi une base nommée COMPENDEX mais on comprend ici que de faire la revue en employant 6 bases, six sources est amplement suffisant pour faire le tout de la question

Commenté [RD14]: Cette dernière phrase est cruciale. Dans le contexte, on spécifie la version du logiciel employé de manière à ce qu'un lecteur puisse REFAIRE la même opération lui-même. Dans un article de simulation numérique, l'auteur doit spécifier TOUS les paramètres numériques (maillages, convergence, logiciel, initialisation, etc). Similairement, lorsque l'article concerne du travail expérimental, le banc d'essais, les appareils de mesure et l'incertitude de mesure de ces appareils doivent être discutés.

² Afin de maximiser la taille des échantillons disponibles, l'anglais a été systématiquement utilisé lors des recherches.



Enfin, la dernière étape a été de déterminer le nombre d'articles publiés à chaque année de la période visée; ce décompte a été effectué à l'aide d'un très simple utilitaire, *getyear*, développé dans ce but sous Linux. C'est l'information fournie par cet utilitaire qui a servi à l'élaboration des tableaux et graphiques présentés dans la section Résultats.

Les différentes commandes utilisées sont présentées à l'annexe [A](#).

BREVETS

Pour l'évaluation des brevets publiés, les données de l'EPO (Office européen des brevets, [15]) ont été utilisées. L'organisme travaille en étroite collaboration avec les bureaux de brevets de plusieurs pays; ses données sont donc considérées ici comme un échantillonnage représentatif à l'échelle internationale.

Ces données sont extraites par l'IRENA (*International Renewable Energy Agency*, [16]), qui met à la disposition du grand public une interface graphique d'affichage des données de l'EPO ([17]).

Les données annuelles (et non cumulatives) ont été utilisées, sur la plage complète des données disponibles (2001-2013). Les données des dernières années ne sont pas disponibles, à cause des délais de traitement des brevets.

Commenté [RD15]: Vous comprendrez que le détail de toutes les commandes aurait pu être inséré ici. Mais, cela aurait alors alourdi le texte. Ce n'est PAS essentiel pour comprendre l'analyse qui va suivre. Il faut cependant les annexer si on désire être en mesure de reprendre cette étude pour la refaire ou la prolonger. D'où le besoin de les insérer en annexe. Un critère d'évaluation des travaux sert à évaluer les habiletés à départager essentiel et accessoire.

Commenté [RD16]: Ce commentaire spécifique : disponible, est important. Si l'auteur ne le mentionne pas, on pourrait demander pourquoi il n'a pas employé une plage plus récente de données. Cette précision vient indiquer que rien n'est « disponible » après 2013 en ce qui a trait aux brevets.

RÉSULTATS

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Toutes les données obtenues lors des recherches dans les articles scientifiques sont présentées à l'annexe B. Certaines répartitions ont été jugées représentatives et sont illustrées ici³.

La figure 1 présente le nombre d'articles publiés chaque année, de 2000 à 2019, qui contiennent les termes « *genetic engineering* » et « *biofuel* ». On peut y observer une tendance claire – faible activité de 2000 à 2005, nette croissance de 2005 à 2013, et nette décroissance de 2013 à 2019. De façon générale, cette tendance se retrouve pour les articles contenant « *biofuel* » et « *biomass* ».

Commenté [RD17]: Figure citée.

Commenté [RD18]: Figure décrite, elle sera discutée dans la section suivante, elle ne l'est pas directement sous la figure.

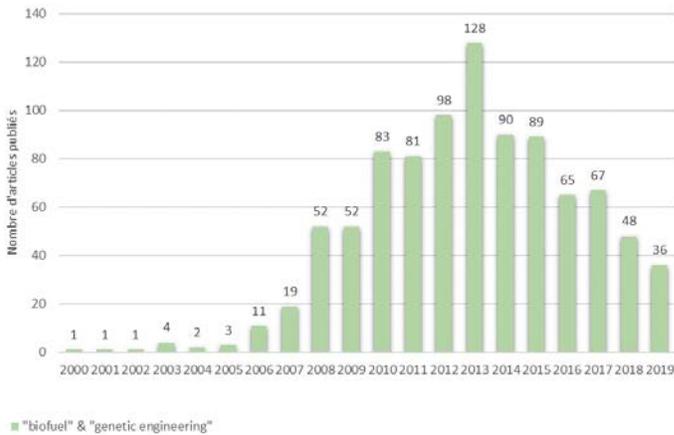


Figure 1 : Répartition des articles contenant les termes « *biofuel* » et « *genetic engineering* », 2000-2018

En exigeant la présence du terme « *algae* » la tendance générale demeure la même, tel qu'illustré à la figure 2.

