

# The Transition Institute 1.5

L'ambition d'une véritable transition



## SÉMINAIRE TTI.5

### SÉANCE 4 : LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE DANS LE SECTEUR DU BÂTIMENT

MARDI 21 MARS 2023  
À 13H30 (EN LIGNE)



## SYNTHÈSE DE LA SÉANCE

### Introduction

Bruno PEUPORTIER | CES Mines Paris - PSL

2

### Aspects économiques et politiques de la rénovation énergétique des bâtiments

Matthieu GLACHANT | CERNA Mines Paris - PSL

4

### L'écoconception des bâtiments et des quartiers

Charlotte ROUX | CES Mines Paris - PSL

9

### Table ronde : Comment évaluer et améliorer la performance environnementale des bâtiments et des quartiers ?

13

Daniel FLORENTIN | ISIGE Mines Paris - PSL  
Gilles GUERASSIMOFF | CMA Mines Paris - PSL  
Paula PEREZ-LOPEZ | OIE Mines Paris - PSL  
Charlotte ROUX | CES Mines Paris - PSL

SYNTHÈSE RÉDIGÉE PAR OLYMPE TOURNIER ET CORENTIN LOIRS  
ÉLÈVES DU CYCLE INGÉNIEUR CIVIL  
DE MINES PARIS - PSL

# Introduction

Bruno PEUPORTIER | CES Mines Paris – PSL

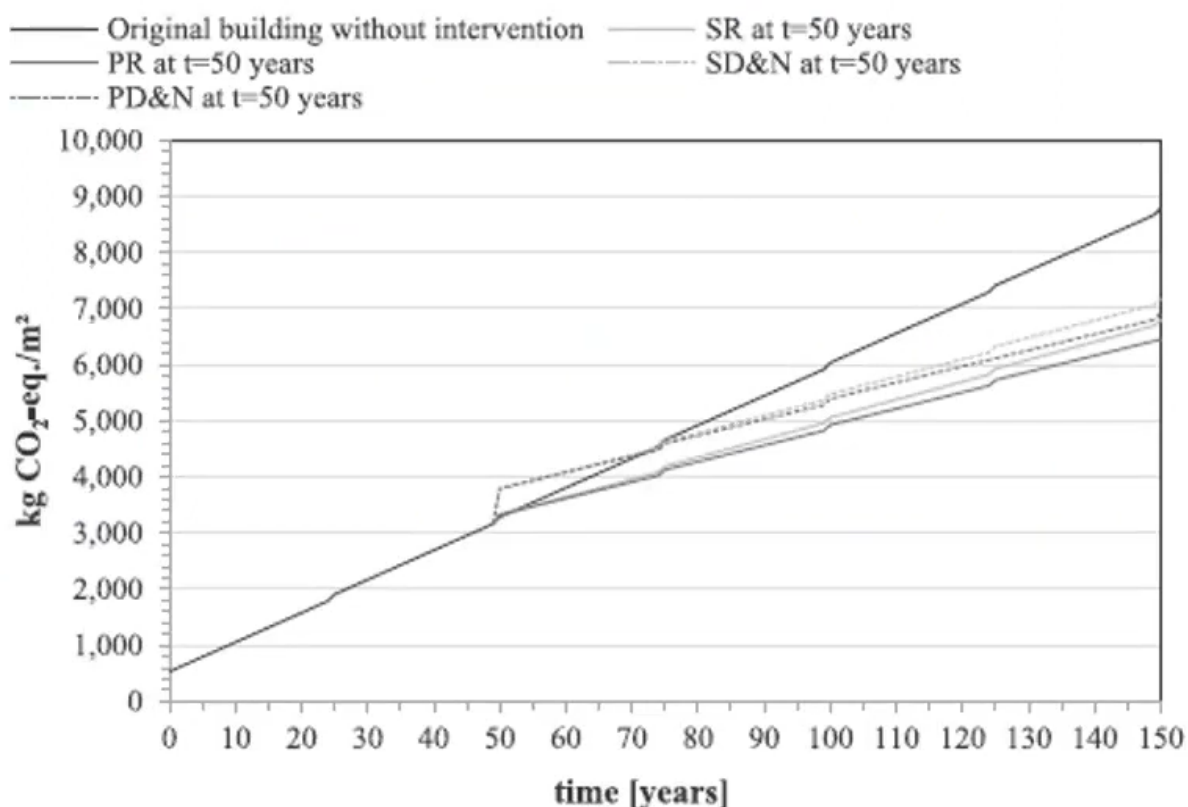
*Cette quatrième séance du séminaire TTI.5 intitulée « La transition écologique dans le secteur du bâtiment » a été animée par Bruno PEUPORTIER, directeur de recherche au Centre Efficacité énergétique des Systèmes (CES) de Mines Paris - PSL et au Lab recherche environnement Vinci - ParisTech.*

Il reste à l'humanité un budget global de 500 gigatonnes de CO<sub>2</sub> avant de dépasser l'objectif de limitation de l'augmentation globale des températures à 1,5°C, fixé lors de la COP26. En pratique, il est nécessaire de réduire de moitié nos émissions de CO<sub>2</sub> d'ici 2030 et d'atteindre un équilibre entre les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> et l'absorption naturelle du système Terre d'ici 2050.

Ce constat général s'applique en particulier au secteur du bâtiment et de l'habitation, qui devra également atteindre la neutralité carbone. Aujourd'hui, ce secteur représente 45% de la consommation d'énergie primaire en France et 25 % de la consommation d'eau (le deuxième secteur derrière l'agriculture). A ces enjeux de consommation s'ajoutent d'autres enjeux environnementaux : occupation des sols, production de déchets (68 millions de tonnes par an tous déchets confondus) et de pollution de l'eau (eaux usées, écotoxicité, respect des nappes phréatiques).

