



HAL
open science

Construction et génie civil 4.0

Jean-François Caron, Romain Mesnil

► **To cite this version:**

Jean-François Caron, Romain Mesnil. Construction et génie civil 4.0. Transitions. Les nouvelles Annales des Ponts et Chaussées, 2022, 2, pp.108-115. hal-03982908

HAL Id: hal-03982908

<https://enpc.hal.science/hal-03982908v1>

Submitted on 10 Feb 2023

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

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

Construction et génie civil 4.0

L'industrie de la construction est en profonde mutation. Le manque de main-d'œuvre qualifiée, un réel besoin d'optimisation de la production pour diminuer les coûts et les impacts environnementaux, la nécessité de mettre en place une meilleure interopérabilité entre un trop grand nombre d'acteurs, nécessitent de nouveaux modèles plus intégrés, comme c'est déjà le cas dans l'industrie automobile. Il faut réimaginer la préfabrication des années 1970. Grâce au numérique et aux nouveaux outils de conception, de représentation, de mesure et de fabrication – robotique ou impression 3D, par exemple – il est maintenant possible de proposer une *mass-customisation* d'architectures préfabriquées et des prototypes sériels. Cet article présente deux programmes de recherche et de développement partenariaux. Tous deux s'appuient sur la plateforme technologique Build'In portant sur la fabrication numérique de mortiers renforcés et de systèmes constructifs en béton armé.

The construction industry is undergoing profound changes. The lack of skilled labor, a real need to optimize production to reduce costs and environmental impacts, and the need for better interoperability between too many players require new, more integrated models, as in the automotive industry. We need to reimagine the prefabrication of the 1970s. Thanks to digital technology and new tools for design, representation, measurement and manufacturing – such as robotics and 3D printing – it has become possible to offer mass-customization of prefabricated architectures and serial prototypes. With this in mind, École des Ponts ParisTech is developing several research and development programs in partnership with academics and industry, with the support of the Build'In technological platform, which is backed by a SESAME Île-de-France project.



Jean-François Caron

Directeur de recherche, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Docteur de l'École des Ponts ParisTech et spécialiste de la mécanique des matériaux, Jean-François Caron est actuellement responsable de l'équipe Matériaux et structures architecturés (MSA) du laboratoire Navier (ENPC/UGE/CNRS). Ses contributions concernent la modélisation de structures multicouches, les structures composites innovantes et le design de prototypes. Depuis 10 ans, il dirige des recherches sur la construction numérique, telles que l'impression 3D béton et robotique. En charge du projet DIXite (Digital Construction Site)¹ du campus Paris-Est, il est également cofondateur et responsable scientifique de la plateforme régionale Build'In, dédiée à la construction numérique². Il est coauteur d'une centaine de publications internationales et de huit brevets.



Romain Mesnil

Chef de projet, Co-Innovation Lab, École des Ponts ParisTech

Romain Mesnil est ingénieur et docteur de l'École des Ponts ParisTech et titulaire d'un master du MIT. Son travail de thèse sur la rationalisation constructive de structures courbes a été récompensé par le prix Hangai décerné par l'International Association for Shell and Spatial Structures. Depuis 2017, il est responsable du développement du Co-Innovation Lab et de Build'In, sa plateforme technologique dédiée à la construction numérique. Les travaux de recherche qu'il encadre portent, notamment, sur la construction robotisée et l'impression 3D béton et en terre. Il est coauteur d'une trentaine de publications internationales et de deux brevets.

SELON les dernières estimations démographiques des Nations unies, la population mondiale devrait atteindre 10 milliards d'habitants en 2050.