Commenté [RD19]: J'ai quelque peu augmenté la taille de cette figure pour que la police qu'elle comporte soit à peu près de la taille de celle du texte principal.

Idem pour les suivantes : la taille passe de 64% à 80%.

³ Il est à noter que, avec la limite de 1000 articles imposée lors des recherches, les valeurs spécifiques ne sont pas représentatives, et donc peu utiles – c'est l'évolution qui est d'intérêt.



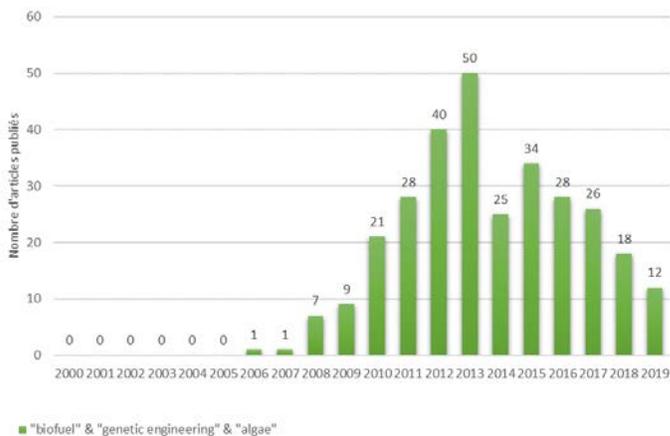


Figure 2 : Répartition des articles contenant les termes « biofuel » et « genetic engineering » et « algae », 2000-2018

Afin de déterminer si ces tendances sont spécifiques aux sources biologiques d'énergie, un examen similaire est effectué pour le terme « photovoltaïc » d'une part, et pour « renewable energy » d'autre part; les résultats sont présentés à la figure 3 et à la figure 4.

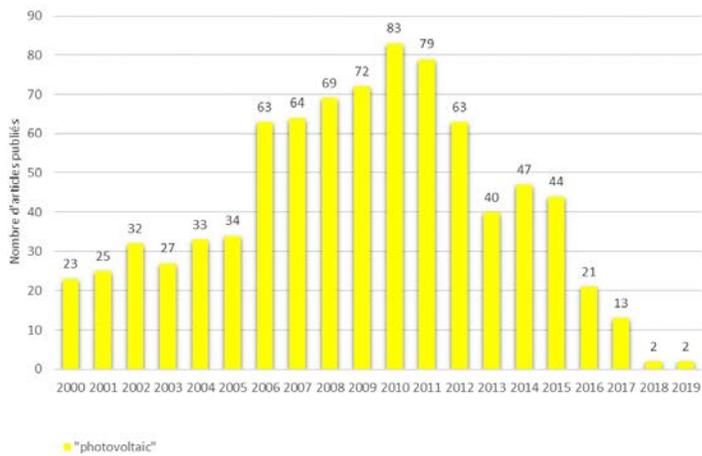


Figure 3 : Répartition des articles contenant le terme « photovoltaïc », 2000-2018



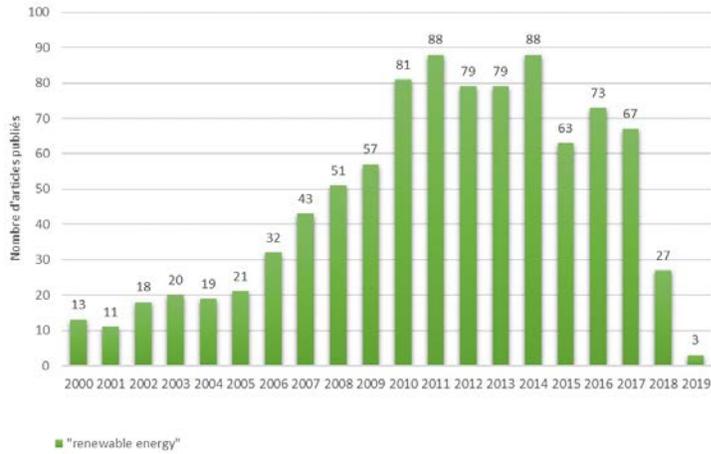
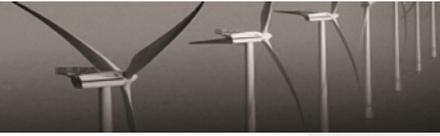
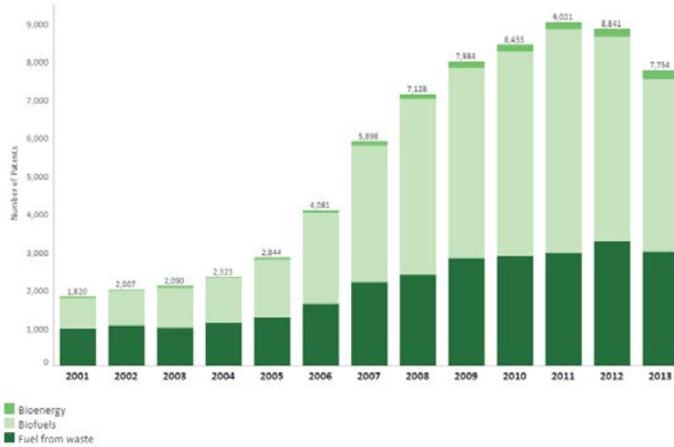