Prenons l'angle d'analyse des émissions de gaz à effets de serre liées au secteur du bâtiment. On peut modéliser les émissions totales sur la durée de vie du logement en les ventilant sur deux postes : une fixe d'émissions liées à la construction (fabrication, transport et assemblage des matériaux constituant l'édifice) du bâtiment et une part croissante selon le temps d'émissions causées par l'utilisation (chauffage, climatisation, éclairage) du logement. Pour réduire les émissions de GES liées au logement, il faut agir sur un de ces deux postes. L'action sur le premier poste étant impossible pour les logements déjà construits, une action permettant de réduire la croissance du second poste s'impose. C'est là qu'intervient la rénovation énergétique des bâtiments, qui permet de réduire la croissance du second poste.

Le graphe ci-dessous illustre un modèle affine d'émissions de CO<sub>2</sub> d'un bâtiment sur son cycle de vie. L'ordonnée à l'origine de la courbe en trait plein correspond aux émissions liées à la construction du bâtiment. Les actions de rénovation, en trait pointillé, permettent de réduire sans la pente de la droite au coût d'une augmentation instantanée des émissions causée par les travaux de rénovation. Au final c'est le bilan sur l'ensemble de son cycle de vie du logement que l'on a pu réduire grâce à la rénovation énergétique. Cependant, il faut remarquer que ces opérations permettent de réduire le bilan carbone d'un logement, mais pas de les annuler. Cette séance présente les solutions permettant de dépasser cette limite.



Source : Palacios Munioz D. et al (2019)

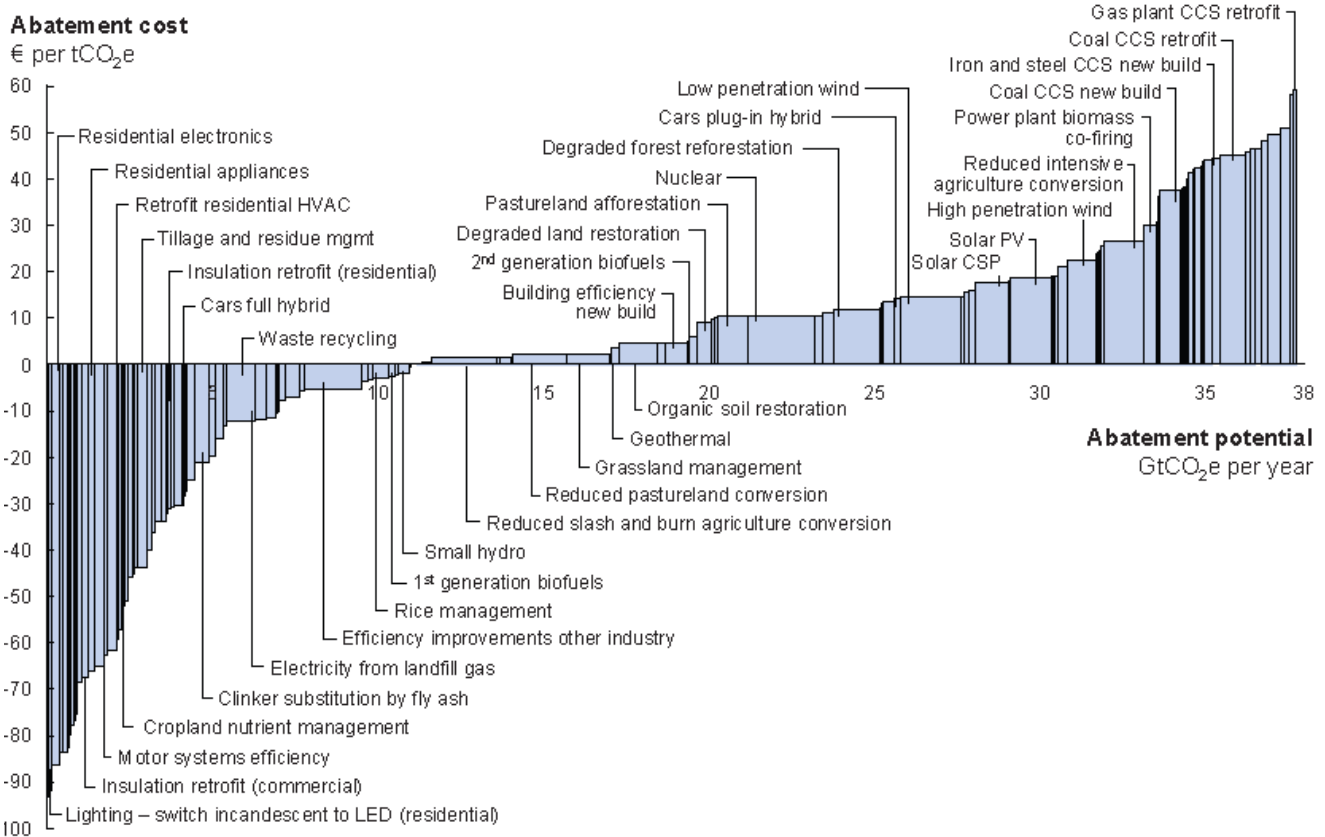
**Quel est l'état actuel des recherches, des politiques et des travaux permettant d'outrepasser cette limitation et de permettre au secteur du bâtiment d'atteindre la neutralité carbone ?**

# Aspects économiques et politiques de la rénovation énergétique des bâtiments

Matthieu GLACHANT | CERNA Mines Paris – PSL

## Le concept d'Energy Efficiency Gap et les politiques publiques qui en découlent

Le consensus dans le domaine des sciences économiques a longtemps tenu que la rénovation énergétique des bâtiments serait économiquement rentable, les modèles physiques des thermiciens prévoyant des gains énergétiques significatifs. Les réductions d'émission de GES liées à la rénovation énergétique des bâtiments sont alors théorisées comme à « coût négatif », puisque le gain à terme (lié la rénovation) sur les factures énergétiques serait plus grand que le coût de la rénovation elle-même. L'illustration la plus célèbre de la portée de cette idée, la Global Greenhouse gas abatement cost curve, à été publiée en 2007 par McKinsey :



Note: The curve presents an estimate of the maximum potential of all technical GHG abatement measures below €60 per tCO<sub>2</sub>e if each lever was pursued aggressively. It is not a forecast of what role different abatement measures and technologies will play.

