



Chimie et habitat

François Bertière
François Court
Laurent Duveau
David Gandreau
François Guillemot
Thierry Joffroy
Romain Mesnil
Gautier Renoux
Didier Roux
Michele Schiavoni
Benjamin Touraine
Jean-Paul Viguiier

*Coordonné par
Danièle Olivier
et Paul Rigny*



Chimie et habitat

L'habitat est au cœur des enjeux contemporains : transition écologique, crise énergétique, évolution des modes de vie et besoins sociétaux. Face à ces défis majeurs, la chimie joue un rôle clé en proposant des solutions innovantes pour construire, rénover et habiter autrement.

De la conception des matériaux durables à la décarbonation des processus de construction, en passant par l'op-

timisation énergétique et l'intégration des nouvelles technologies, cet ouvrage offre une vision complète des contributions de la chimie à l'habitat du futur. Il explique par exemple comment l'on pourrait s'inspirer des savoir-faire du passé – maisons en terre, en bois – pour adapter les constructions aux nouvelles contraintes environnementales. Il aborde des thèmes aussi variés que : les matériaux intelligents (vitrages, adhésifs, béton recyclé, bois de construction), les procédés de construction innovants (impression 3D, terre crue, isolation performante), les défis environnementaux (recyclage, économie circulaire, réduction de l'empreinte carbone) ou les enjeux sociétaux (accessibilité, bien-être, urbanisme inclusif).

À travers des exemples concrets et des retours d'expérience, les auteurs montrent comment la chimie permet de concilier performance, durabilité et qualité de vie.



9 782759 840434

edpsciences

www.edpsciences.org

Chimie et habitat



Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et habitat »
qui s'est déroulé le 5 novembre 2025 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Philippe Gœbel

Président de la Fondation internationale de la Maison de la Chimie

Chimie et habitat

François Bertière, François Court, Laurent Dubeau, David Gandreau,
François Guillemot, Thierry Joffroy, Romain Mesnil, Gautier Renoux,
Didier Roux, Michele Schiavoni, Benjamin Touraine, Jean-Paul Viguier

Coordonné par Danièle Olivier et Paul Rigny

Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
EDP Sciences

Crédits couverture :

Images : © Saint-Gobain : 20220509_130756000_iOS, IMG_2616,
Villa-Metro-Business-House-WarsawSKN176 – VIGUIER
Architecture : Résidence Dareau (Paris 14^e) © Takuji Shimmura
– Adobe Stock : © Yousaf, © Eekong, © Konoplizkaya, © Infini
Craft, © DesignID22, © ณภัทร วงศ์มาวิวัฒน์, © Jelena.

Mise en pages et couverture : Christine Porchat
Conception graphique, visuel du colloque : CB Defretin

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-4043-4

ISBN (ebook) : 978-2-7598-4044-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Ce livre ne peut être reproduit ni utilisé à des fins d'entraînement de systèmes d'intelligence artificielle. La fouille de textes et de données est interdite conformément à l'article 4(3) de la Directive (UE) 2019/790.

© 2026 – Fondation de la Maison de la Chimie

Fondation de la Maison de la Chimie
28, rue Saint-Dominique
75007 Paris, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

François Bertière

*Président FIMINCO REIM,
membre de l'Académie
des technologies*

François Court

*Directeur Recherche
et Développement Durable
chez BOSTIK*

Laurent Duveau

*Directeur Performance
Environnementale du Groupe
VICAT*

David Gandreau

*Archéologue, Docteur
en architecture, Chercheur,
Équipe CRAterre, Unité
de recherche AE&CC,
ENSAG-UGA*

François Guillemot

*Responsable de Marché
International Offre Durable
pour le Verre Bâtiment
chez Saint-Gobain Glass*

Thierry Joffroy

*Architecte, Chercheur HDR,
Directeur scientifique
de l'équipe CRAterre
et de l'Unité de recherche
AE&CC, ENSAG-UGA*

Romain Mesnil

*Maître de conférences,
École Nationale des Ponts
et Chaussées*

Gautier Renoux

*Co-président du Groupe
Renoux, Dirigeant ASLED,
INDUSLUM*

Didier Roux

*Académie des sciences,
Académie des technologies*

Michele Schiavoni

*Directeur du département
Couches Minces chez Saint-
Gobain Research Paris*

Benjamin Touraine

*Responsable des Projets amont
chez Mathis*

Jean-Paul Viguier

*Architecte, Urbaniste
chez VIGUIER Architecture
Urbanisme Paysage*

Équipe éditoriale :**Danièle Olivier,**

*Vice Présidente de la Fondation
internationale de la Maison
de la Chimie*

Paul Rigny,

*Conseiller scientifique auprès
du Président de la Fondation
internationale de La Maison
de La Chimie*

*Les articles portant la mention « d'après la conférence de ... » ont été rédigés
par l'équipe éditoriale et leur contenu scientifique a été validé par le conférencier.*

Sommaire

Avant-propos, par Paul RIGNY	9
Préface, par Danièle OLIVIER	11

Partie 1 : L'habitat face aux évolutions du monde

Chapitre 1 : La ville et la construction face aux évolutions du monde : plus denses, plus mixtes, plus inclusives par François BERTIÈRE et Jean-Paul VIGUIER ..	17
--	----

Chapitre 2 : L'habitat innovant au service de notre bien-être et de la planète par Didier ROUX	61
--	----

Partie 2 : La chimie acteur de la décarbonation de l'habitat

Chapitre 3 : Comment décarboner l'industrie cimentière et gérer le recyclage du béton ? d'après la conférence de Laurent DUVEAU	79
---	----

Chapitre 4 : Adhésifs pour concevoir durable et recyclable d'après la conférence de François COURT	91
--	----

Chapitre 5 : Recyclage du verre : exemples du verre plat et de l'isolation par François GUILLEMOT	101
---	-----

Chapitre 6 : Le bois, matériaux de construction durable par Benjamin TOURAINE	119
---	-----

Partie 3 : Innovation et habitat

Chapitre 7 : Les vitrages intelligents
d'après la conférence de **Michele SCHIAVONI** 137

Chapitre 8 : L'impression 3D béton :
un catalyseur pour l'innovation constructive
par **Romain MESNIL** 151

Chapitre 9 : Éclairage LED : la chimie
au service de la qualité de la lumière
d'après la conférence de **Gautier RENOUX** 169

Chapitre 10 : Construire en terre :
les possibles apports de la chimie
par **Thierry JOFFROY** et **David GANDREAU** 179

Avant-propos

En publiant cet ouvrage 15 ans après un premier ouvrage *Chimie et Habitat* – comme elle l'a d'ailleurs fait avec *Chimie et alimentation* – la collection des livres « Chimie et... » de la Maison de la Chimie édité par EDP Sciences, veut attirer l'attention sur l'importance de ces préoccupations dans la société contemporaine. Depuis qu'ils sont sur Terre, les hommes et les femmes réagissent aux contraintes que leur impose la Nature : lutter contre les accidents, les maladies voire les inconforts tout simplement, leur permet de vivre.

Raconter l'habitat, c'est raconter toute l'activité humaine : l'architecture, bien sûr, mais aussi les manières dont les humains vivent ensemble, l'urbanisme, la cohabitation avec la nature, son exploitation sans l'épuiser – autant d'aspects qui résument le génie humain. Les auteurs des chapitres de cet ouvrage n'omettent pas de rendre hommage aux pratiques de l'antiquité, tout en reconnaissant que leurs objectifs actuels restent sans commune mesure, ambitieux au point d'être préoccupants.

C'est que le contexte de l'habitat, aujourd'hui, est marqué

par la surpopulation sans précédent de la planète, qui atteindra bientôt 10 milliards d'habitants, contre un million à la préhistoire. Il est aussi marqué par une évolution climatique qui laisse les futurologues sans certitude quant à la durée de notre présence sur Terre, ainsi que par des incertitudes profondes sur la disponibilité des ressources.

Face à cette évolution, tous les citoyens, toutes les intelligences et toute la puissance technique et scientifique de l'humanité se mobilisent pour « trouver des solutions ». Manque-t-il de matériaux de construction ? Souvenons-nous que l'on a déjà construit des maisons en terre, ou que la forêt offre des ressources. Mais pour construire, il faut de l'énergie, et le pétrole s'épuise : rappelons-nous que le soleil, le vent ou des minéraux (naturels ou synthétiques) encore inexploités pourraient nous être utiles. Prenons aussi conscience que nous pouvons « être plus malins » en économisant ou en recyclant les ressources et l'énergie.

Cependant, tout l'espace que le logement réclame – voire accapare – risque de nous

éloigner de la nature, qui, malgré tout, reste « nourricière ». Tournons-nous alors vers l'imagination remarquable des urbanistes, souvent mise en avant dans cet ouvrage, qui nous permettra de cohabiter sans nous enfermer.

C'est un véritable festival d'imagination, de séduction et d'« optimisme malgré tout » que nous offrent les travaux des architectes, ainsi que ceux des chercheurs et ingénieurs qui cherchent à concrétiser ces idéaux.

Plus précisément, les domaines techniques concernés relèvent, sans surprise, de la chimie des matériaux. Il s'agit de matériaux déjà parfaitement maîtrisés dans l'Antiquité, comme le bois, l'argile ou la terre, utilisés par les Romains ou les Chinois, ou encore le ciment et le béton, mais aussi de matériaux issus des techniques modernes, comme le verre, avec toute la sophistication des mises en forme et de l'intelligence contemporaines. Il y a aussi ceux, souvent sous-estimés, comme les adhésifs, qui sont pourtant indispensables. Ce

dialogue entre l'extraordinairement ancien et le moderne est surprenant, spectaculaire et riche d'enseignements.

En lisant cet ouvrage et en approfondissant les réflexions qu'il suscite, on est frappé par la diversité des formations scientifiques ou techniques des auteurs, par l'étendue de leurs compétences et par la richesse de leurs propositions. On ne peut alors qu'espérer que leurs nombreuses suggestions se transforment en programmes concrets à travers tous les continents. Leur pédagogie, marquée par un enthousiasme contagieux, saura nous rendre compétents à notre tour.

Oui, les défis à relever sont immenses, mais oui, l'optimisme reste réaliste !

NB. Les ouvrages de la collection « Chimie et ... » et leurs ressources sont publiés sur le site <https://www.mediachimie.org>

Paul Rigny

*Conseiller du président
de la Fondation de la Maison
de la Chimie*

Préface

Dans la collection des ouvrages « Chimie et... », celui-ci est le 35^e après un premier ouvrage sur le même thème paru il y a 14 ans. Par ailleurs, la chimie étant présente dans de nombreux domaines et secteurs industriels concernés par l'habitat, nous avons publié de nombreuses ressources en ligne sur ce thème dans notre médiathèque www.mediachimie.com.