Figure 4 : Répartition des articles contenant les termes « renewable energy », 2000-2018

BREVETS

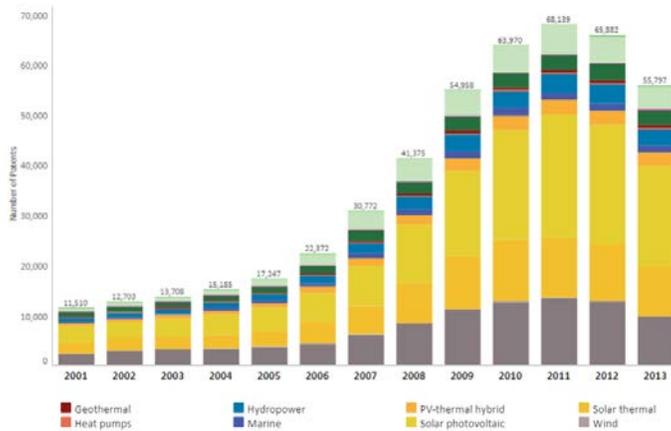
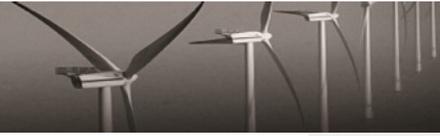
Deux synthèses ont été effectuées pour les données des brevets. La figure 5 illustre la répartition annuelle du nombre de brevets enregistrés dans la catégorie générale des sources d'énergies biologiques (« bioenergy »), et la figure 6 illustre la répartition annuelle du nombre de brevets enregistrés pour les énergies renouvelables, de façon générale. On note également sur cette dernière le segment lié à l'énergie solaire (photovoltaïque et thermique), en teintes de jaune, qui permet d'effectuer des comparaisons avec la figure 3.



Source: IRENA INSPIRE (www.irena.org/inspire) based on data from EPO PATSTAT and also uses the Climate Change Mitigation Technologies (Y02) classification by EPO. It provides comprehensive, but by no means exhaustive information on patents filed for renewable energy worldwide. ©IRENA

Figure 5 : Brevets liés aux sources biologiques d'énergie, 2001-2013.





Source: IRENA INSPIRE (www.irena.org/inspire) based on data from EPO PATSTAT and also uses the Climate Change Mitigation Technologies (CC2) classification by EPO. It provides comprehensive, but by no means exhaustive information on patents filed for renewable energy worldwide. ©IRENA

Figure 6 : Brevets liés aux énergies renouvelables, 2001-2013

Commenté [RD20]: Dans les deux figures, la police de caractère est trop petite. En rendant le texte lisible, les figures prennent un espace trop important.

ANALYSE ET DISCUSSION

AVENUES PRINCIPALES D'UTILISATION

L'examen de l'état des sources biologiques d'énergie, et leur mise en contexte dans la situation énergétique mondiale actuelle, fait ressortir trois catégories d'utilisation où celles-ci ont un potentiel particulièrement intéressant : le transport, l'appoint aux sources renouvelables, et l'exploitation de matières non-exploitées.

Malgré toutes les qualités et les avantages des principales sources d'énergie renouvelables (hydro-électricité, solaire, éolien), l'absence de solutions flexibles d'accumulation d'énergie électrique handicape significativement leur utilisation lorsque le consommateur final est mobile. Le domaine des transports est un énorme consommateur d'énergie (32% de la demande finale mondiale en 2019 [6]), dont 96,7% est d'origine non-renouvelable ([6]). Bien que des progrès spectaculaires aient été effectués et se poursuivent dans le domaine des batteries et autres accumulateurs, facilitant l'adoption des véhicules électriques, les vitesses de recharge sont toujours un obstacle majeur à leur emploi. De plus, le transport aérien nécessite une densité d'énergie massique (entre 40 et 45 MJ/kg pour les carburants aériens standard [18]) bien au-delà des capacités qu'on peut entrevoir dans un futur proche chez les batteries (moins de 2 MJ/kg en 2020 [18]). Finalement, même une fois que les technologies et l'infrastructure seront disponibles, le remplacement de l'énorme parc de véhicules conçus pour utiliser des carburants d'origine pétrolière va s'étaler sur des décennies.