Cette courbe présente une variété d'actions de réduction des émissions de GES (en CO<sub>2</sub>eq) selon deux critères : le potentiel de réduction (en Gigatonnes de CO<sub>2</sub>) en abscisse et le coût de réduction, (on parle "d'abattement") de ces émissions en ordonnée. Cette courbe a connu un grand succès auprès du monde économique car elle apportait une très bonne nouvelle aux investisseurs : il existerait un grand potentiel d'actions à mener permettant de générer un surplus de valeur (un coût d'abattement est négatif) tout en réduisant l'empreinte carbone de l'humanité, autrement dit assurant une croissance "verte". Ces actions sont pour la plupart des mesures d'efficacité énergétique : remplacement des ampoules incandescentes par des LED, efficacité des moteurs ou rénovation énergétique des bâtiments (isolation, pompes à chaleur...).

D'après ces travaux, l'on devrait s'attendre à observer des investissements en masse, à la fois du côté des particuliers et des industries, dans l'efficacité énergétique : un acteur économique rationnel devrait se ruer sur ces options à coût négatif. Mais ce n'a pas été, et n'est toujours pas, le cas. On parle alors de "myopie" : les ménages sous-estiment les bénéfices à long terme de leurs investissements en termes d'efficacité énergétique, et conséquemment n'investissent que peu ou pas dans des opérations de rénovation. Et les ménages décidant d'investir se contentent d'opérations de petite envergure, moins coûteuses mais moins efficaces économiquement. Il apparaît alors une différence entre les prédictions des modèles d'efficacité énergétique et le comportement réel des consommateurs : c'est l'*Energy Efficiency Gap*.

Afin de corriger cette myopie, des politiques publiques adaptées permettent de jouer le rôle "d'opticien". En France, un large panel de mesures a été mis en place pour encourager les travaux de rénovation énergétique depuis 1999 et la décision de réduire la TVA sur les travaux de rénovation énergétique.

Approche	Instrument	Exemples
<b>Augmenter le prix de l'énergie</b>	• Fiscalité énergie	• Taxe carbone, TICPE
	• Marché de permis négociables	• Marché du carbone ETS, certificats d'économies d'énergie (CEE)
<b>Cibler directement les investissements</b>	• Subvention à l'investissement dans l'EE	• MaPrimeRénov' pour la rénovation énergétique • TVA réduite pour les travaux de rénovation énergétique
	• Taxation des équipements inefficaces	• Malus automobiles
	• Normes et obligations réglementaires	• Normes construction bâtiments neufs RE2020 • Obligations de rénovation des « passoires thermiques » • Normes d'émission de CO <sub>2</sub> des véhicules
	• Approches informationnelles	• Etiquette énergie
	• Marché de certificats	• Certificats d'Economie d'Énergie

Source : Matthieu GLACHANT

Ces outils peuvent être divisés en deux catégories : ceux favorisant la sobriété par l'augmentation des prix de l'énergie et ceux destinés à orienter les investissements vers les gains d'efficacité énergétique. Aujourd'hui, l'augmentation des dotations aux subventions énergétiques dans un cadre de déficit structurel est en tension avec les objectifs budgétaires de l'Etat. De même, l'instauration d'une taxe carbone (même restreinte au bâtiment) ne remporterait pas l'adhésion populaire. Les actions étatiques basées sur la croyance en l'energy efficiency gap semblent avoir trouvé leurs limites, même si l'on peut remarquer par exemple que les Certificats d'Économie d'Énergie (CEE) représentent, de fait, une taxe et une subvention mais jouissent d'une bonne acceptabilité sociale.

### **La remise en cause de l'Energy Efficiency Gap grâce aux techniques économétriques**

Le développement récent de nouvelles techniques d'analyses de données et des techniques économétriques a permis de produire de nouveaux résultats sur la rénovation énergétique des bâtiments. C'est le cas des analyses ex-post, permettant de comparer la consommation d'un grand nombre de bâtiments avant et après rénovation. Gaël Blaise et Matthieu Glachant, membres du CERNA, ont publié en 2019 une étude basée sur ces nouvelles méthodes, étude qui a ensuite été actualisée et renforcée en 2020 par les travaux de Victor Kahn, provenant également du CERNA.

Cette étude analyse les données de l'enquête "10 000 ménages", entretenue par TNS-SOFRES, construite à partir de l'interrogation annuelle d'environ 8000 ménages distincts sur leur consommation d'énergie ainsi que leurs investissements dans des travaux de rénovation énergétique (date, coût, nature).

Les conclusions de cette étude sont très loin des résultats jusque là. Toutes choses étant égales par ailleurs, 1000€ investis dans la rénovation énergétique des bâtiments ne mènent qu'à une économie d'énergie de 15€ et 64 kg CO<sub>2</sub>eq par an, ce qui correspond à un coût d'abattement de 335€ la tonne de CO<sub>2</sub>. Si l'on devait placer ce résultat sur la courbe de McKinsey, le rectangle de la rénovation énergétique de bâtiment sortirait du cadre de la figure !