Mais pourquoi faire un nouveau colloque et éditer un nouvel ouvrage ?

Nos ressources en ligne ne sont pas obsolètes mais depuis 14 ans, avec l'évolution climatique, l'augmentation de la population urbaine, les problèmes énergétiques, environnementaux et économiques, l'évolution de la société et de son mode vie, de nouveaux besoins et nouveaux défis sont apparus. Ils sont nombreux et concernent l'architecture, l'urbanisme, les matériaux de construction, l'éclairage, l'isolation, la décoration intérieure, etc. Nous avons donc fait des choix car le secteur de l'habitat est en pleine mutation et en développement constant. Il exige de nouvelles compétences ainsi qu'une main-d'œuvre qualifiée, bien formée

et créative. Ces besoins émergents, pluridisciplinaires, révèlent que la chimie y occupe une place centrale et transversale.

La première partie rassemble les conférences plénières généralistes du colloque et montre le lien étroit entre l'évolution du mode de vie, l'urbanisme et l'architecture.

Jean-Paul Viguié, l'un des grands architectes français, et **François Bertière**, spécialiste du développement urbain et architecte de formation, se sont associés pour nous présenter **l'évolution des villes** et notamment des grandes métropoles mondiales face aux défis imposés par les transitions climatiques et énergétiques, pour qu'elles demeurent agréables à vivre et qu'elles respectent les principes de l'économie des ressources et du développement durable. Ces deux experts présentent à partir d'exemples les axes d'évolution de cette décennie et notamment en ce qui concerne le rôle de l'architecte, qui ne doit plus se concentrer principalement sur la construction de nouveaux logements, mais plutôt sur la

transformation des anciens bâtiments industriels ou commerciaux en espaces habitables. La chimie des matériaux occupe une place essentielle pour répondre à cette transformation.

Le chapitre de **Didier Roux** complète cette présentation car il analyse des exemples d'habitat innovant au service de notre **bien-être**, à travers le monde, avec une vision de l'avenir optimiste.

La seconde partie montre comment les industriels utilisent la chimie comme acteur de la décarbonation de l'habitat.

Le **béton** reste un matériau de construction indispensable, mais sa fabrication, notamment celle du ciment, engendre d'importantes émissions de CO₂. La chimie constitue un levier clé pour les recherches menées par le groupe VICAT afin de réduire ces émissions.

Laurent Duveau expose ces avancées, ainsi que les travaux consacrés au recyclage du béton issu de la déconstruction des bâtiments.

Les **nouveaux adhésifs**, grâce à des solutions de collage innovantes, contribuent à réduire l'empreinte carbone de l'habitat. La chimie joue un rôle clé dans l'écoconception, la formulation, le recyclage, et bien d'autres aspects.

François Court, directeur de la recherche chez Bostik, souligne que les adhésifs sont désormais omniprésents, aussi bien dans la construction que dans la rénovation, à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments.

La question du **recyclage en fin de vie du verre plat et de**

la laine de verre est un enjeu majeur à tous les niveaux dans le secteur de l'habitat, un sujet abordé par **François Guillemot**, de Saint-Gobain. Il revient également sur la chimie sous-jacente à la fabrication des verres et sur les efforts de décarbonation des procédés industriels.

Dans la quasi-totalité des constructions, **le bois** peut remplacer avantageusement le béton et l'acier. À partir de l'analyse du cycle de vie du bois, de la forêt à l'utilisation finale, **Benjamin Touraine** du groupe Mathis explique comment le bois peut se positionner comme l'un des principaux leviers de la décarbonation du bâtiment.

La dernière partie présente trois exemples d'innovation dans l'habitat.

Le chapitre de **Michele Schiavoni** de Saint-Gobain sur les **vitrages intelligents** permet de comprendre la place de la chimie dans les évolutions de ces technologies. Il expose les innovations développées pour relever le double défi d'économiser l'énergie et de maîtriser l'apport solaire, ainsi que le fonctionnement des vitrages actifs, capables de moduler en temps réel leurs propriétés optiques en fonction des conditions extérieures ou des besoins spécifiques.

Restons dans l'innovation avec **l'impression 3D en béton** présentée par **Romain Mesnil** de L'École nationale des Ponts et Chaussées. L'impression 3D permet de réduire de 30 % les émissions de CO₂ liées à la production de béton lors d'une construction. Cependant, pour concevoir des bétons adaptés

à cette technologie, il a été nécessaire de retravailler la chimie des adjuvants, d'optimiser la composition des mortiers, et de maîtriser et automatiser le procédé de fabrication.

L'**éclairage LED** est devenu incontournable par son efficacité énergétique et sa durabilité. **Gautier Renoux** souligne l'importance cruciale de la chimie des substrats sur les performances, ainsi que le rôle des phosphores dans la qualité de la lumière. De nombreuses innovations restent encore à explorer pour optimiser à la fois la durabilité et le confort.

Après avoir exploré ces innovations, nous reviendrons, avec **Thierry Joffroy** et **David Gandreau**, sur le renouveau des **constructions en terre**, une tradition revisitée. Nous constaterons que la maîtrise de la chimie de ce matériau naturel, enrichi d'une grande variété d'adjuvants organiques d'origine végétale ou animale

pour en améliorer les propriétés, s'avère particulièrement précieuse. Ce champ de recherche, prometteur, ouvre la voie à des techniques de stabilisation adaptées tant aux exigences de l'architecture contemporaine qu'à la préservation du patrimoine.

Comme tous les ouvrages de la collection « Chimie et... », les contenus de ces différents chapitres sont déclinés en ressources pédagogiques adaptées aux programmes des lycées d'enseignement général, technologiques et professionnels, en ligne dans notre médiathèque www.mediachimie.org.

Je vous souhaite une excellente lecture.

Danièle OLIVIER

*Vice-présidente de la Fondation
internationale de la Maison
de la Chimie*

*Présidente du comité
d'organisation des colloques
de la série : « Chimie et... »*

Partie 1

L'habitat face
aux évolutions du monde

La ville et la construction face aux évolutions du monde : plus denses, plus mixtes, plus inclusives

Jean-Paul Viguier, architecte DPLG, MCP UD Harvard, Anc. Président de l'Académie d'Architecture, nous avait déjà fait le plaisir et l'honneur de faire la conférence plénière d'ouverture il y a 14 ans. C'est l'un des très grands architectes français avec des réalisations emblématiques comme le Pavillon Français à l'Exposition universelle de Séville ou les tours Cœur Défense pour ne citer que ces deux exemples.. Quant à François Bertière, polytechnicien, ingénieur des Ponts, il est aussi architecte et il s'est orienté vers le développement urbain et la construction en étant, par exemple, directeur du développement urbain de la ville nouvelle de Cergy-Pontoise et PDG de Bouygues Immobilier. François est aussi membre de l'Académie des technologies. Ils sont donc tous les deux experts pour présenter les axes d'évolution de l'urbanisme et de l'architecture et la place de la chimie dans cette évolution.

1 L'évolution de la ville face à la transition environnementale¹

Nous avons décidé de présenter un certain nombre de notions sur l'évolution de la ville face à ces problèmes de transition environnementale en montrant comment le génie de l'architecte et sa créativité s'expriment, et finalement, comment les contraintes lui permettent de faire son métier et de bâtir des bâtiments et des villes qui soient plus respectueuses de l'environnement.

L'urbanisation est vraiment l'un des sujets majeurs du 21^e siècle. La **figure 1** est une photo prise de l'espace qui montre l'urbanisation visible à travers l'évolution des lumières de la nuit en Europe entre 1992 et 2010. Vous voyez comment la vue en 2010 est plus éclairée, et si on montrait une photo de l'Asie sur l'Asie,

la différence serait encore plus frappante.

La **figure 2** montre de l'évolution de la densité d'urbanisation d'une métropole comme Bangkok : plus l'image est rouge, plus c'est dense. Dans les années quatre-vingt-dix, il y avait peu de zones avec beaucoup d'habitants (en bleu), soit environ 100 à 150 personnes par hectare. En 2020 la ville s'est considérablement étendue et densifiée (en rouge), ce qui pose évidemment des problèmes d'environnement.

La démographie est une science assez prédictive comme le montre l'évolution des 20 plus grandes métropoles mondiales (**Figure 3**).

La première colonne montre le classement des 20 métropoles mondiales en 2010, puis les colonnes suivantes montrent les classements prévus en 2050 puis en 2100. Bien sûr, en 2100, il peut y avoir quelques imprécisions dans les projections, mais on constate qu'en 2010, Tokyo était la plus grande mégapole mondiale avec 36 millions d'habitants, alors qu'en 2100, ce devrait

1. Transition écologique : passage vers des modes de vie plus respectueux de la planète.

2. Urbanisation : transformation d'un espace naturel ou rural en ville.

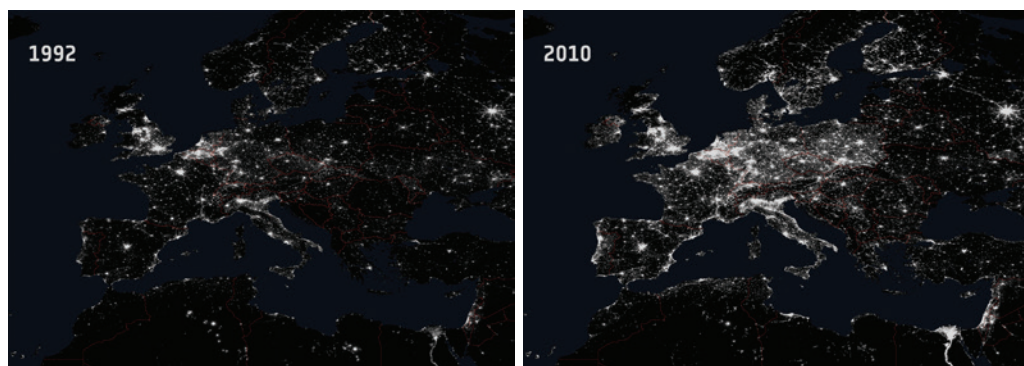
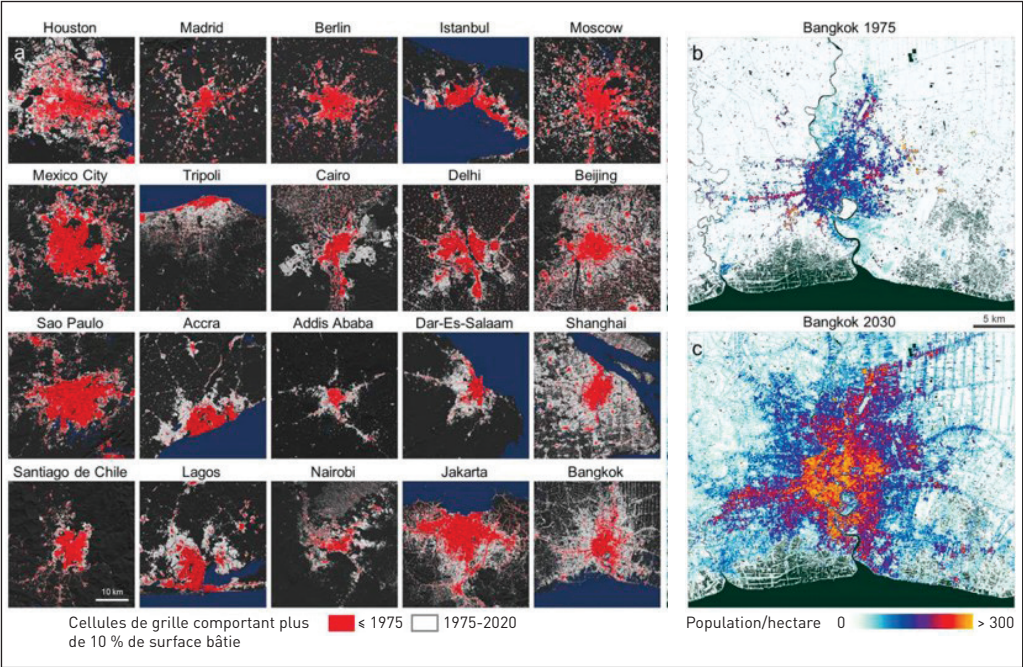