Ainsi, l'énergie chimique⁴ demeure une option de choix, tout particulièrement si des carburants de sources biologiques renouvelables pouvant directement remplacer des carburants d'origine pétrolière sont utilisés (carburants de remplacement, ou « drop-in »). Des efforts significatifs ont été menés en ce sens, mais certains obstacles sont présents [19]:

- sources biologiques : tel que mentionné, le transport représente une grande fraction de la consommation totale d'énergie, et son remplacement complet par des sources renouvelables demanderait une très grande quantité de biomasse, ce qui entraînerait rapidement des problèmes de réduction des espaces naturels, de monoculture et de compétition avec l'agriculture alimentaire. Une augmentation de la productivité, une diversification des ressources, et l'utilisation d'espaces et d'organismes dont l'exploitation n'est pas en compétition avec la nourriture sont des pistes de solution.
- caractéristiques physiques : la majorité des carburants biologiques ne présentent pas les mêmes caractéristiques physiques que les carburants d'origine fossile; par exemple, leur viscosité par temps froid peut prévenir leur utilisation dans les moteurs existants, ce qui est particulièrement un problème dans le cas de l'aviation. Des progrès ont déjà été effectués

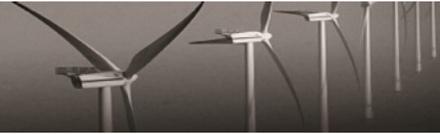
Commenté [RD21]: L'auteur fait le choix de séparer la PRÉSENTATION de ses résultats de leur DISCUSSION. Ce faisant, il s'impose de créer une section spécifique à la discussion des résultats. Cela n'est pas obligatoire. Cela permet au lecteur de parcourir l'ENSEMBLE des résultats AVANT de se pencher sur leur analyse.

C'est une excellente pratique.

Le cœur de ce travail comporte donc : méthodologie, résultats et discussion.

⁴ Bien que la plupart des batteries électriques actuelles convertissent l'électricité en énergie chimique, et vice-versa, dans le cadre de leur opération, le concept est ici réservé aux formes plus « classiques » tels les hydrocarbures, les alcools, l'hydrogène, etc.





sur ce plan, avec la création de carburants biologiques dont le comportement ressemble plus à celui des carburants classiques.

- énergie de production : la plupart des procédés industriels de création de carburants biologiques nécessitent un apport énergétique, ce qui nuit au rendement total du processus. Cependant, cette production pouvant être centralisée, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables (incluant de l'énergie thermique de basse à moyenne qualité) peut aisément pallier ces lacunes.
- émission de CO₂ : contrairement à d'autres vecteurs énergétiques, l'utilisation de carburants de remplacement dans les moteurs à combustion interne entraîne l'émission de CO₂ au point d'utilisation, et ce point est, par définition dans le contexte des transports, mobile. Cependant, contrairement aux carburants d'origine fossile, une quantité de CO₂ équivalente a théoriquement été absorbée par les accumulateurs (et, parfois, par les transformateurs) lors de la création du carburant.

Lorsque l'hydro-électricité n'est pas disponible, les options principales de sources renouvelables d'énergie sont le solaire et l'éolien. Toutes deux souffrent cependant d'un problème majeur – la production est entièrement assujettie à la disponibilité de la ressource, et celle-ci est variable, tant de façon prévisible (cycles diurnes) qu'imprévisible (aléas météorologiques). Afin de compenser les problèmes d'intégration que cette variabilité entraîne et augmenter le crédit de capacité de ces ressources, elles sont habituellement jumelées à des centrales thermiques à carburants d'origine fossile (dérivés de pétrole, charbon). Le remplacement de ces carburants par des sources biologiques d'énergie est généralement facile, puisque plusieurs méthodes sont disponibles pour générer l'énergie thermique requise. Cependant, certains des enjeux déjà mentionnés sont également présents pour cet usage :

- sources biologiques : ici encore, les besoins de biomasse seraient importants, et les besoins de génération d'énergie risqueraient d'entrer en conflit avec d'autres besoins tout aussi importants, sinon plus.
- énergie de production : lorsque la ressource est abondante, l'énergie solaire et/ou éolienne excédentaire peut être utilisée dans le cadre de la préparation des sources biologiques d'énergie, permettant ainsi une forme d'accumulation et d'entreposage de ce surplus.
- émission de CO₂ : en plus de la compensation des émissions au niveau de l'absorption par les accumulateurs, l'utilisation centralisée des sources biologiques d'énergie permet la capture du CO₂ généré.