Cette croissance démographique pose des défis environnementaux, mais aussi, en termes de productivité. En effet, en une semaine, c'est l'équivalent de la population de Barcelone qu'il faut loger et doter en infrastructures (hôpitaux, écoles, transports, etc.) pour lui garantir une vie dans la dignité. Pourtant, depuis 20 ans, la croissance de la productivité dans le domaine de la construction ne dépasse pas 1 % par an, quand elle est de 3,6 % pour l'industrie manufacturière. Dans les pays développés, la productivité est même stagnante (Barbosa, Woetzel, Mischke *et al.*, 2017), conséquence d'une forte régulation et dépendance au secteur public et de sous-investissements en recherche et développement. L'essor du *lean management*, mais également, un recours accru à l'automatisation et aux technologies digitales, ainsi que l'accélération de la construction sur site grâce à la robotique, devraient fortement l'améliorer. Au lendemain de la Seconde Guerre mondiale et face au défi de la reconstruction, le besoin en constructions neuves est très prégnant. Des tentatives d'industrialisation du procédé de construction voient alors le jour (Bock, Langenberg, 2014), notamment au Japon, parmi lesquelles, la préfabrication, la standardisation et la structuration du chantier. Mais les robots de construction, effectuant des tâches uniques, répétitives, de manière non autonome, se révèlent finalement peu adaptés aux contraintes de la profession. Aujourd'hui, grâce aux nouveaux outils de conception, aux progrès récents de la programmation paramétrique, de la fabrication additive et autres nouvelles technologies, il devient possible de proposer, en série, une *mass-customisation* des architectures préfabriquées. Cet article présente deux projets de recherche s'appuyant sur la plateforme technologique Build'In³ soutenue par un projet Sésame Île-de-France : l'impression 3D de mortiers renforcés et anisotropes et le développement de nouveaux systèmes constructifs en béton armé.

1. Voir : <https://dixite.future-isite.fr/>

2. Voir : <https://buildin-enpc.fr/>

3. Voir note 2

Impression 3D et mortiers anisotropes

Ces dernières années, l'impression 3D de mortiers cimentaires s'est imposée comme fer de lance – très médiatisé – des technologies constructives disruptives, en lien avec l'automatisation et la digitalisation des design et *process*. Les nombreuses avancées réalisées portent tant sur le matériau lui-même (formulations, liants alternatifs), que sur les *process* (technologie, rhéologie), ou encore, les nouveaux systèmes constructifs potentiels et pertinents. Il reste cependant du chemin à parcourir afin de permettre des applications économiquement et techniquement compétitives.

Le renforcement en traction, incontournable

Le béton est fragile et sa résistance en traction quasi-nulle. Les structures doivent donc être armées pour satisfaire aux réglementations. Les nouveaux procédés additifs invitent à repenser les solutions traditionnelles (coffrages, armatures, fibrage) et l'étude des instabilités de parois devient déterminante dans le cadre de structures plus vertueuses, moins massives, minces ou creuses.

Flow-Based Pultrusion, un brevet École des Ponts ParisTech

La réponse apportée par l'École des Ponts ParisTech et le laboratoire Navier est originale et associe une expertise historique sur les ciments à celle, plus récente, sur les matériaux et structures composites. Elle réinterroge l'approche "*Think Composite*", développée dans les années 1980 pour l'optimisation du design des structures *via* multicouches et anisotropie. Un composite est un mélange intime de matrice et de fibres, qui peut être considéré comme un matériau « homogène équivalent », avec ses propres propriétés mécaniques. Le procédé *Flow-Based Pultrusion*, qui a été développé et breveté, permet d'extruder un tel composite, sous la forme d'un boudin de matrice cimentaire renforcé avec 3 à 6 % (en volume) de fibres longues de verre ou de basalte.

Les fibres sont entraînées directement au niveau de la tête d'extrusion par le flot de mortier, sans qu'aucune autre motorisation ne soit nécessaire. La gestion et le pilotage de la dépose du boudin renforcé s'en trouvent donc facilités (cf. figure 1). Il est indispensable de maîtriser des paramètres, comme les frottements, le seuil de cisaillement et la viscosité du mortier, car ils permettent la bonne imprégnation et l'entraînement des fibres. C'est dans cette optique qu'ont été développées la modélisation des phénomènes et la métrologie *in situ* (Ducoulombier, Mesnil, Carneau *et al.*, 2021).



Figure 1. Impression de mortier fibré en continu
© ENPC/Navier, 2020.