Figure 1

Urbanisation à travers les lumières la nuit en Europe entre 1992 et 2010.



(a)

(b)

Figure 2

[a] Densité d’urbanisation entre 1990 et 2020 et [b] l’évolution de Bangkok.

Source : International Journal of Digital Earth – Page 8 – 2024 – <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2390454>

être Lagos, avec une population estimée à 88 millions d’habitants.

Ce phénomène massif de concentration urbaine va engendrer des défis colossaux qu’il faudra absolument affronter. Cela souligne aussi que, si les enjeux liés aux villes sont cruciaux en France ou en Europe, le développement mondial se jouera principalement en Afrique et en Asie. Et il est clair que les problèmes ne seront pas les mêmes selon l’ampleur et l’influence des métropoles.

2010			2050			2100		
Rang	Nom	Population (en millions)	Rang	Nom	Population (en millions)	Rang	Nom	Population (en millions)
1	Tokyo	36	1	Mumbai	42	1	Lagos	88
2	Mexico	20	2	Delhi	36	2	Kinshasa	83
3	Mumbai	20	3	Dacca	35	3	Dar Es Salam	73
4	Pékin	20	4	Kinshasa	35	4	Mumbai	67
5	Sao Paulo	20	5	Calcutta	33	5	Delhi	57
6	New York	19	6	Lagos	33	6	Khartoum	56
7	Delhi	17	7	Tokyo	33	7	Niamey	56
8	Shanghai	16	8	Karachi	32	8	Dacca	54
9	Calcutta	16	9	New York	25	9	Calcutta	52
10	Dacca	15	10	Mexico	24	10	Kaboul	50
11	Buenos Aires	13	11	Le Caire	24	11	Karachi	49
12	Karachi	13	12	Manille	24	12	Nairobi	46
13	Los Angeles	13	13	Sao Paulo	23	13	Lilongwe	41
14	Le Caire	13	14	Shanghai	22	14	Blantyre	41
15	Rio	12	15	Lahore	17	15	Le Caire	40
16	Manille	12	16	Kaboul	17	16	Kampala	40
17	Moscou	12	17	Los Angeles	16	17	Manille	40
18	Osaka-Kobe	11	18	Chennai	16	18	Lusaka	38
19	Istanbul	11	19	Khartoum	16	19	Mogadishu	36
20	Lagos	11	20	Dar Es Salam	16	20	Addis-Abeba	36

Figure 3

Évolutions du classement des 20 métropoles mondiales.

Source : Global Cities Institute.

3. Densité : nombre de personnes ou de logements sur une surface donnée.

1.1. La ville et la transition énergétique

Il faut bien comprendre que les villes sont à la fois le moteur et les victimes du réchauffement climatique⁴. La **figure 4** est un tableau issu du C40, Organisation des grandes métropoles mondiales qui travaille sur ces sujets de durabilité⁵. Il est généralement admis qu'à peu près 70 % des émissions de gaz à effet de serre (GES) proviennent des villes à travers trois sources principales : le chauffage des bâtiments (en bleu), les systèmes de transport et la gestion et la production de déchets (en vert). On constate que l'habitat joue effectivement un rôle clé et que les proportions varient selon les formes urbaines.

4. Réchauffement climatique : augmentation progressive de la température moyenne de la Terre.

5. Durabilité : répondre aux besoins actuels sans empêcher les générations futures de vivre correctement.

Cela révèle qu'en fonction de la façon dont on conçoit, dont on gère et dont on organise les villes, on peut exercer une influence majeure sur leurs émissions de gaz à effet de serre. C'est précisément ce sujet que nous allons aborder dans ce chapitre.

1.2. La ville et la transition écologique

La transition écologique en France passe par la maîtrise de l'étalement urbain, car les villes occupent des terres, une ressource par nature limitée et non renouvelable. Cette artificialisation des sols menace directement la biodiversité et les écosystèmes.

L'évolution au niveau national de la consommation d'espace entre 2010 et 2022 est présentée en **figure 5**. En vert, on trouve l'habitat ; en

6. GES : gaz qui retiennent la chaleur dans l'atmosphère (CO₂, méthane...).

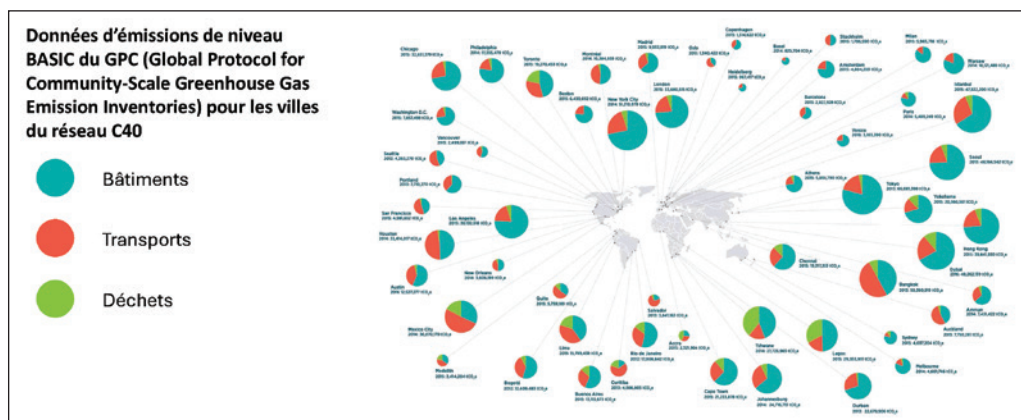


Figure 4

Taux d'émission de GES en fonction de leur provenance dans différentes villes mondiales.

Source : GHG Emissions Explorer, C40.

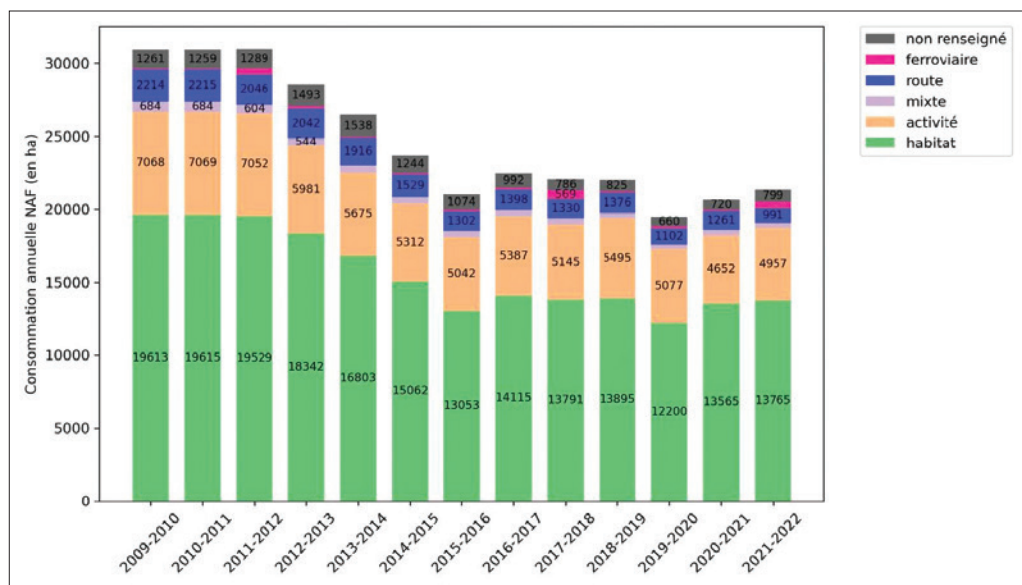


Figure 5

Consommation d'espaces 2009-2022 par destination au niveau national.

Source : Analyse de la consommation d'espace, rapport 2009-2022 – Cerema 2023.

jaune, les activités ; le reste correspond aux routes et aux différentes infrastructures. La consommation d'espace a diminué, mais sans baisse spectaculaire. En France, nous artificialisons encore environ 25 000 hectares de terres chaque année pour répondre aux besoins urbains. Pour vous donner une idée, 25 000 hectares, c'est l'équivalent de la superficie du Val-de-Marne – un chiffre loin d'être anodin. Cela montre qu'il reste un travail considérable pour réduire l'étalement urbain, ce qui nous conduit naturellement à la question suivante : comment limiter cette consommation d'espace ?

L'enjeu est de densifier la ville, c'est-à-dire d'augmenter le nombre de mètres carrés construits par mètre carré de terrain. La **figure 6** illustre

l'évolution de la consommation d'espace sur la même période, en montrant combien de mètres carrés de terrain sont nécessaires pour construire un mètre carré de bâtiment.