Ces résultats, décevants pour la pérennité économique de la rénovation énergétique des bâtiments, sont expliqués par différents facteurs :

- L'ampleur des travaux : certaines rénovations sont locales et peu impactantes (changement d'une porte, d'une fenêtre) alors que d'autres sont « globales » (rénovation complète de l'isolation des murs ou des

toitures). L'étude ne permet ainsi pas de conclure sur l'efficacité particulière des rénovations globales, mais plutôt sur la globalité des rénovations actuelles.

- La qualité des travaux : la maîtrise technique des artisans réalisant ces travaux est extrêmement hétérogène, et la qualité des travaux d'isolation l'est donc tout autant. Ce phénomène est amplifié par la forte asymétrie d'informations entre acheteurs et vendeurs sur la qualité du service acheté. Le propriétaire investissant dans son logement dans la rénovation ne connaît que peu de choses sur la rénovation énergétique ou au BTP et les possibilités de rénovation « à 1€ » ne l'encouragent pas à se renseigner sur la qualité de tel ou tel artisan. Un cercle vicieux peu même se mettre en place : ne pouvant évaluer la qualité de tel ou tel artisan, les acheteurs se rabattent par défaut sur l'option la moins chère qui est souvent de mauvaise qualité. Un avantage concurrentiel important apparaît en faveur des moins bons artisans, les meilleurs ne pouvant justifier leur prix auprès d'acheteurs s'informant peu ou mal. La part des mauvais artisans augmente alors sur le marché, et les acheteurs sont d'autant moins enclins à se renseigner à cause de la qualité globale médiocre des prestations qu'ils perçoivent.
- Enfin, il faut prendre en compte l'effet rebond. Par exemple pour le chauffage : si l'on isole mieux, l'on peut avoir tendance non pas à consommer moins pour vivre à la même température mais consommer autant pour vivre à une température plus agréable. Dans les faits, cet effet rebond est estimé à 20 à 40% de la consommation totale. Il ne faut pas non plus perdre de vue que, pour les foyers en précarité énergétique dont la température n'est pas convenable avant les travaux, c'est bien un objectif d'augmentation de la qualité de vie (par la température) qui est la raison première d'investir dans la rénovation énergétique.

### **Les Certificats d'Economie d'Energie (CEE)**

Des travaux sont également menés au CERNA pour évaluer l'efficacité des CEE comme outil dont l'un des objectifs est la réduction des émissions de carbone. L'instrument fonctionne de la manière suivante : l'Etat oblige les fournisseurs d'énergie (gaz, électricité, carburants) à réaliser une quantité donnée (en fonction du fournisseur et de ses ventes) d'économies d'énergie sur une période de 4 ans.

Pour atteindre son obligation, chaque fournisseur peut subventionner

directement ou indirectement les investissements dans l'efficacité énergétique dans le résidentiel, le tertiaire ou l'industrie. Chaque MWh d'énergie économisé grâce à ces investissements donne lieu à la délivrance d'un CEE à l'obligé l'ayant subventionné. A la fin de la période de 4 ans, il fournit au régulateur la quantité de CEE qui correspond au montant de son obligation.

Les CEE font l'objet d'un marché, qui permet aux fournisseurs d'acheter des CEE à d'autres fournisseurs pour atteindre leurs objectifs respectifs. Un CEE pour 1 MWh se négociait en mars 2023 à environ 7 euros.

Les CEE sont un instrument majeur de la politique de rénovation énergétique des bâtiments. Ils permettent de rediriger 3.5 milliards d'euros par an dans la rénovation du secteur résidentiel, ce qui est comparable aux montants distribués par l'État aux particuliers au titre de *MaPrimRénov*. Afin de financer ces investissements, les fournisseurs ont augmenté leur prix de 3 à 4%. Pour comparaison, la taxe carbone représente près de 8% du prix à la pompe.

Guillaume Wald, doctorant au CERNA, mène une thèse en collaboration avec le CES Mines Paris - PSL cherchant à évaluer économétriquement l'effet des CEE selon 3 axes :

- L'emploi dans le secteur de la rénovation : combien d'emplois les CEE permettent-ils de créer, et quelles sont les caractéristiques de ces emplois : pérennité, rémunération, réelle création ou transfert d'emplois d'un secteur à un autre ?
- La consommation énergétique : quelles sont les économies constatées réellement en croisant données sur les volumes de CEE et les consommations communales ? Cet axe s'inspire de la démarche de Blaise et Kahn sur l'efficacité de la rénovation énergétique des bâtiments et bénéficie de données plus récentes (2017-2021) que celles sur lesquelles ces travaux sont basés.
- Le profit des entreprises de la rénovation : quelle part des subventions ces entreprises absorbent-elles en augmentant leur prix ? Ce sujet est très important du point de vue du pouvoir incitatif des subventions : selon le cas, elles peuvent participer à l'augmentation de la marge des entreprises de rénovation (qui augmentent leur prix) plutôt qu'à l'augmentation du volume de rénovations.



# Écoconception des bâtiments et des quartiers

Charlotte ROUX | CES Mines Paris – PSL

## L'écoconception, qu'est-ce que c'est ?

En résumé, il s'agit d'une démarche de prise en compte des aspects environnementaux dans la conception. Cette démarche s'inscrit tout au long de la vie d'un bâtiment ou d'un quartier, mais l'on essaie de la faire intervenir au plus tôt de la vie du bâtiment, dès la conception, pour minimiser son impact.