Un nouveau matériau, anisotrope et ductile

Le *process*, quelques préconisations de mise en œuvre et les premiers résultats prometteurs de traction et flexion sur échantillons renforcés sont présentés par Caron (2021) et Demont (2021). Avec 3 % de fibres, le matériau fortement anisotrope allie bien, grâce à une multi-fissuration, une meilleure résistance en traction (x 2,5 par rapport au matériau non renforcé) et jusqu'à 2 % de ductilité en traction ce qui est considérable. Les études en cours concernent des taux de fibre plus importants (6 à 10 %) et la durabilité des structures ainsi réalisées.

L'impression 3D grande échelle au service de l'intelligence constructive

Les enjeux liés à la question environnementale et à la nécessité productive auxquels sont confrontés les domaines de la construction et du génie civil, appellent une transition industrielle du secteur. La préfabrication robotisée hors site semble apporter des réponses pertinentes : performance, sécurité, contrôle. Elle vise une construction modulaire, qui réduit le nombre et la pénibilité des opérations sur chantier, sans pour autant se restreindre à la standardisation.

Dans ce contexte, l'impression 3D grande échelle ouvre la voie à une conception au service de l'intelligence constructive. Cette opportunité s'accompagne de défis techniques et scientifiques. La conception d'éléments constructifs innovants doit se collectiviser. Les questions relatives au chantier doivent être traitées en amont du projet, pour garantir une continuité d'information vertueuse.

Les trois regards de visite à Roubaix, que XtreeE a mené avec Point P TP et la Sade au profit de la métropole européenne de Lille sont un exemple

de projet à continuité d'information intégrée. Ces cheminées imprimées s'insèrent sur une galerie souterraine en briques. Pour cela, un relevé en scan 3D de la géométrie existante a été réalisé et les parcours d'outils conçus à partir de ces données numériques (cf. figure 2).

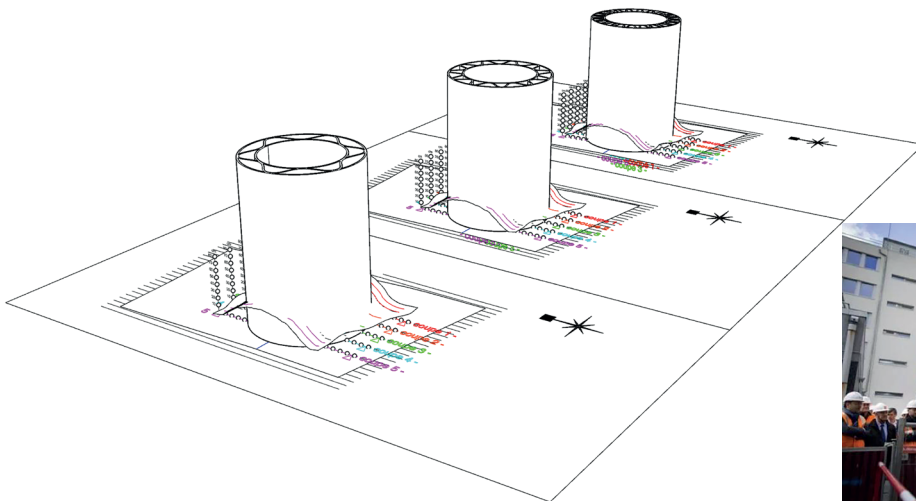
La robotique et l'automatisation de la fabrication des pièces imprimées permettent une régularité de traitement et une précision nouvelles, associées à une grande quantité de données générées. Les données théoriques, confrontées aux données effectives, permettent d'envisager de nouveaux modes de certification industrielle. La question de la simulation de ces nouveaux procédés de mise en œuvre des matériaux de construction est cruciale. Pour cela, une étroite collaboration entre les sphères industrielles et universitaires est nécessaire. C'est dans cette optique que l'entreprise XtreeE et la plateforme Build'In travaillent en partenariat sur des sujets tels que le renforcement en continu, la modélisation mécanique des structures imprimées et la simulation du comportement au jeune âge.



**Romain
Duballet**

Ingénieur
Co-fondateur de
l'entreprise XtreeE

2a.



2b.



Figure 2a. Design d'un regard de 1,5 m x 1,5 m x 2,3 m d'après relevé sur conduite existante pour impression 3D © XtreeE, 2018.