Enfin, la troisième catégorie d'utilisation est l'exploitation de matières organiques « perdues » - déchets industriels inutilisés, ordures non-recyclables, rejets agricoles, boues extraites des systèmes d'égouts urbains, etc. Non seulement ces matières peuvent-elles être exploitées comme sources d'énergie et autres ressources, mais leur enfouissement en fait souvent des sources non-négligeables de CO₂ et de méthane, contribuant aux problèmes d'effet de serre et de changements climatiques. Ces matières peuvent ainsi être valorisées et devenir des sources non-négligeables d'électricité, d'engrais ou d'eau potable [20].

Pour surmonter certains de ces défis et rendre ces approches plus attrayantes, des améliorations peuvent être apportées aux accumulateurs et aux transformateurs biologiques, ainsi qu'aux techniques utilisées; celles-ci sont discutées plus avant dans la prochaine section.

OÙ VA LA RECHERCHE?

La lecture d'un échantillon des articles scientifiques sur les sources biologiques d'énergie permet de bâtir un certain portrait de l'état de la situation, et de la direction que prend la recherche en ce domaine.

Les avantages principaux des accumulateurs biologiques se résument ainsi :

- leur exploitation est généralement plus simple;
- l'accumulation d'énergie est une fonction fondamentale de ces organismes, optimisée et améliorée par des millions d'années d'évolution; et
- des moyens simples et directs sont disponibles pour la transformation de l'énergie chimique accumulée.

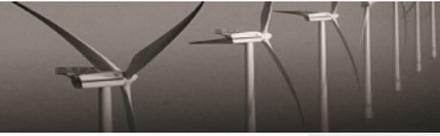
À haut niveau, les améliorations qu'on désire apporter à ces organismes sont les suivantes :

- augmentation du rendement de conversion énergie solaire/énergie chimique, augmentant donc la productivité [21]
- augmentation de la capacité de stockage de l'énergie chimique, augmentant également la productivité [21]
- facilitation de l'accès à l'énergie chimique entreposée, ce qui réduit les ressources (énergétiques et non-énergétiques, comme les catalyseurs) requises pour récupérer cette énergie [22]
- adaptation de l'organisme à des conditions de vie spécifiques, ce qui permet l'exploitation de la ressource dans des environnements où elle entre moins en compétition avec d'autres ressources [23]

En ce qui a trait aux transformateurs biologiques, leurs avantages principaux sont les suivants :

- on dispose d'une plus grande flexibilité au niveau des vecteurs d'énergie disponibles; et





- l'organisme n'est pas détruit dans le processus de récupération de l'énergie, et peut donc continuer à remplir ses fonctions.

Ici, la recherche vise donc à améliorer les caractéristiques suivantes:

- adaptation de l'organisme à des conditions de vie spécifiques, ce qui permet de réduire les ressources requises pour son exploitation à une échelle industrielle [24]
- augmentation du rendement des processus métaboliques, augmentant donc la productivité [25]
- emphase ou spécialisation des processus métaboliques désirables, augmentant également la productivité [4]

Tel que présenté dans la section Résultats, on note une claire activité sur le plan de la recherche dans le domaine des sources biologiques d'énergie, particulièrement sur la manipulation génétique des organismes impliqués, avec une forte emphase sur les différentes facettes permettant une augmentation de la productivité (amélioration du rendement de conversion de l'énergie solaire, amélioration de l'accessibilité à l'énergie entreposée) et une réduction de la pression sur les environnements naturels et l'agriculture alimentaire. Cependant, après une croissance marquée de 2006 à 2012-2013, la proportion des articles chute de façon soutenue jusqu'à 2020. Cette tendance générale se manifeste dans toutes les facettes étudiées.

Il est cependant à noter que, tel que présenté sur les figures 3 et 4, cette tendance est également présente, quoique de façon moins marquée, dans la recherche sur les énergies renouvelables en général, et sur l'énergie solaire photovoltaïque⁵.

Ces observations sont confirmées par les données liées aux brevets; bien que celles-ci soient incomplètes, la phase de croissance est clairement présente, et la tendance à la décroissance se dessine à partir de 2011, bien que l'absence des données de 2014-2020 ne permette pas de confirmer celle-ci.

Il semble ainsi y avoir eu une tendance générale à la croissance de 2000 à 2013 et à la décroissance de 2013 à 2020, mais plus lourde et plus marquée dans les sources biologiques d'énergie. Les articles consultés et les données recueillies ne présentent pas de pistes d'explication de ce phénomène.

CONTRAINTES ÉCONOMIQUES

Un autre élément qui est ressorti des articles scientifiques est qu'en ce moment, l'obstacle majeur à l'adoption de ces technologies est leur coût, celui-ci étant quasi-systématiquement supérieur à celui de solutions comparables faisant usage de combustibles fossiles. Bien que cette contrainte soit, au demeurant, normale dans une économie de marché, il est regrettable que la comparaison soit faussée par diverses subventions et par l'omission des coûts en amont et en aval des différentes technologies.