Derrière le terme « aspects environnementaux » se cache une multiplicité de facteurs qui ne se limitent pas aux émissions de GES : préservation des ressources (énergie, eau, matériaux, sol...), préservations des écosystèmes (à différentes échelles, du climat mondial à la gestion des déchets ultimes en passant par la qualité de l'air au pied du bâtiment) et prise en compte des liens spécifiques entre environnement et santé humaine. A cela s'ajoutent les nombreux enjeux soulignés en introduction.

Face à la complexité et la multiplicité des facteurs à prendre en compte dans l'écoconception, des méthodes adéquates ont été, ou sont à bâtir.

## Les outils et objectifs scientifiques de l'écoconception

L'analyse environnementale se doit dans le cadre de l'écoconception d'être systémique et multicritère, prenant en compte différentes variantes de conception de bâtiments et de quartiers. Plusieurs prérequis de ce mode d'analyse ont été présentés :

- Un périmètre d'étude optimal pour éviter le déplacement d'impact dans le temps ou dans l'espace : par exemple prend-on en compte les espaces publics ? l'eau ?
- Une approche multicritère, pour intégrer les différentes contraintes environnementales présentées précédemment dans un cadre commun. Les critères d'étude ne doivent cependant pas se limiter aux critères environnementaux : le critère économique a par exemple une grande importance dans ces analyses ;

- Des approches conséquentielles, pour estimer les conséquences environnementales d'une action sur le parc bâti. Cela passe notamment par une meilleure représentation des contraintes locales ou nationales : tension sur le système électrique en hiver, présence d'un réseau de chaleur urbain...
- Des approches prospectives, pour tenir compte de la durée de vie des ensembles bâtis et de l'évolution de leur environnement (géographique, social ou économique) ;
- Des analyses de sensibilité et d'incertitude afin de renforcer la robustesse des modèles.
- Un outil rassemble ces différentes caractéristiques : l'Analyse du Cycle de Vie (ACV), qui permet d'adopter une approche multi-étape, multicritères, quantifiée et sur un périmètre fonctionnel défini à l'avance. La construction d'une ACV se fait en quatre étapes :
  - Définition des objectifs de l'étude, du système étudié, des hypothèses de travail (durée de vie, variables suivies) et identification du public destinataire ;
  - Inventaire des émissions et des consommations et choix de modélisation de ces flux ;
  - Caractérisation des flux : agrégation des flux de nature similaire, normalisation, pondération... ;
  - Interprétation des résultats et choix d'effectuer des analyses complémentaires pour affiner le modèle, des analyses de sensibilité ou des analyses d'incertitude, puis présentation (et choix de représentation !) des résultats.

Les indicateurs évalués sont d'une grande diversité, et leur analyse est plus ou moins maîtrisée selon la complexité des impacts qu'ils mesurent (le bruit par exemple, est pris en compte mais pose encore beaucoup de questions). Ils peuvent être séparés en deux catégories : intermédiaire, c'est à dire qui permettent de cibler une thématique environnementale (bruit, eutrophisation, changement d'occupation du sol...), et de dommage, qui permettent de regrouper les indicateurs par leurs impacts finaux (santé humaine, qualité des écosystèmes, ressources naturelles...). Cette double catégorisation permet de mieux saisir les conséquences de chaque étape et d'identifier les moyens de les réduire.

## Questions réponses

*L'ACV est un outil puissant mais complexe. Pour que le plus grand nombre puisse en disposer, faut-il simplifier la méthode ou est-il possible d'en faciliter l'usage ?*

Aujourd'hui, de nombreux professionnels (architectes, industriels, ingénieurs...) ont du mal à utiliser l'Analyse de Cycle de Vie à cause de sa complexité. Pour autant, il ne faut pas simplifier la méthode mais plutôt les outils. En effet, il apparaît crucial de maintenir l'aspect multicritère de l'ACV.

Il existe aujourd'hui des systèmes qui permettent d'automatiser la collecte et le traitement de données. De manière générale, il est largement possible de simplifier les interfaces de manière à les adapter à plusieurs professions et formations.

Bien entendu, les nouveaux entrants sur le marché du travail possèdent de plus en plus de connaissances sur l'ACV, ce qui va également faciliter son application généralisée. Il est essentiel de comprendre que la méthode de l'ACV n'a pas intérêt à être simplifiée car c'est justement l'intégration du calcul multicritère qui en fait l'intérêt.

A titre d'exemple, l'ACV est aujourd'hui obligatoire dans le bâtiment, mais ne prend en compte que les émissions en carbone. Or, non seulement prendre en compte d'autres critères tels que la biodiversité ou les enjeux sociaux est intéressant, mais les occulter peut conduire à des contradictions. En effet, il existe de puissantes synergies entre tous ces aspects, qui ne peuvent être appréhendées correctement qu'en visualisant l'ensemble du tableau.

*La réglementation RE2020 impose de réaliser une ACV des bâtiments neufs. Quel critère prend-elle en compte ?*

Cette réglementation permet d'imposer à l'ensemble du secteur une ACV systématique pour tout projet ; en cela, elle constitue une sorte de voiture-balai. Cependant, elle concerne uniquement la mesure de l'impact carbone. Il faudrait évidemment réaliser des analyses plus poussées sur d'autres aspects (biodiversité, pollution des eaux)

Pour se donner une idée des puissantes synergies existant à l'échelle systémique, on peut consulter les scénarios du Shape Project. Semblables aux scénarios du GIEC, ils s'efforcent de prendre en compte l'ensemble des objectifs du développement durable de l'ONU. Cette approche multi-critère

met correctement en évidence l'influence de chacun des aspects, qu'ils soient sociaux ou environnementaux, les uns sur les autres.

Ainsi, l'ACV en terme d'empreinte carbone ne peut constituer qu'un début dans l'analyse pré-conception. Il est nécessaire d'effectuer des études plus poussées allant au delà des contraintes réglementaires actuelles.