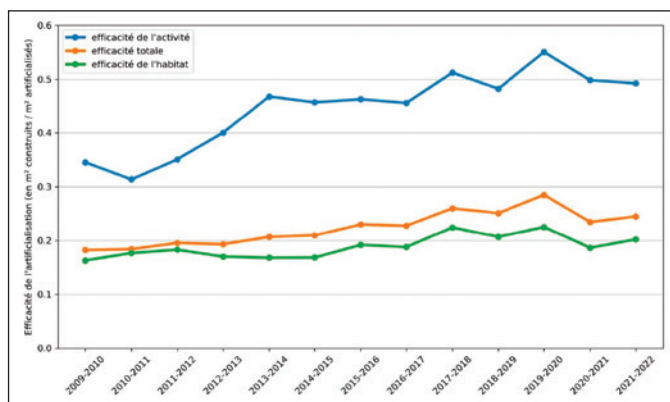


Figure 6

Évolution de l'efficacité de la consommation d'espaces 2009-2022.

Source : Analyse de la consommation d'espace, rapport 2009-2022 – Cerema 2023.

La courbe verte concerne le logement : elle révèle qu'en moyenne, depuis dix ans, pour construire un appartement de 100 mètres carrés, on utilise environ 500 mètres carrés de terrain. Cela signifie que la densité reste faible. En France, même dans le collectif, la moyenne correspond souvent à une maison individuelle sur un terrain de 500 mètres carrés. On constate ainsi que les marges de progression sont encore importantes.

2 Les enjeux urbains : atténuation et adaptation

Les villes sont à la fois le moteur et la victime du réchauffement climatique. Les moteurs, parce qu'elles émettent 70 % des gaz à effet de serre, et la victime parce qu'il y a beaucoup de problèmes urbains qui proviennent du réchauffement climatique.

La montée du niveau de la mer représente une menace majeure, car une grande

partie de la population vit en zone côtière, ce qui risque de devenir critique dans certains pays.

Les îlots de chaleur urbains⁷ causent chaque année un nombre élevé de décès.

Les engorgements urbains créent tous les problèmes que vous connaissez.

Quand on est face à de tels problèmes, pour lutter contre le réchauffement climatique, il y a aujourd'hui trois stratégies à mettre en œuvre (**Figure 7**).

Le premier axe c'est l'atténuation, qui consiste à mettre en place des mesures pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Rappelons que l'Accord de Paris⁸, signé il y a dix ans, vise à limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C d'ici 2050. Or, il est désormais évident que cet objectif ne sera pas atteint. Selon les scénarios du GIEC⁹, le plus pessimiste table même sur une hausse de 4 °C en 2050, avec des conséquences dramatiques. Il est donc indispensable, d'une part, d'intensifier les efforts d'atténuation pour limiter au maximum cette augmentation, et d'autre part, de se préparer à s'adapter à un réchauffement qui, quoi qu'il arrive, dépassera probablement 1,5 °C, cette adaptation constituant le second axe.



Figure 7

Les stratégies de lutte contre le réchauffement climatique.

7. Îlot de chaleur urbain : zone de la ville plus chaude que la campagne autour.

8. Accord de Paris : accord international pour limiter le réchauffement climatique.

9. GIEC : groupe de scientifiques qui étudient le climat mondial.

2.1. Le premier enjeu urbain est la densité

La première idée est la suivante : plus une ville est dense, moins elle émet de gaz à effet de serre, et donc moins elle contribue au réchauffement climatique. Deuxièmement, plus elle est dense, moins elle consomme d'espace, car on construit davantage de bâtiments sur une même surface, ce qui permet d'économiser du terrain.

Sur la **figure 8**, l'axe horizontal représente la densité urbaine (nombre d'habitants par hectare), et l'axe vertical, la consommation de carburant. Bien que cette dernière ne couvre pas l'ensemble des émissions urbaines, elle

constitue un indicateur clé des émissions liées aux transports.

Les résultats sont sans appel : plus une ville est dense (plus on se déplace vers la droite du graphique), plus sa consommation annuelle de carburant diminue. La forme urbaine joue donc un rôle crucial, mais le modèle de développement l'influence aussi : en bas à droite, on trouve certaines villes asiatiques, tandis que les villes européennes se situent plutôt au centre, avec une consommation relativement modérée. En revanche, la consommation explose avec des villes comme celles d'Australie, et atteint son maximum avec les villes américaines, conçues avant tout pour et par la voiture, avec

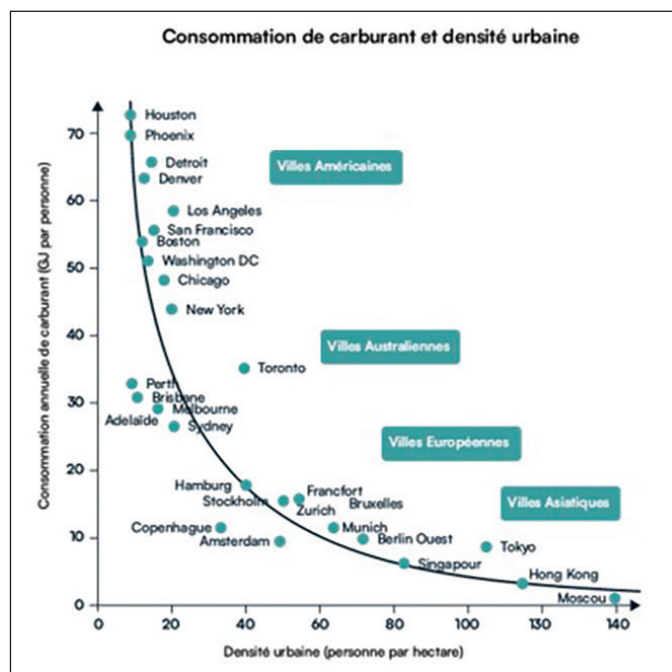


Figure 8

Consommation de carburant et densité urbaine.

Source : Étalement urbain et politique climatique, Direction générale de l'énergie et du climat, Déc. 2010.

en tête Houston, Phoenix ou Detroit.

Pour limiter la hausse des températures mondiales, il est donc essentiel de densifier les villes. Mais cette densification soulève une question majeure pour les urbanistes, les planificateurs et les architectes, comme Jean-Paul Viguier : pour une densité donnée, la forme même de la ville influence-t-elle sa consommation énergétique ? Quel est l'impact de la centralisation ?

La **figure 9** illustre quatre métropoles : Paris (en haut à gauche), New Delhi (en haut à droite), Medellín (en bas à gauche), Niamey (en bas à droite).

gauche) et Niamey (en bas à droite). Ne vous attardez pas sur les couleurs en elles-mêmes : elles représentent un coefficient mesurant la centralité¹⁰ de la ville. Plus la teinte est claire, plus l'intensité des activités économiques y est forte ; à l'inverse, moins elle est claire, moins ces activités y sont concentrées.

Prenons l'exemple de l'agglomération parisienne : on observe une centralisation

10. Centralité : importance stratégique des quartiers centraux en tant que points focaux des activités économiques, sociales et culturelles.

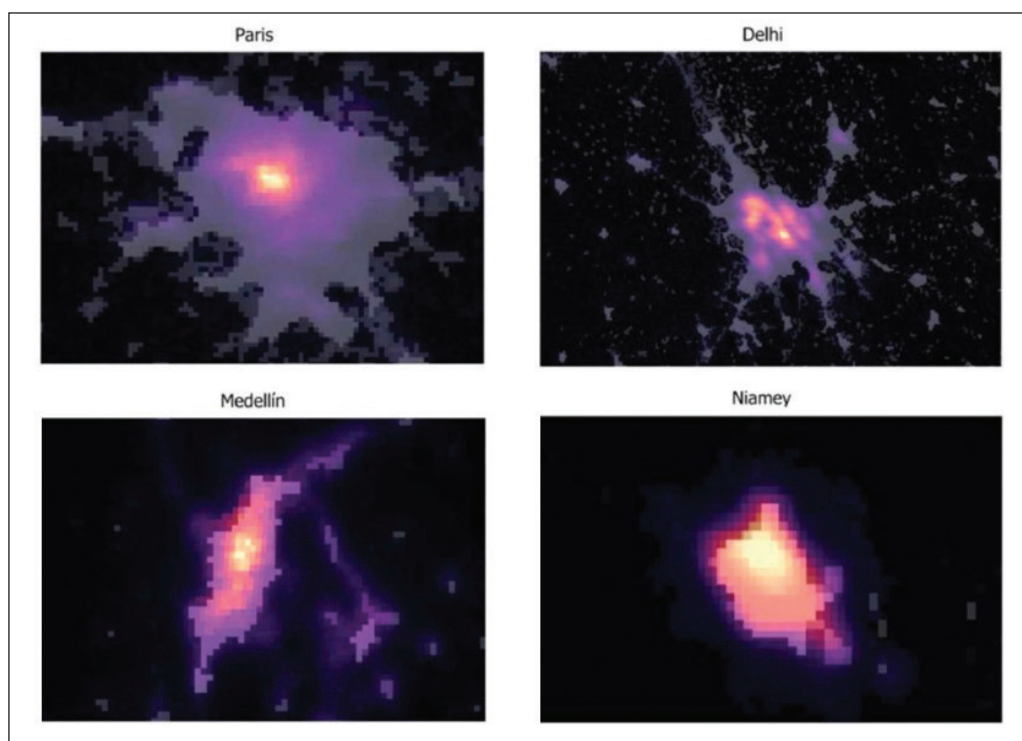


Figure 9

Effet de centralité de quelques villes mondiales.

Source : Quel est le lien entre la densité des villes, leur taille et leur impact carbone ? un panorama international, Elisa Dienesch - Retranscription de la conférence du 19 janvier 2024 à Sciences Po (Paris) Colloque Organic Cities.

extrême. À l'inverse, Niamey, en bas à droite, présente des activités très dispersées. À partir de ces documents de recherche, si l'on analyse les émissions de gaz à effet de serre, un constat s'impose : plus une ville ou une mégapole est centralisée, plus ses émissions sont élevées, car elle génère davantage de mouvements pendulaires entre la périphérie et le centre. C'est d'ailleurs l'un des défis de Paris, très centralisée, alors qu'à Niamey, les activités sont réparties sur l'ensemble du territoire. Delhi, quant à elle, illustre une organisation polycentrique.

La conclusion de ces études est claire : pour les petites villes (jusqu'à quelques dizaines de milliers d'habitants), une forte centralisation peut réduire les émissions de

gaz à effet de serre. Mais plus une ville grandit, plus la centralisation aggrave ses émissions. Pour les mégapoles, la solution réside donc dans une conception polycentrique ou une évolution vers ce modèle. C'est d'ailleurs une question centrale du plan d'aménagement de l'Île-de-France.

La ville dense n'est pas toujours celle que l'on croit

Pour beaucoup, densité rime avec béton¹¹, grands ensembles, tours et barres. Pourtant, cette idée est fausse. La **figure 10** présente différentes formes urbaines réelles. Sur la barre grise, avec la grande flèche, est indiquée la densité urbaine, mesurée en nombre de logements par

11. Béton : mélange de ciment, d'eau, de sable et de graviers.



Figure 10

Densité et formes urbaines.