À ce chapitre, l'ajustement des incitatifs fiscaux (tant positifs que négatifs) pour mieux refléter les avantages et défauts intangibles des diverses options viendrait probablement changer rapidement et drastiquement la donne, et rendre les sources biologiques d'énergie beaucoup plus attrayantes.

CONCLUSION

Le sujet des sources biologiques d'énergie est complexe, plus complexe qu'anticipé au début de son exploration. L'inventaire et l'exercice de classification ont permis de structurer l'approche, et ont servi de fondation à l'élaboration de la démarche d'analyse et à l'exploration des articles scientifiques. Enfin, la lecture de ces articles et l'extraction de la fréquence de publication de 2000 à 2019 ont cerné et alimenté la réflexion et la discussion, permettant entre autres de déterminer que trois grandes opportunités se démarquent : la création de carburants de remplacement pour les transports, l'utilisation comme source d'énergie d'appoint aux nouvelles sources renouvelables d'énergie (solaire, éolien), et l'exploitation de matières actuellement enfouies.

Les données indiquent clairement une croissance du nombre d'articles sur divers aspects des sources biologiques d'énergie de 2000 à environ 2013, suivi d'une chute significative de 2013 à 2019. Bien que l'intérêt et la valeur de ces technologies soit indéniable, une grande question demeure – pourquoi cette apparente chute d'intérêt après 2013? Ce n'est certainement pas parce que tous les problèmes sont résolus, ou à cause d'un apparent manque d'avenir. Une piste possible serait un tarissement des subventions autour de cette année, mais considérant l'échantillon à l'échelle globale, il est peu probable que tous les pays aient pris la même décision au même moment. Peut-être que l'énorme poids scientifique des États-Unis fait qu'un changement de politique unilatéral est suffisant pour causer ce phénomène. D'une façon ou d'une autre, la question mérite d'être explorée, dans le but d'accélérer la recherche et d'aider à l'adoption de ces technologies.

Commenté [RD22]: C'est un commentaire éditorial qui sans être inapproprié n'est habituellement pas placé en début de conclusion. On rappelle le plus souvent le contexte, les objectifs, la méthodologie et les résultats. S'En suivent des commentaires synthèse qui viennent confirmer la discussion.

Commenté [RD23]: Ceci est une rappel succinct et direct des principaux résultats.

Commenté [RD24]: Ici on ouvre la porte à cette section de la conclusion que l'on appelle « l'ouverture ». On y dépasse les cadres de l'étude, on fait des recommandations et on y parle de futurs prolongements de cette étude.

Mis en forme : Français (Canada)

⁵ La limite imposée au nombre d'articles recherchés ne permet pas d'effectuer une analyse comparative directe, mais seulement d'observer les tendances.