# Table ronde : comment améliorer la qualité environnementale des bâtiments et des quartiers ?

## Pratiques actuelles des urbanistes et transitions vers de nouvelles activités

Daniel FLORENTIN | ISIGE Mines Paris - PSL

Il existe déjà une série de labels qui se rapportent aux performances environnementales espérées, en fonction de calculs et de simulations faites en amont en fonction des aménagements des quartiers. Or, les consommations d'énergie réelles, en pratique, sont bien supérieures à celles envisagées par ces labels. Une étude menée par Paris & Métropole Aménagement a estimé un facteur de 2.5 à 3 entre consommations calculées et observées. Il faut donc changer d'approche pour labelliser les aménagements énergétiques.

Par ailleurs, l'aménagement est lié à l'acte de construire, lui-même lié au modèle économique des **aménageurs**. Ce sont des sociétés liées à des donneurs d'ordres (collectivités territoriales). Ces sociétés fonctionnent en revendant du terrain constructible pour compenser les coûts liés aux aménagements. Or, le prix de vente ne prend pas en compte les aspects écologiques des dits aménagements, y compris les contraintes et implications liées à l'impact de la construction.

Ainsi, les objectifs du type "zéro artificialisation nette" viennent fortement perturber ce modèle économique puisqu'ils remettent en cause la source de revenu des aménageurs : vendre du terrain.

Comment alors contribuer à une écologisation de ce modèle économique pour s'adapter à ces nouveaux objectifs ? Que devient la valeur produite par la pratique de l'aménageurs ?

La réflexion est menée par Daniel Florestin et Agnès Bastin et financée par le Plan Urbanisme Construction et Architecture (PUCA) et l'Agence nationale pour la cohésion des territoires et la Banque des territoires.

En premier lieu, on peut y insérer des métriques qui permettraient de prendre en compte des relations à la matière, à l'énergie et au vivant, c'est-à-dire concrètement l'impact environnemental des constructions. Dans ce projet

de recherche, l'équipe 'inscrit dans la tradition de l'écologie territoriale qui refuse toute substituabilité entre capitaux : ce qui est détruit dans le capital naturel ou social ne pourrait être valorisé en capital économique. Il n'y a pas de compensation économique possible de la destruction d'un écosystème, par exemple.

Les chercheurs collaborent avec plusieurs aménageurs volontaires afin de repenser de manière partenariale leurs modèles économiques. Cette transition implique trois changements :

- **L'intégration de nouvelles compétences pour les aménageurs**, comme par exemple l'utilisation d'ACV, la mobilisation de métiers classiquement éloigné de l'aménagement comme les écologues et de nouveaux liens avec l'écologie scientifique
- **Le refus d'économiciser/monétiser le vivant** : la recherche démontre que la valorisation des écosystèmes mène le plus souvent à leur destruction, non à cause d'un problème de calibrage de la valeur d'un écosystème, mais bien pour des raisons structurelles de méthodes. Il vaudrait mieux étudier les coûts de maintenance en bon état des écosystèmes, comme c'est déjà le cas dans le domaine de l'eau. La question devient alors, pour les aménageurs : Quelles métriques peuvent-elles rendre compte de l'état d'un écosystème ?
- **Repenser le mode de financement des aménageurs** : il faut trouver un nouveau mode de financement. Par un déplacement dans la chaîne de valeur (promotion immobilière par exemple) ou alors dans le temps, en prenant par exemple un rôle dans la gestion de l'énergie ou dans le réemploi de matériaux, en plus de leur rôle traditionnel. Ces changements impliquent un déplacement dans l'importance du flux financier : on viserait l'équilibre écologique plutôt que l'équilibre budgétaire (qui serait atteint non pas par des droits à construire, mais par l'intermédiaire de subventions).

Il faut donc inventer de nouveaux outils ainsi que repenser les cultures professionnelles, pour faire advenir un référentiel écologique plutôt qu'économique de l'activité d'aménagement.

## Les outils scientifiques au service de la transformation de l'urbanisme

Charlotte ROUX | CES Mines Paris - PSL

Si la transformation des systèmes professionnels des urbanistes est une entreprise, il y a cependant au moins un point positif : les outils et les techniques nécessaires à cette transformation sont aujourd'hui disponibles.

Les outils de mesure de performance énergétique sont aujourd'hui matures. Des équipements permettant de suivre le comportement des occupants, pour mesurer en direct leur consommation en fonction du climat ou pour vérifier qu'une rénovation s'est bien passé, existent. Les techniques permettant de garantir un niveau de performance énergétique sont également disponibles dès maintenant. De même, les techniques de construction de bâtiments passifs et à énergie positive sont bien là, même si leur mise en application reste imparfaite. Cette maîtrise s'étend également au matériaux biosourcés ou aux modèles d'économie circulaires permettant de réutiliser ou recycler les matériaux de construction.

Aujourd'hui, le point de travail principal est d'adapter les enjeux de travail à chaque contexte en gardant cette vision large des différents enjeux environnementaux, sans tomber dans le travers de n'en considérer qu'un seul (par exemple, le CO<sub>2</sub>).

### Limites des hypothèses et méthodes de calcul

Bruno PEUPORTIER | CES Mines Paris - PSL

Des faiblesses ont été identifiées dans les hypothèses choisies, ce qui impacte la cohérence des résultats finaux.