Source : Densité et formes urbaines, vers une meilleure qualité de vie, Mégane Lefebvre Institut Paladio – Septembre 2013.

hectare. Cette densité varie de 5 logements par hectare à plus de 400. On constate ainsi que même les maisons individuelles, situées à gauche du graphique, peuvent atteindre des densités élevées, allant jusqu'à 50 ou 70 logements à l'hectare.

Les villes-centres, comme le centre de Paris, se situent tout à fait à droite du graphique, avec plusieurs centaines de logements à l'hectare. Contrairement aux idées reçues, les tours, les barres et les grands ensembles se trouvent en réalité au milieu de

l'échelle, entre 70 et environ 100 logements par hectare. Il ne faut donc pas associer systématiquement la densité à des tours et des barres, ni la considérer comme quelque chose de négatif ou d'inhabitable. En revanche, concevoir une densité acceptable exige beaucoup d'intelligence, de soin et de talent de la part des architectes et des urbanistes. Jean-Paul reviendra plus tard sur ses réalisations en la matière.

La **figure 11** illustre cette même idée à travers des photos d'opérations urbaines réelles, pour lesquelles nous avons calculé la densité en logements par hectare. On observe que les tours et les barres, situées en haut à droite, atteignent 58 logements à l'hectare, alors que les centres d'agglomérations affichent des densités bien plus élevées. L'essentiel est de saisir que l'architecture et l'urbanisme savent créer une densité qui reste agréable à vivre.

Sur la **figure 12**, je tenais à vous présenter le Plan Voisin, conçu par l'architecte et urbaniste de renom Le Corbusier. Ce plan, élaboré il y a exactement cent ans, en 1925, montre le centre de Paris en bas à droite, avec l'île de la Cité et le Louvre. Le Corbusier y imaginait une ville radicalement réorganisée : un ensemble géométrique composé de tours de logements monumentales, traversées par une grande autoroute urbaine. Ce projet s'appuyait sur ce qu'on appelait alors la Charte d'Athènes, une théorie prônant le zonage strict de l'espace : des zones dédiées

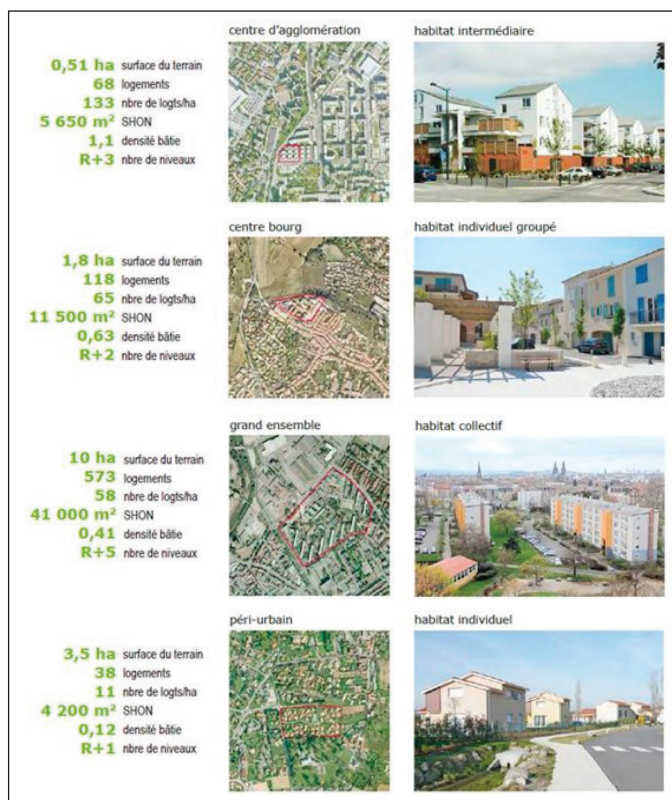


Figure 11

Type d'aménagement d'espace et le nombre de logements à l'hectare.

Source : Densité et formes urbaines, vers une meilleure qualité de vie, Mégane Lefebvre Institut Paladio – Septembre 2013.

à l'habitat, d'autres aux activités, des autoroutes pour les relier, et des espaces ouverts pour faire circuler l'air et la lumière.

Heureusement, ce plan n'a jamais vu le jour, car il aurait impliqué de raser le centre de Paris. Une remarque s'impose : cette vision était en réalité moins dense que le Paris actuel. Par ailleurs, je doute qu'elle aurait été très agréable à vivre, et elle s'avérait finalement moins efficace en termes d'aménagement que ce que nous connaissons aujourd'hui. Il est aisé de critiquer avec le recul, mais à l'époque, ce projet était une réaction contre la ville surpeuplée et insalubre. N'oublions pas que les logements étaient alors bien moins équipés qu'aujourd'hui, et que les conditions d'hygiène laissaient à désirer.

Si ce plan n'a pas été réalisé, il a néanmoins laissé des traces dans notre façon de penser la ville, notamment à travers le zonage : cette logique qui consiste à attribuer des fonctions spécifiques à chaque partie de l'espace urbain.

Le zonage va à l'encontre de l'économie d'énergie et de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En séparant habitat et emplois, il contraint les habitants à des déplacements constants entre les deux. Pourtant, ce principe, qui a fondé l'urbanisme jusqu'à aujourd'hui, est en train de s'effacer progressivement. Pendant des décennies, en France, les villes ont été conçues selon cette logique, comme en témoigne un quartier emblématique : La Défense.



Figure 12

Plan Voisin du Corbusier.

Source : BNF.

Son deuxième défaut est sa rigidité, alors qu'une ville doit pouvoir s'adapter et évoluer. Jean-Paul Viguier reviendra sur ce point, car les contraintes ne sont plus les mêmes qu'il y a 14 ans (exposées lors du colloque *La chimie et l'habitat*¹²), et elles auront encore changé dans 20 ans. Enfin, le zonage ne favorise pas la mixité urbaine¹³, pourtant essentielle au bon fonctionnement de la ville et à son équilibre social.

2.2. Le second enjeu urbain : la mobilité

La mobilité est étroitement liée à la densité urbaine, car l'objectif principal est de réduire l'usage

12. Le livre associé à cette conférence, identifié par l'ISBN 978-2-7598-0642-3, est disponible sur le site <https://laboutique.edpsciences.fr/produit/525/9782759812219/la-chimie-et-l-habitat>.

13. Mixité urbaine : coexistence, au sein d'un même quartier, de personnes issues de milieux sociaux, culturels et économiques variés.

de la voiture individuelle. La **figure 13** illustre clairement ce point : elle présente les émissions de CO₂ par kilomètre, exprimées en grammes de CO₂ par voyageur. La voiture individuelle émet 177 grammes, contre 132 pour le bus en ville et seulement 5 pour le train. L'avion, quant à lui, n'est pas pris en compte ici, car il n'est pas pertinent dans un contexte urbain. Ces chiffres montrent à quel point la voiture est une source majeure de gaz à effet de serre.

Certains pourraient objecter que la voiture deviendra électrique. Même si l'électricité est verte, cela réduira les émissions, mais cette transition prendra du temps. Par ailleurs, la voiture individuelle consomme énormément d'espace urbain : routes, stationnements en surface et même

souterrains, ces derniers étant particulièrement coûteux. Il est évident que la voiture est incompatible avec une ville dense et durable.

Il faut limiter l'usage de la voiture individuelle

Entre 2008 et 2019 (**Figure 14**), les déplacements en ville et les voyageurs-kilomètres ont peu évolué. La partie en vert foncé représente l'usage des véhicules particuliers, tandis que la zone en rouge correspond aux transports collectifs, que l'on sait moins émetteurs et plus efficaces. En revanche, on observe une légère augmentation des modes actifs, terme utilisé par les spécialistes pour désigner la marche à pied, le vélo et même le vélo électrique.

Comme pour la consommation d'espace, il reste un travail important à accomplir :

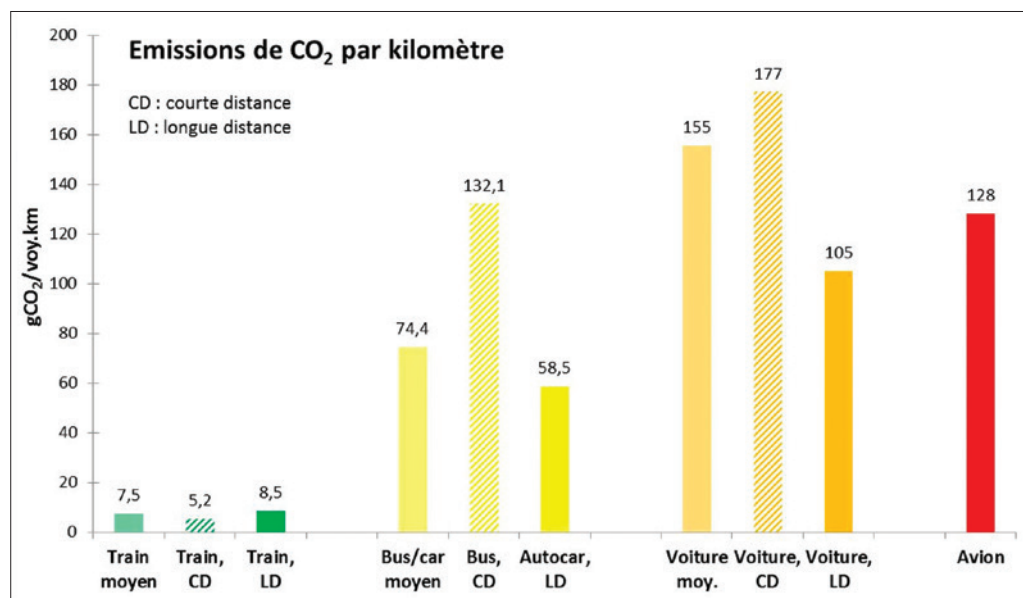


Figure 13

Émissions de CO₂ par kilomètre et par moyen de transport.

Source : Emission de CO₂ par mode : détail des calculs, Institut Louis Bachelier.