Figure 2b. Pose d'un regard © Point P TP.

Une collaboration avec XtreeE est en cours pour développer une tête d'impression industrielle de mortiers à fibres continues.

Optimisation mécanique et fabrication numérique d'éléments en béton armé

La construction en béton armé reste relativement artisanale. De nombreuses tâches, souvent lourdes et chronophages, sont encore effectuées manuellement. Selon une étude menée auprès d'une centaine d'ingénieurs certifiés par l'IStructE, la tendance est à la simplification de

la conception, en vue de faciliter la construction et de minimiser le risque d'erreur de fabrication (Orr, Drewniok, Walker *et al.*, 2019). Or, elle conduit au surdimensionnement des structures. Pourtant, il est possible de construire des structures optimisées et durables en béton armé. En témoignent celles du début du XX^e siècle, comme les ponts d'Eugène Freyssinet. Face à l'urgence des enjeux environnementaux, cette piste doit être réexplorée avec les nouveaux moyens disponibles. C'est dans cet esprit, que le projet de l'I-site Future, DiXite⁴ (Digital Construction Site), mené en partenariat avec ISC-VINCI, combine méthodes de conception et de fabrication numériques.

4. Voir note 1

Accélération du passage de la conception à la production : digitalisation et réalité augmentée



Nicolas Metge

Ingénieur et architecte
Directeur du bureau
d'études (ISC), VINCI
Construction France

Si les départements études ont désormais intégré le *Building Information Modeling* (BIM), un effort reste à faire sur la digitalisation des chantiers, « cœur de métier » des entreprises de construction. Les objectifs sont clairs : améliorer la sécurité, réduire les impacts environnementaux, accélérer le passage de la conception à la production.

Par exemple, un logiciel visant à automatiser la production de plans d'armatures pour les éléments en béton armé est en cours de développement. À partir d'un calcul de structure classique et sur la base de quelques règles de l'art, un schéma d'armatures optimal, basé sur les sections d'acier théoriques et réglementaires est généré. Les dispositions constructives à prendre en compte sont nombreuses et il faut « traduire/coder » l'expertise de l'ingénieur. Une maquette 3D est alors générée et évaluée. Les intérêts sont, outre un gain de temps en étude, la réduction des risques d'erreur liés à la production des plans, la visualisation 3D, l'anticipation d'éventuelles incompatibilités géométriques, d'interface, ou des difficultés en termes

d'assemblage. Cela permet des itérations simples et très efficaces.

Cette nouvelle brique logicielle permet désormais d'aller plus loin en termes de recherche et développement (R&D). Cette description digitale du ferrailage optimisé peut permettre d'envisager un *workflow* continu avec la production. Le bureau d'études, en collaboration avec les compagnons, œuvre au développement d'outils de vision en réalité augmentée qui permettront de les assister lors du montage des cages d'armature sans recours au plan. Un contrôle en temps réel permettra de vérifier la conformité avec la modélisation effectuée par le bureau d'études et d'assurer la traçabilité de toutes les modifications. Le jumeau numérique ainsi obtenu sera intégré à la maquette numérique et facilitera les maintenances et expertises futures.

Pourquoi alors ne pas imaginer la robotisation de la fabrication, comme dans l'automobile ? C'est ce que nous avons commencé à étudier, en collaboration avec le Build'In lab de l'École des Ponts ParisTech.

Le béton « bas-carbone » optimal est celui qui n'est pas coulé

Afin de permettre un déploiement industriel, la méthode s'inscrit dans le cadre du dimensionnement des poutres treillis en béton armé tel que défini par les Eurocodes, et satisfait donc aux critères relatifs aux état limite de service (ELS) et état limite ultime (ELU). Concernant le dimensionnement à l'effort tranchant, l'Eurocode 2 partie 1.1 propose « la méthode des bielles et tirants ». Cependant, pour des raisons de mise en œuvre, les poutres classiques sont très largement surdimensionnées de ce point de vue. La quantité de béton coulée excessive conduit à une démarche trop conservative.