Par exemple, les hypothèses publiques de référence pour la mesure de la performance énergétique des bâtiments imposent une température de 16°C lorsque le logement des vide pendant la journée. C'est très éloigné de la réalité, la température moyenne constatée expérimentalement étant plutôt autour de 21°C. Cette hypothèse entraîne une sous-estimation de la consommation énergétique des bâtiments. Et ce n'est pas la seule hypothèse ayant cette conséquence. Au final, on aboutit à des rapports publics, qui sont censés faire référence, en fort décalage avec les constats expérimentaux. Sur son site, L'ADEME indique encore que 75% des impacts carbone du bâtiment sont liés au produit et pas à l'énergie. En réalité, si l'on fait plus correctement le calcul à partir de données de terrain, on obtient le résultat inverse : 75% des émissions de GES du logement sont issus de la consommation d'énergie. Ce genre de confusion peut entraîner de mauvaises focalisations : les réglementations

doivent suivre les données réelles pour espérer avoir un impact global. La RE2020 est moins contraignante niveau énergie que la RE2012 par exemple !

## **Énergie des bâtiments et comportements des usagers**

Gilles GUERASSIMOFF | CMA Mines Paris - PSL

Il y a deux enjeux principaux dans le travail du CMA : le contrôle-commande et les incitations liées aux comportements des consommateurs. L'enjeu est de produire des modèles basés sur la donnée permettant d'optimiser et de piloter les réseaux de chaleur, de froid ou d'énergie des bâtiments. Cela prend un intérêt particulier lorsque les bâtiments sont dotés à la fois de systèmes locaux de stockage et d'interconnexions avec les autres bâtiments. Cependant, avant d'optimiser le fonctionnement de ces réseaux il faut déterminer correctement les charges thermiques et électriques des bâtiments afin de prévoir et anticiper les besoins en consommation. L'imprévisibilité du comportement énergétique des résidents, en particulier dans le tertiaire, est un obstacle majeur à la modélisation fine de la consommation.

Pour cela, le centre cherche à cartographier les comportements des occupants pour établir un différentiel entre consommations réglementaires et consommations réelles. Pour cela, on va raffiner les modèles de bâtiments en y intégrant différentes modélisations de comportement.

Par exemple, des expérimentations ont été menées par le CMA et l'université Côte d'Azur sur l'utilisation de nudges (coups de pouces) : ce sont des incitations douces et des suggestions indirectes destinées à influencer subtilement les comportements des consommateurs. Dans ce cas, ces nudges avaient pour but de faire passer certains messages spécifiques aux utilisateurs des bâtiments pour leur faire prendre conscience de l'impact de leur comportement sur la consommation d'énergie pour susciter la réduction de leur consommation. Cette première expérimentation a donné des résultats satisfaisants, qui font aujourd'hui l'objet d'une thèse sur l'instrumentation d'équipements sur le campus Pierre Laffite des Mines en combinaison avec des nudges pour évaluer les économies d'énergies permises par ces incitations.

Pour mesurer concrètement l'efficacité des incitations, trois types de modélisation ont été effectuées : une "standard" reposant sur les outils sur le marché, une établie à partir de questionnaires d'utilisateurs du bâtiment et une dernière issue des mesures in situ des différentes consommations. On essaie ensuite à partir de ces trois modélisations de mesurer l'impact des incitations sur la consommation réelle.



Le point de travail principal est dans l'immobilier tertiaire, la facture ne reposant pas sur les habitants contrairement au résidentiel. Dans ce cas, les bâtiments même performants énergétiquement continuent à sur-consommer lorsqu'ils sont mis aux mains des usagers. Il y a toute une partie comportementale à améliorer pour éduquer et inciter les individus à utiliser les nombreux outils qui sont mis à leur disposition pour réduire leur consommation d'énergie. De futures études se pencheront sur l'impact des nudges dans l'immobilier tertiaire sur le résidentiel : va-t-on répercuter de bons comportements au travail sur le résidentiel ?

Additionnellement, il est nécessaire de mener une réflexion sur le niveau de confort thermique et lumineux des bâtiments dans le cadre de la réduction de la consommation énergétique. Dans le tertiaire, ou c'est le gestionnaire du bâtiment et non l'occupant qui a le contrôle de la température et de la luminosité, il va falloir étudier le lien entre ces deux acteurs permettant de régler ce niveau de confort en fonction des besoins économiques et écologiques d'une part et des besoins de l'occupant d'autre part.

### **Les outils pour les décideurs et comment bien les utiliser**

Paula PEREZ-LOPEZ | OIE Mines Paris - PSL

Le centre Observation, Impacts, Energie de Mines Paris - PSL travaille à l'analyse de cycle de vie appliquée à l'évaluation des systèmes de production énergétique eux-mêmes. Aujourd'hui, 75% des impacts sur des catégories telles que le réchauffement climatique peuvent être liés à la consommation énergétique.

Il existe aujourd'hui beaucoup d'outils et d'éléments qui permettent d'accompagner les décideurs pour une meilleure prise en compte des aspects environnementaux dans leur travail. Il reste néanmoins un certain nombre de challenges à discuter pour améliorer les choses.

### **Le manque de données**

Même avec la meilleure méthodologie, on ne peut pas réaliser une bonne analyse sans données de qualité. Dans le cas de l'ACV, on se base sur des bases de données commerciales et sur des données primaires récoltées auprès des industriels. Ces données sont souvent incomplètes et peuvent être biaisées. Si les bases de données et les données primaires sont essentielles à la réalisation d'une ACV, des outils doivent être développés pour évaluer l'influence des hypothèses ou des approches considérées en parallèle des données.

En effet, les décideurs ont besoin de résultats concrets et appliqués à leur situation précise. Des modèles paramétriques permettent d'obtenir des informations plus représentatives de la réalité.

### **Les incertitudes**

Il est essentiel d'identifier et d'analyser les sources d'incertitudes, pour pouvoir les limiter, ou du moins les prendre en compte dans les calculs. Etre conscient des limites des données permet de mieux les traiter. Encore une fois, le développement d'outils peut aider à mieux étudier la sensibilité des résultats à la variation des données.