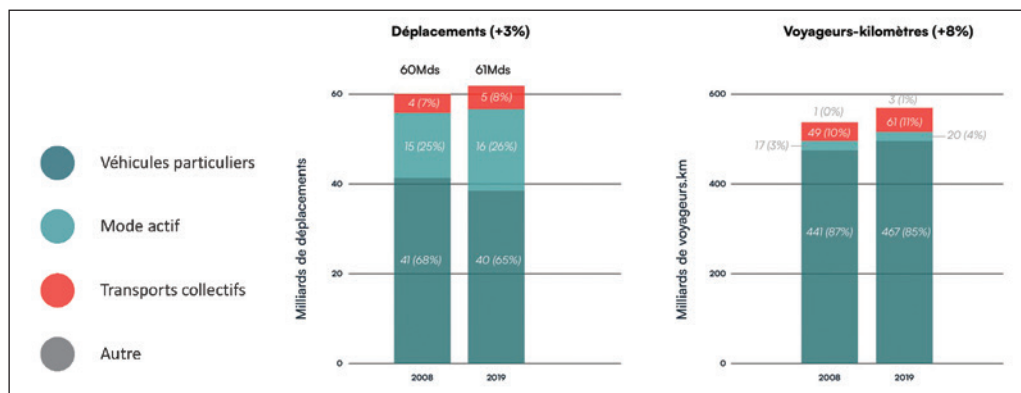


Figure 14

Évolution des moyens de transport entre 2008 et 2019.

Source : ART d'après ENT2008, EMP 2019.

les objectifs sont encore loin d'être atteints, et la progression est lente. Idéalement, la part des transports collectifs (en rouge) devrait augmenter bien plus significativement.

Pour clore cette réflexion sur la mobilité, examinons le diagramme de la **figure 15**. Celui-ci vise à illustrer quel est le moyen de transport optimal pour organiser les déplacements des personnes (et éventuellement des marchandises) au sein d'une ville, en fonction de sa densité.

Il est relativement simple d'organiser des transports en commun dans un centre-ville dense. À Paris, par exemple, le métro rend l'usage de la voiture moins indispensable. En revanche, la véritable difficulté réside dans les zones périurbaines et les secteurs peu denses, où il est compliqué de limiter l'usage de la voiture individuelle et bien plus difficile de mettre en place des transports en commun efficaces.

Sur la **figure 15**, l'axe des abscisses représente les

volumes de déplacements, qui reflètent en réalité la densité, la demande de mobilité étant directement liée à celle-ci. En ordonnée, on trouve les distances, allant jusqu'à 100 kilomètres. Ce diagramme montre que jusqu'à 1 kilomètre, on privilégie la marche ; jusqu'à 4 kilomètres, le vélo est le mode de déplacement adapté. Au-delà, les solutions varient en fonction de la densité : dans les centres-villes denses (zone verte), l'usage de la voiture diminue au profit d'alternatives plus adaptées.

Aujourd'hui, la plupart des villes développent des systèmes de transports en commun multimodaux, combinant train, métro et tramway. On constate que plus on se rapproche du centre-ville, plus il devient nécessaire de recourir à cette multimodalité : un trajet ne se limite plus à une simple ligne de métro, mais implique souvent d'enchaîner plusieurs modes de transport – voiture, métro, bus, etc. – ce qui soulève des défis complexes en matière d'organisation.

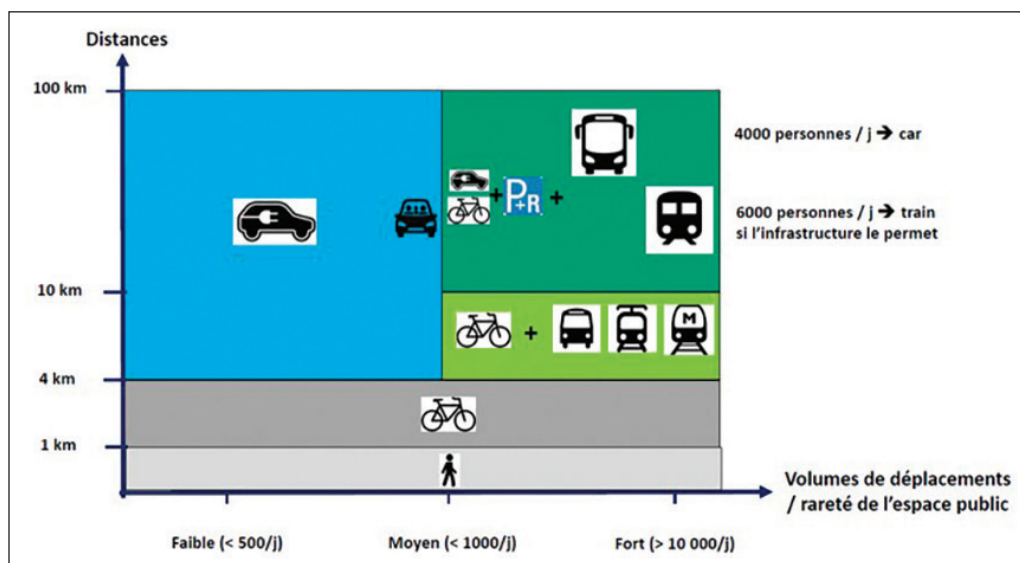


Figure 15

Mode de transport à privilégier selon les situations.

Source : Mobilité, la redoutable équation du carbone, de l'équité et de l'efficience, Jean Coldefy, ATEC ITS France Nov 2024.



Figure 16

L'intérêt des plateformes IA : lignes de covoiturage et véhicules autonomes.

C'est dans ce contexte que la gestion d'un système de transport multimodal fluide et intégré devient un enjeu clé pour la mobilité en France dans les années à venir. L'objectif ? Permettre aux usagers d'utiliser un seul titre de transport pour passer facilement d'un train à un Vélib', puis au métro, sans rupture. Cependant, cela pose des défis à la fois techniques et administratifs, car les acteurs impliqués – RATP, SNCF, autorités locales, gestionnaires de Vélib' – sont multiples et distincts. Organiser cette coordination représente donc un véritable nœud dans l'évolution des villes occidentales.

Les plateformes IA représentent une innovation dans ce domaine (Figure 16)

Dans les zones peu denses, des expériences innovantes

ont été menées, comme les lignes de covoiturage organisées en grande banlieue. Le principe est simple : un conducteur privé suit un itinéraire fixe, à l'image d'une ligne de bus, et s'arrête à des points prédéfinis pour prendre des passagers. Certaines collectivités prennent en charge une partie des coûts pour les conducteurs, via des plateformes dédiées. Cette solution revient moins cher que la mise en place d'un réseau de bus classique.

Parallèlement, les plateformes de véhicules autonomes se développent rapidement. Waymo, filiale de Google, connaît un essor fulgurant aux États-Unis et devrait arriver en France. Plus de dix villes américaines proposent déjà ce service, qui fonctionne sur le même modèle qu'Uber.

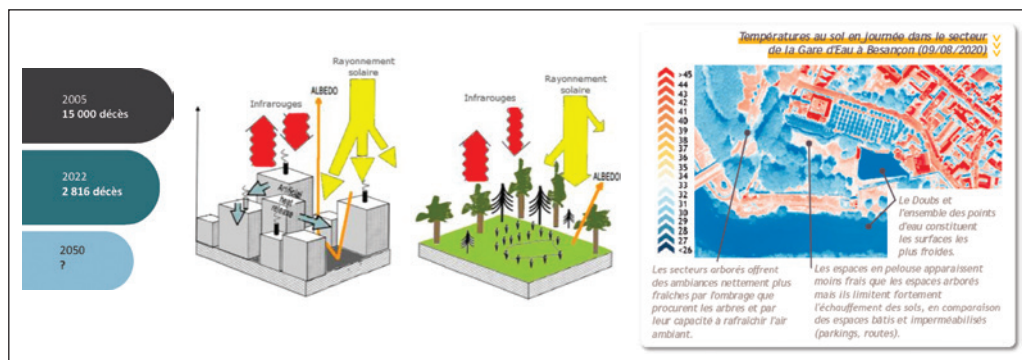


Figure 17

Îlot de chaleur urbain et la nature en ville.

Source : L'Îlot de Chaleur Urbain, la Nature en Ville, Agence d'Urbanisme, Besançon Centre Franche-Comté, mars 2023.

2.3. L'enjeu de la résilience à la canicule

Attardons-nous sur la question des îlots de chaleur urbains. La **figure 17** présente Besançon (à droite sur la carte), avec les températures enregistrées en août 2020 : le rouge foncé correspond à des pics à 46 degrés, tandis que le bleu indique des températures autour de 25 ou 26 degrés. On observe que les zones bleues sont celles du Doubs, alors que le rouge domine en ville, avec des températures atteignant 46 degrés – une situation insupportable. Les zones en bleu clair représentent les espaces arborés, et celles en rose clair, les pelouses. Cela montre clairement que la végétation en ville joue un rôle clé pour atténuer l'augmentation des températures.

Le petit schéma à gauche explique ce phénomène : le flux d'énergie solaire (en jaune) arrive vers le sol, tandis que le rayonnement infrarouge (en rouge) est réémis. On constate que cette réémission est bien moins intense dans les zones vertes.

Rappelons que lors de la canicule de 2005, les îlots de chaleur ont causé 15 000 décès en France.

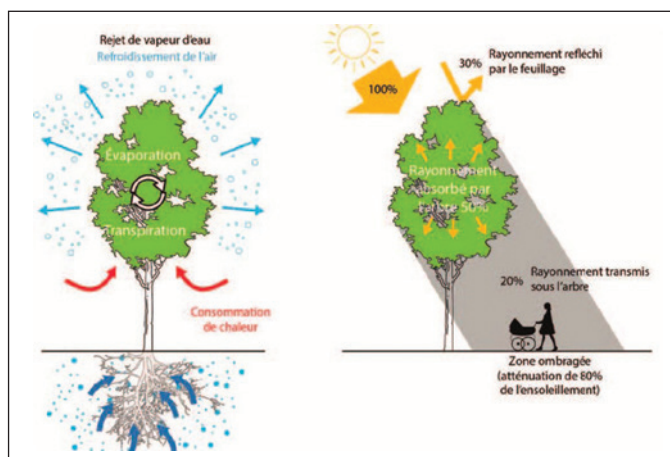
Grâce à la végétation, 80 % du rayonnement solaire incident est dissipé : d'une part, les arbres réfléchissent une partie de cette énergie vers le ciel, et d'autre part, ils génèrent de la fraîcheur par le processus d'évapotranspiration¹⁴ (**Figure 18**). Les arbres puisent

14. Évapotranspiration : processus par lequel l'eau liquide terrestre est renvoyée dans l'atmosphère environnante sous forme gazeuse.

Figure 18

Rôle de la végétation en ville.

Source : Les Îlots de Chaleur Urbains, IAU, novembre 2010.



l'eau dans le sol, qui remonte jusqu'aux feuilles avant de s'évaporer. Ce passage de l'état liquide à gazeux absorbe de l'énergie, ce qui contribue à rafraîchir l'air. Ainsi, l'arbre joue un rôle essentiel en milieu urbain. Comme le disait avec humour Alphonse Allais, humoriste du 19^e siècle, « *il faudrait installer les villes à la campagne* ». Comme nous n'y parviendrons probablement pas, l'idée d'intégrer davantage de nature dans nos villes reste plus que jamais pertinente.