La méthode propose ici d'optimiser réellement les bielles pour que leurs dimensions équilibrent au plus près les efforts de traction-compression dus à l'effort tranchant (Maitenaz, 2020). De même, sous la ligne neutre (partie tendue), seule la partie de béton nécessaire réglementairement aux enrobages des aciers est conservée. Le principe d'évidement proposé est un principe de treillis (cf. figure 3). Une étude paramétrique pour différentes portées et élancements et différentes combinaisons de charges ELS et ELU, a été réalisée. Pour des poutres de portées L de 6 à 9 m et des élancements de $L/10$ à $L/12$, les économies de béton peuvent aller jusqu'à 40 % par rapport à une poutre monolithique.

Coffrages complexes et impression 3D

Les techniques de coffrage conventionnelles ne permettent pas une telle géométrie. L'impression de ces coffrages est ici proposée et illustrée par la figure 4. Le *workflow* digital est ainsi assuré du design optimisé à la fabrication robotisée. Plusieurs solutions matériau ont été testées. Si les coffrages collaborants imprimés en ciment sont simples à réaliser, ils impactent l'optimisation car ils ne peuvent pas être réglementairement pris en compte dans le dimensionnement. Aussi, la recherche s'est finalement orientée vers des coffrages conventionnels, mais recyclables, ici imprimés en argile, qui impactent peu le coût environnemental de la poutre (cf. figure 4). D'autres solutions innovantes sont à l'étude.

Une campagne d'essai et une évaluation environnementale concluantes

Plusieurs poutres ont été conçues, puis fabriquées, intégrant des schémas d'optimisation différents, et ce, afin de privilégier des mécanismes de ruine différents, comme par exemple, la rupture des bielles à l'effort tranchant, ou encore, celle du béton fléchi en compression. La campagne d'essais mécaniques sur ces poutres de 3 m (cf. figure 3) a confirmé les résistances prévues par le calcul. Notant naturellement une raideur et une ductilité un peu plus faibles que

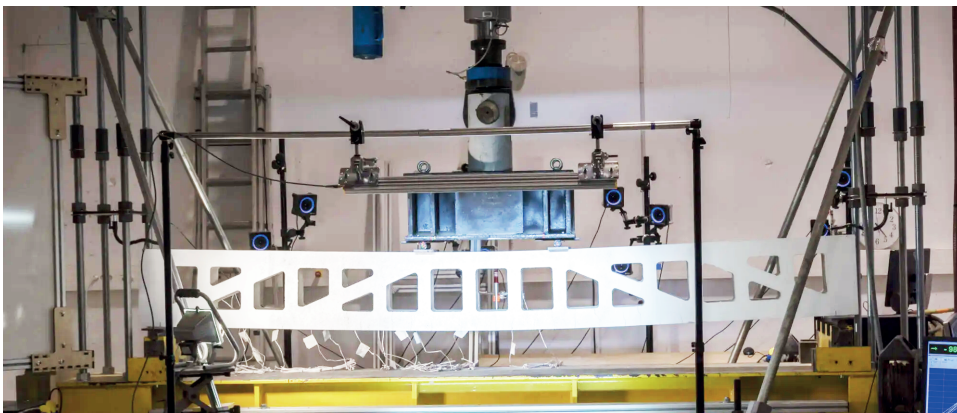


Figure 3. Poutre treillis béton armé optimisée © ENPC/Navier, 2021.



Figure 4. Impression de coffrages recy(clay)ble en argile © ENPC/Navier, 2020.

pour la version monolithique, les poutres restent conformes aux Eurocodes.

Selon plusieurs études (voir notamment Pan, 2018), la mesure des impacts environnementaux induits peut déclencher ou retarder le déploiement rapide des techniques de préfabrication, d'automatisation et de robotisation. De solides analyses de cycle de vie globales des concepts comparés classiques et innovants sont donc indispensables. Pour autant, elles ne doivent pas se limiter au bilan carbone et intégrer l'ensemble des indicateurs pertinents disponibles. Le scénario choisi ici est celui d'une poutre de 6 m destinée à un immeuble de bureau. La modélisation est réalisée sur OpenLCA et s'appuie sur la base de données Ecoinvent (cf. Roux, Feraille, Peuportier, *supra*). Des données, fournies par le Syndicat national du béton prêt à l'emploi (SNBPE) et le Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB) ont été appliquées au contexte français. Elles