REFERENCES

- [1] bp (2020), *Statistical Review of World Energy 69th edition*, pp53-57, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-renewable-energy.pdf>
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cas9>, visité le 23 juin 2020
- [3] Altpeter, F., et. al. (2016), Advancing Crop Transformation in the Era of Genome Editing, *The Plant Cell Jul 2016*, 28 (7) 1510-1520, <http://www.plantcell.org/content/28/7/1510.full>
- [4] Appel, J., Hueren, V., Boehm, M. et al. (2020), Cyanobacterial in vivo solar hydrogen production using a photosystem I–hydrogenase (PsaD-HoxYH) fusion complex. *Nat Energy*, 5 458–467, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-0609-6>
- [5] Radakovits, R., Jinkerson, R. E., Darzins, A., & Posewitz, M. C. (2010), Genetic engineering of algae for enhanced biofuel production, *Eukaryotic cell*, 9(4) 486–501, <https://doi.org/10.1128/EC.00364-09>
- [6] REN21 (2020), *Renewables 2020 Global Status Report*, pp26-51 pp80-145, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf
- [7] <https://www.permaculturenews.org/2011/12/15/the-jean-pain-way/>, visité le 26 juin 2020
- [8] <https://doaj.org/>
- [9] <https://www.sciencedirect.com/>
- [10] <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>
- [11] <https://www.tandfonline.com/>
- [12] <https://onlineibrary.wiley.com/>
- [13] <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>
- [14] <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- [15] <https://epo.org/>
- [16] <https://www.irena.org/>
- [17] <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Innovation-and-Technology/Patents-Evolution>, visité le 26 juin 2020
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density, visité le 26 juin 2020
- [19] Araújo, K., Mahajan, D., Kerr, R., & Silva, M. da. (2017), Global Biofuels at the Crossroads: An Overview of Technical, Policy, and Investment Complexities in the Sustainability of Biofuel Development, *Agriculture*, 7(4) 32 MDPI AG, <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture7040032>
- [20] <https://www.entrepose.com/fr/reference/ametyst-unite-de-methanisation-de-montpellier-agglomeration/>, visité le 26 juin 2020
- [21] Paudel, Sudip and Menze, Michael A. (2014), Genetic engineering, a hope for sustainable biofuel production: review, *International Journal of Environment*, 3(2), http://thekeep.eiu.edu/bio_fac/273
- [22] Sticklen, M. B. (2008), Plant genetic engineering for biofuel production: towards affordable cellulosic ethanol, *Nature Reviews/Genetics*, 9 433-443, <https://www.nature.com/scitable/content/Plant-genetic-engineering-for-biofuel-production-towards-45102/>
- [23] Yin, Hengfu & Chen, Chun & Yang, Jun & Weston, David & Chen, Jin-Gui & Muchero, Wellington & Ye, Ning & Tschaplinski, Timothy & Wullschleger, Stan & Cheng, Max) & Tuskan, Gerald & Yang, Xiaohan (2014), Functional Genomics of Drought Tolerance in Bioenergy Crops, *Critical Reviews in Plant Sciences*, 33 205-224 10.1080/07352689.2014.870417, https://www.researchgate.net/publication/263929868_Functional_Genomics_of_Drought_Tolerance_in_Bioenergy_Crops
- [24] Ooi, B. G., & Lankford, K. R. (2009), Strategy for adapting wine yeasts for bioethanol production, *International journal of molecular sciences*, 10(1) 387–384, <https://doi.org/10.3390/ijms10010385>
- [25] Liu, Tiangang & Khosla, Chaitan (2010), Genetic Engineering of Escherichia coli for Biofuel Production, *Annual review of genetics*, 44. 53-69. 10.1146/annurev-genet-102209-163440, https://www.researchgate.net/publication/46169173_Genetic_Engineering_of_Escherichia_coli_for_Biofuel_Production

Commenté [RD25]: La section des références est équilibrée : des rapports, des articles et des sites Web.

Code de champ modifié

Commenté [RD26]: Cet article respecte le critère de longueur du travail. Dans le cadre imposé, il était difficile de faire des références aux milliers d'articles qui ont été inventoriés.





ANNEXE A : OUTILS DE TRAITEMENT DES DONNÉES

EXEMPLE DE CONFIGURATION *PUBLISH OR PERISH* :

The screenshot shows the Publish or Perish software interface. At the top, there's a search bar with the query 'renewable AND energy from 2000 to 2021'. Below it, a table lists search results with columns for Papers, Cites, Cite/y..., h, g, h, lno..., N, lann..., acc..., Search date, Cache date, and Las... The table shows several results, with the top one having 1000 papers and 201727 citations. Below the table, there's a 'Google Scholar search' section with fields for Authors, Publication names, Title words, and Keywords. The 'Maximum number of results' is set to 1000. At the bottom, there's a 'Results' section with a table showing the top results, including 'A review: Microalgae and their ap...' and 'Global potential of renewable ene...'. The table has columns for Cites, Per year, Rank, Authors, Title, Year, Publication, Publisher, and Type.

EXEMPLES DE COMMANDES *GREP* POUR LE NETTOYAGE DES DONNÉES :

```
grep -v BOOK ren.csv > ren2.csv  
grep -v "patents.google.com" ren2.csv > ren3.csv
```

EXEMPLES DE COMMANDES *GREP* POUR L'EXTRACTION DES DONNÉES :

```
grep alga hydrogen3.csv > hydrogen-algae.csv
```

UTILITAIRE *GETYEAR* :

```
1 #!/bin/bash  
2 for year in ,2000, ,2001, ,2002, ,2003, ,2004, ,2005, ,2006,  
3 ,2007, ,2008, ,2009, ,2010, ,2011, ,2012, ,2013, ,2014, ,2015,  
4 ,2016, ,2017, ,2018, ,2019, ,2020,  
5 do  
6     number=`grep $year $1|wc -l`  
7     echo $number  
8 done
```



ANNEXE B : DONNÉES DES ARTICLES SCIENTIFIQUES

Dans la première colonne des Tableaux 1 et 2, les opérateurs logiques sont :

- & : « et » (le terme doit être présent)
- !& : « et » inversé (le terme doit ne pas être présent)
- | : « ou » (un terme ou l'autre doit être présent)

Les parenthèses ont priorité sur les opérateurs logiques.