Lorsque l'on ne peut pas intégrer de la campagne dans la ville, la solution devient plus complexe. Il faut alors privilégier les bons matériaux, et c'est là que la chimie entre en jeu. En effet, les matériaux ont un impact majeur sur le réchauffement et la formation des îlots de chaleur. Comme le montre la **figure 19**, lorsqu'un flux solaire incident (en jaune) atteint une surface, les matériaux adaptés en réfléchissent une partie vers l'atmosphère

(c'est ce que représente la grande flèche rouge). Les scientifiques mesurent cette capacité de réflexion grâce à un coefficient appelé l'albédo¹⁵. Exprimé en pourcentage ou en fraction (de 0 à 1), l'albédo indique la proportion d'énergie réfléchiée par le matériau, par opposition à celle qu'il absorbe.

Sur la **figure 19**, le schéma de droite illustre un principe simple : les surfaces noires absorbent la chaleur sans la renvoyer, tandis que les surfaces blanches la réfléchissent. L'albédo est précisément cette fraction de lumière réfléchiée par un matériau non lumineux. La **figure 19** présente d'ailleurs plusieurs matériaux urbains avec leur albédo respectif.

On comprend alors que l'une des pistes pour adapter la ville consiste à modifier les matériaux utilisés, en privilégiant des teintes plus claires,

15. Albédo : capacité d'une surface à réfléchir la lumière du soleil.

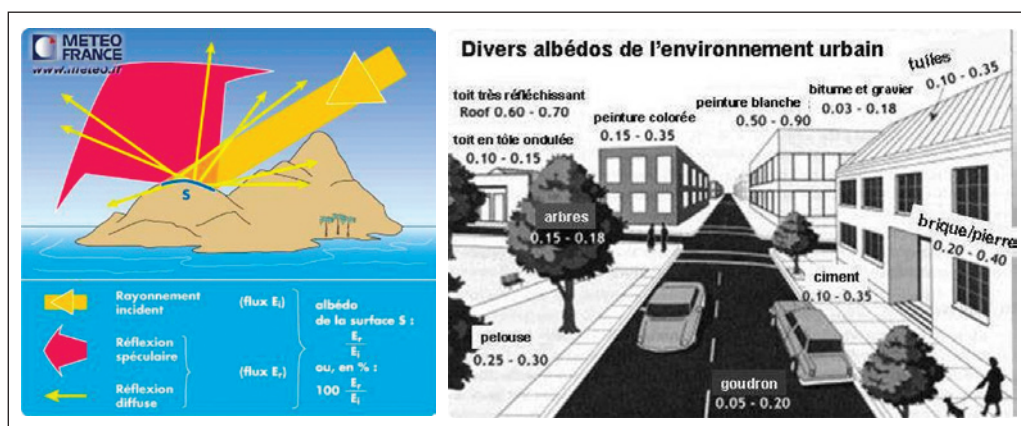


Figure 19

Rôle des matériaux : réflectance et albédo.

Source : Les Îlots de Chaleur Urbains, IAU, novembre 2010.

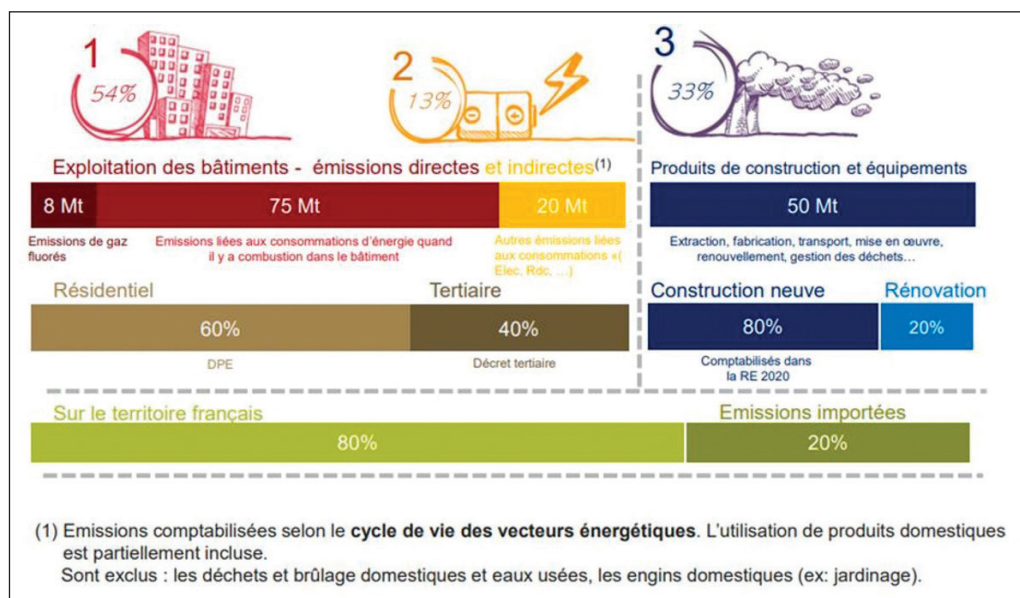


Figure 20

Émissions carbone liée au secteur de construction par catégorie.

Source : Ministère Transition Ecologique – Document de travail 59 – 2022.

et ce aussi bien pour les sols que pour les façades ou les toitures. Ces choix peuvent avoir un impact significatif sur l'absorption d'énergie et, par conséquent, sur la formation des îlots de chaleur. L'expérience le confirme : en plein soleil, une route goudronnée est bien plus chaude qu'une surface claire. Autant de questions que les architectes, comme Jean-Paul Viguier, doivent intégrer dans leur réflexion lors de la conception des bâtiments.

Passons maintenant à la question de l'énergie insérée dans les bâtiments. La première ligne de la **figure 20** montre les émissions de carbone des bâtiments tout au long de leur cycle de vie.

À gauche du graphique, on observe que près des deux

tiers des émissions de carbone liées aux bâtiments proviennent de leur phase d'exploitation, c'est-à-dire du chauffage et de l'éclairage. Le tiers restant, représenté par la barre bleu foncé (33 %), correspond aux émissions générées par la construction elle-même, notamment celles liées aux matériaux utilisés. C'est précisément sur cette dernière partie que nous allons nous concentrer.

2.4. Décarboner la construction

La **figure 21** montre que les émissions de gaz à effet de serre liées à la construction représentent 17 % du total, dont 6 % sont attribuables au ciment. Chaque année, environ 4 milliards de tonnes de ciment sont produites dans le monde,

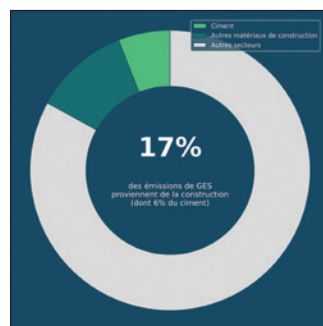


Figure 21

Émission de GES dans l'industrie de la construction.

Source : Cembureau.

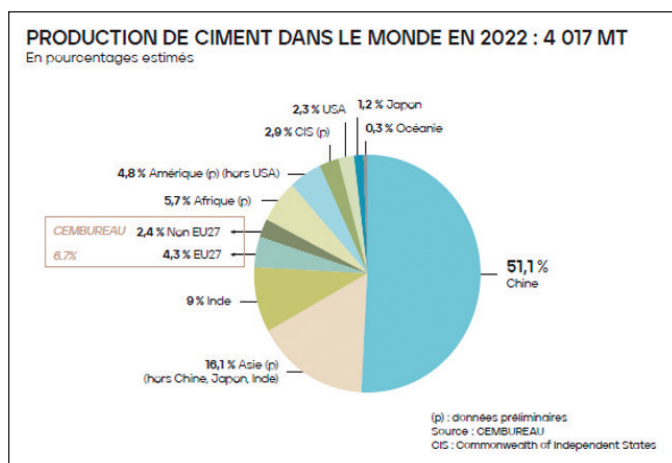


Figure 22

Production de ciment dans le monde en 2022.

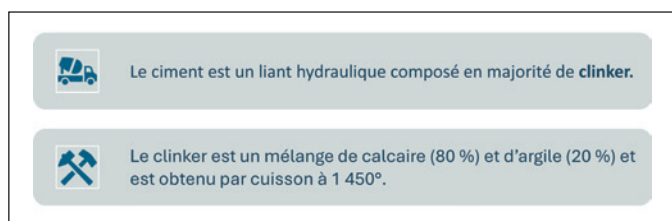


Figure 23

Comment décarboner la construction : problème du clinker.

Source : CSTB.

ce qui en fait probablement le matériau le plus utilisé après l'eau. Cela équivaut à environ 500 kg par personne et par an, dont la moitié est consommée par la Chine. En Europe, la part s'élève à environ 6 %.

Cela continuera d'augmenter jusqu'en 2050 pour atteindre entre 4,7 et 5 milliards de tonnes, ce qui correspond à 2,4 gigatonnes d'émissions de gaz à effet de serre (Figure 22). Ce phénomène constitue donc un enjeu important à l'échelle mondiale.

Il est donc nécessaire de décarboner le secteur de la

construction, en particulier le ciment, qui est un liant hydraulique composé majoritairement de clinker¹⁶ (Figure 23).

Le clinker est obtenu par le chauffage de calcaire et d'argile à 1 450 °C, ce qui explique pourquoi sa production émet du carbone. Le processus de fabrication est présenté en figure 24 : à gauche, l'extraction du calcaire ; au centre, l'étape de chauffage ; et à droite, la production du ciment à partir du clinker. C'est la fabrication du clinker qui génère des émissions de carbone, représentant environ 40 % des émissions de CO₂ du ciment.

60 % des émissions de CO₂ du ciment proviennent de la réaction chimique elle-même (Figure 25). Le calcaire (CaCO₃) est chauffé : il reste alors de la chaux (CaO), tandis que le carbone contenu dans le calcaire est libéré dans l'air sous forme de CO₂.

Pour décarboner le béton, plusieurs approches peuvent être adoptées (Figure 26). On peut réduire la quantité de béton utilisée, puis diminuer la proportion de ciment dans le béton, et ensuite réduire la quantité de clinker dans le ciment. Enfin, il est possible d'optimiser le processus de fabrication.