concernent les distances de transport, les distances moyennes entre carrières, cimenterie, centrales à béton, chantiers ou usines de préfabrication. Le procédé présenté ici permet de réduire l'impact des poutres en béton armé sur huit des onze indicateurs généralement considérés. Pour deux d'entre eux, l'*agricultural land occupation* et le *climate change*, la réduction de l'impact est considérable, respectivement de 30 % et 21 %. L'impact associé au transport de la poutre préfabriquée est plus important que pour une poutre coulée sur site, car le territoire français est encore faiblement maillé par les usines de préfabrication.

En 2022, une suite de ce premier projet a démarré avec ISC-VINCI pour explorer des systèmes constructifs plus globaux, tels que des systèmes dalle-poteaux, et en intégrant des contraintes de démontabilité, enjeu majeur de la construction de demain.

Bibliographie

- BARBOSA, Filipe, WOETZEL, Jonathan, MISCHKE, Jan *et al.*, 2017. *Reinventing construction: A route to higher productivity*. Executive summary. S. L. : McKinsey Global Institute, 168 p.
- BOCK, Thomas et LANGENBERG, Silke, 2014. Changing building sites: Industrialisation and automation of the building process. *Architectural Design*, vol. 84, n° 3, pp. 88-99.
- BOCK, Thomas et LINNER, Thomas, 2015. Synchronization of Organization, Building Structure, and Manufacturing Technology by Robot-Oriented Design. In : BOCK, Thomas et LINNER, Thomas. *Robot-Oriented Design Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. S. L. : Cambridge University Press, pp. 156-230.
- CARON, Jean-François, DEMONT, Léo, DUCOULOMBIER, Nicolas *et al.*, 2021. 3D printing of mortar with continuous fibres: Principle, properties and potential for application. *Automation in Construction* [en ligne], septembre 2021, vol. 129, 103806. DOI: [10.1016/j.autcon.2021.103806](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103806).
- DEMONT, Léo, DUCOULOMBIER, Nicolas, MESNIL, Romain *et al.*, 2021. Flow-based pultrusion of continuous fibers for cement-based composite material and additive manufacturing: rheological and technological requirements. *Composite Structures* [en ligne], avril 2021, vol. 262, 113564. DOI: [10.1016/j.compstruct.2021.113564](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113564).
- DUCOULOMBIER, Nicolas, CHATEAU, Camille, BORNERT, Michel *et al.*, 2020. X-ray tomographic observations of microcracking patterns in fibre-reinforced mortar during tension stiffening tests. *Strain, Wiley-Blackwell* [en ligne], vol. 56, n° 6, e12347. [hal-02558347](https://doi.org/10.1111/strn.12347).
- DUCOULOMBIER, Nicolas, MESNIL, Romain, CARNEAU, Paul *et al.*, 2021. The "Slugs-test" for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits. *Cement and Concrete Composites* [en ligne], août 2021, vol. 121, 104074. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2021.104074](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104074).
- MAITENAZ, Sébastien, MESNIL, Romain, ONFROY, Paul *et al.*, 2020. Sustainable Reinforced Concrete Beams: Mechanical Optimisation and 3D-Printed Formwork. In : BOS, Freek P., LUCAS, Sandras S., WOLFS, Rob J. M. *et al.* (eds.). *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concerte 2020* [en ligne]. S. L. : Springer, Cham, pp. 1164-1173. DOI: [10.1007/978-3-030-49916-7_110](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_110).
- PAN, Mi, LINNER, Thomas, PAN, Wei *et al.*, 2018. A framework of indicators for assessing construction automation and robotics in the sustainability context. *Journal of Cleaner Production* [en ligne], mai 2018, vol. 182, 2018, pp. 82-95. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.02.053](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.053).
- ORR, John, DREWNIOK, Michal P., WALKER, Ian *et al.*, 2019. Minimising energy in construction: Practitioners' views on material efficiency. *Resources, Conservation and Recycling* [en ligne], janvier 2019, vol. 140, pp. 125-136. DOI: [10.1016/j.resconrec.2018.09.015](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.015).