« GE » signifie ici « genetic engineering »

Tableau 1: Données des articles scientifiques, 2000-2009

	Total	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
biofuel & GE	933	1	1	1	4	2	3	11	19	52	52
biofuel & GE & algae	302	0	0	0	0	0	0	1	1	7	9
biofuel & GE !& algae	631	1	1	1	4	2	3	10	18	45	43
biomass & GE	816	24	10	15	19	19	21	27	31	51	45
biomass & GE & algae	104	0	0	0	0	1	0	0	3	2	1
biomass & GE !& algae	712	24	10	15	19	18	21	27	28	49	44
hydrogen & GE	418	16	15	14	12	17	14	20	36	20	32
hydrogen & GE & algae	42	1	0	3	2	1	0	2	3	0	0
hydrogen & GE !& algae	376	15	15	11	10	16	14	18	33	20	32
GE & (biofuel biomass hydrogen) & algae	448	1	0	3	2	2	0	3	7	9	10
GE & (biofuel biomass hydrogen) !& algae	1719	40	26	27	33	36	38	55	79	114	119
GE & (biofuel biomass hydrogen)	2167	41	26	30	35	38	38	58	86	123	129
biofuel	970	2	7	5	14	16	10	19	50	65	78
biofuel & algae	158	0	0	0	0	0	0	0	0	3	9
biofuel !& algae	812	2	7	5	14	16	10	19	50	62	69
photovoltaic	836	23	25	32	27	33	34	63	64	69	72
renewable energy	933	13	11	18	20	19	21	32	43	51	57

Commenté [RD27]: Les données brutes sont souvent laissées en annexe tel que dans cet article. Un graphique est plus parlant (si vous permettez cette expression)



Tableau 2 Données des articles scientifiques, 2010-2019

	Total	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
biofuel & GE	933	83	81	98	128	90	89	65	67	48	36
biofuel & GE & algae	302	21	28	40	50	25	34	28	26	18	12
biofuel & GE !& algae	631	62	53	58	78	65	55	37	41	30	24
biomass & GE	816	71	58	64	83	56	70	46	48	30	22
biomass & GE & algae	104	6	9	7	11	7	19	10	15	11	2
biomass & GE !& algae	712	65	49	57	72	49	51	36	33	19	20
hydrogen & GE	418	38	30	35	39	23	14	15	18	4	6
hydrogen & GE & algae	42	1	6	2	8	2	1	4	4	2	0
hydrogen & GE !& algae	376	37	24	33	31	21	13	11	14	2	6
GE & (biofuel biomass hydrogen) & algae	448	28	43	49	69	34	54	42	45	31	14
GE & (biofuel biomass hydrogen) !& algae	1719	164	126	148	181	135	119	84	88	51	50
GE & (biofuel biomass hydrogen)	2167	192	169	197	250	169	173	126	133	82	64
biofuel	970	108	131	118	109	80	63	53	25	12	5
biofuel & algae	158	13	15	31	32	23	12	10	4	3	3
biofuel !& algae	812	95	116	87	77	57	51	43	21	9	2
photovoltaic	836	83	79	63	40	47	44	21	13	2	2
renewable energy	933	81	88	79	79	88	63	73	67	27	3



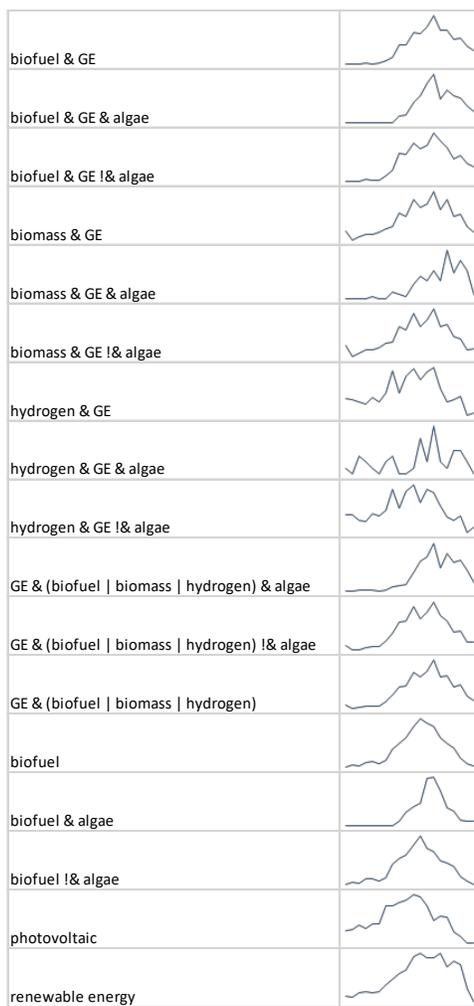


Figure 7 : Graphiques sommaires de la répartition des articles, 2000-2018