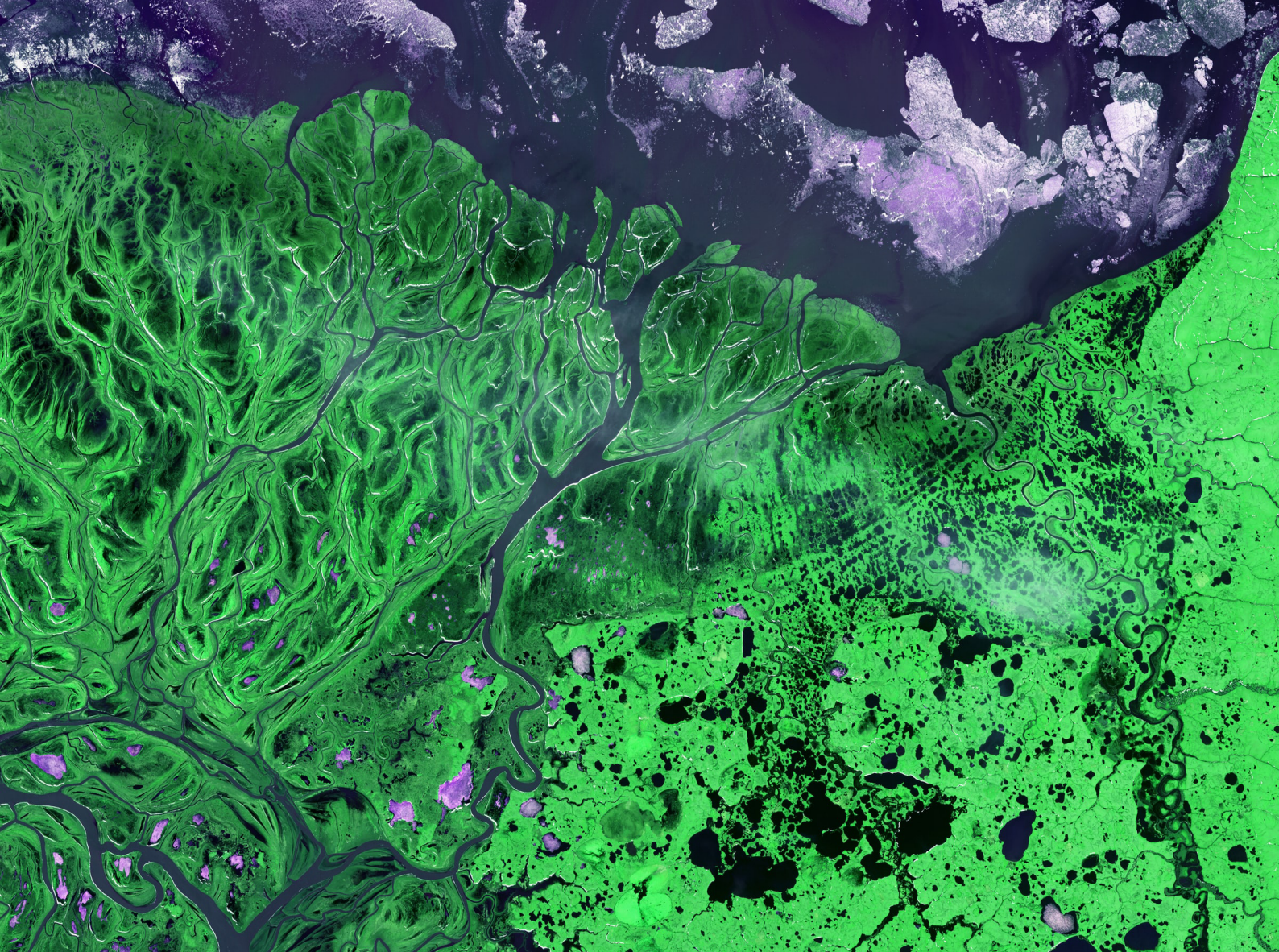
Le groupe de recherche de Paula Perez-Lopez a notamment testé une méthode d'analyse de sensibilité permettant d'identifier les paramètres impliquant la plus grande variation dans les résultats. Cette méthode et son implémentation sous forme de librairie en langage de programmation Python permet ainsi de passer d'un modèle utilisant par exemple une trentaine de paramètres à un modèle simplifié à seulement cinq paramètres clés. Cette simplification est notamment très utile pour les décideurs car elle permet d'adapter un modèle à une situation concrète et à alléger la collecte de données et les calculs.

### **La compréhension du modèle par l'utilisateur**

Si la recherche développe des outils d'analyse complexes et précis, ceux-ci n'ont d'intérêt que s'ils peuvent être appliqués dans des cas concrets. Ainsi, un outil détaillé et précis ne peut être utilisé correctement qu'en favorisant une bonne communication entre les développeurs des modèles et les utilisateurs finaux.

Il est impossible de résumer un ensemble d'indicateurs environnementaux dans une seule valeur agrégée, qui permettrait de prendre des décisions environnementales facilement, sans une perte d'information importante. Il faut abandonner cette idée et poursuivre l'approche multicritère, en favorisant toujours la vision d'ensemble sur la simplification.

Par exemple, l'ACV constitue certes une méthode normée et largement acceptée, mais reste cependant dépendante de nombreux paramètres dont il faut préciser les hypothèses, fondées sur une réflexion solide.



## CONTACT

[🌐 the-transition-institute.minesparis.psl.eu](https://the-transition-institute.minesparis.psl.eu)

[✉ tti.5@minesparis.psl.eu](mailto:tti.5@minesparis.psl.eu)