Diminuer l'utilisation du béton et du ciment implique de se tourner vers d'autres matériaux de construction, comme le bois ou la terre crue. À titre comparatif, la construction d'une structure en béton émet environ 200 kg de CO₂

16. Clinker : poudre utilisée pour fabriquer le béton.

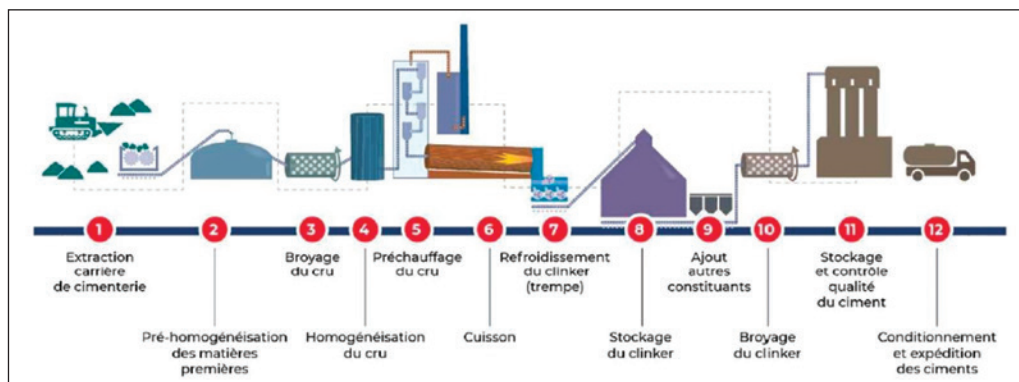


Figure 24

Comment décarboner la construction : processus de fabrication du ciment.

Source : CSTB.

Process > 40 % des émissions
 Réactions chimiques > 60 % des émissions
 $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_{2a}$

Figure 25

Comment décarboner la construction : émission de CO_2 du ciment.

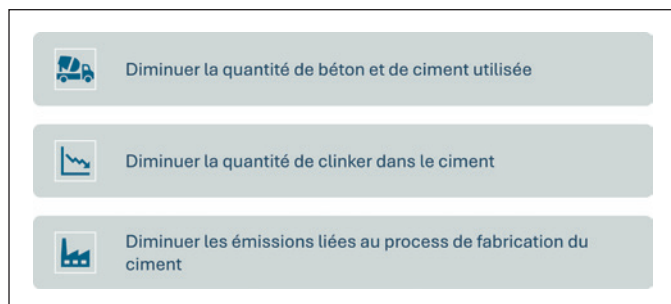


Figure 26

Comment décarboner la construction : comment décarboner le béton ?

par mètre carré, tandis qu'une structure en bois n'en émet que 80 kg (Figure 27).

Il est donc essentiel de substituer le béton et le ciment par d'autres matériaux pour décarboner la construction. Actuellement, une grande

majorité des bâtiments collectifs (90 %, Figure 28, diagramme de gauche) sont encore construits en béton, ce qui montre l'ampleur du défi.

Une autre solution consiste à optimiser les structures en construisant de manière

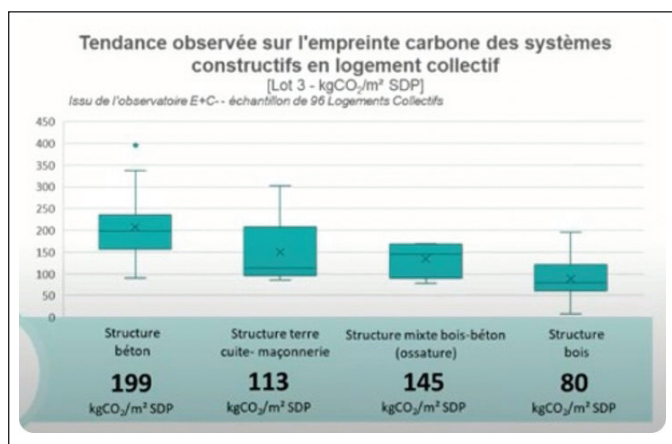


Figure 27

Comment décarboner la construction : diminuer la quantité de béton et de ciment.

Source : Décarboner la filière ciment-béton,
The Shift Project, Jan 2022.

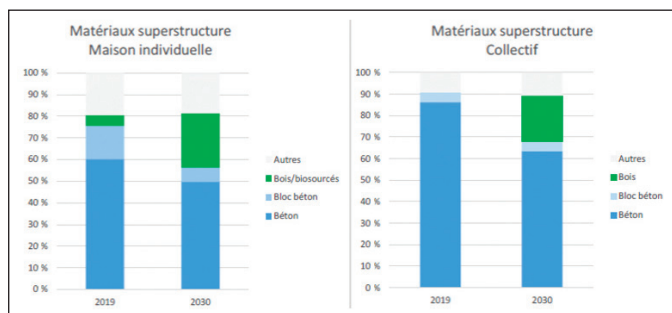


Figure 28

Comment décarboner la construction : substituer le béton par d'autres matériaux.

Source : Décarboner la filière ciment-béton,
The Shift Project, Jan 2022.

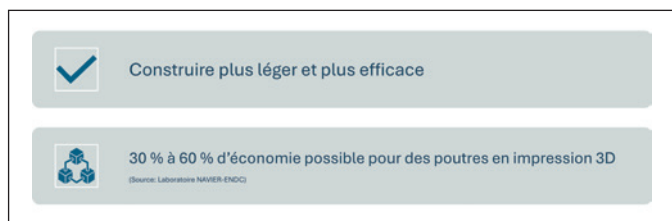


Figure 29

Comment décarboner la construction : optimiser les structures.

plus légère et plus efficace (Figure 29). Cependant, il faut noter que les coefficients de sécurité dans le domaine de la construction sont très élevés (si un avion était fait avec les mêmes coefficients de sécurité qu'un bâtiment, il ne décollerait jamais).

Pour améliorer l'efficacité, plusieurs solutions existent : recourir à l'impression 3D et à l'intelligence artificielle, réduire la teneur en clinker dans le ciment (Figure 30), ou encore le remplacer par d'autres matériaux, comme des laitiers – notamment ceux issus des hauts fourneaux –, des pouzzolanes ou des cendres volantes, qui peuvent également présenter des propriétés hydrauliques.

Actuellement, un ciment traditionnel contient environ 80 % de clinker et 20 % d'ajouts. Pourtant, certains ciments descendent déjà en dessous de 50 %, voire jusqu'à 35 % de clinker, ce qui représente une avancée significative et relève d'une véritable innovation chimique.

Il est aussi possible de diminuer la quantité de ciment dans le béton, mais cette approche reste délicate : réduire la part de ciment affaiblit en effet la résistance du matériau. Les marges de progression sur ce point existent, mais elles restent limitées.

Comment réduire les émissions liées au procédé de fabrication ? Sur ce point, des progrès substantiels ont déjà été réalisés, comme le montre la part croissante de combustibles non fossiles utilisés dans l'industrie cimentière (Figure 31, partie gauche).

Entre 2012 et 2022, les avancées ont été remarquables. Selon la feuille de route, d'ici 2050, l'objectif est d'éliminer la majorité des émissions liées au process, et les résultats actuels permettent d'envisager l'avenir avec optimisme.

La trajectoire globale de décarbonation du ciment est synthétisée dans la **figure 31**.

Les barres grises illustrent les gains possibles grâce à l'optimisation du processus et de la chimie. Cependant, les points de repère fixés pour 2030 et 2050 révèlent une réalité : même en maximisant ces efforts, si l'on ne modifie pas la réaction chimique elle-même, il sera impossible d'éliminer plus de 50 % des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie cimentière. Cela signifie qu'une partie de ces émissions devra nécessairement être capturée et stockée¹⁷.

2.5. Les technologies de rupture

Pour contourner ce problème, une seule solution s'impose : se passer de la réaction chimique en supprimant le calcaire, puisque c'est lui qui contient le carbone.

De nombreuses start-ups planchent sur cette question et proposent des alternatives au calcaire (**Figure 32**). Sans faire de publicité pour ces entreprises, il est encourageant de constater l'ampleur des recherches en cours. Par exemple, chez *Hoffman Green*, on utilise des laitiers

17. Stockage / séquestration du carbone : processus consistant à capturer le CO₂ afin d'empêcher son rejet dans l'atmosphère.

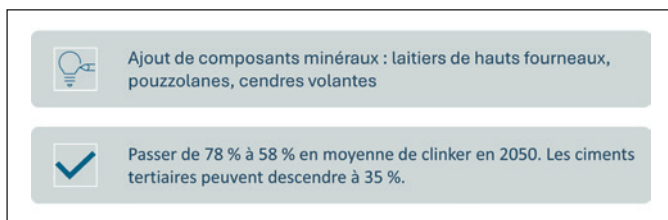


Figure 30

Comment décarboner le béton : diminuer le dosage du ciment dans le béton.

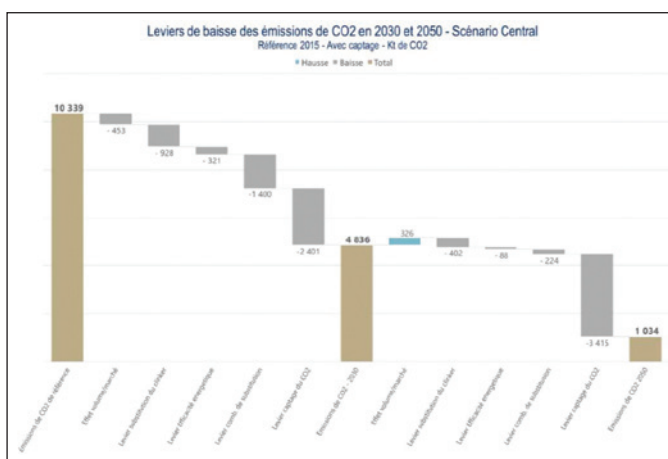


Figure 31

Comment décarboner la construction : trajectoire de décarbonation globale du ciment.

Source : Feuille de route de décarbonation de la filière ciment, DGE – mai 2023.

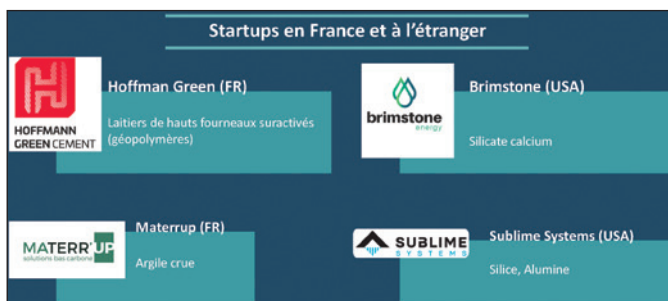


Figure 32

Les technologies de rupture : les start-ups substituent le calcaire par d'autres matériaux.

et des résidus de hauts fourneaux, bien que ces derniers deviennent de plus en plus rares, notamment en France. *Brimstone*, de son côté, mise sur un autre sel de calcium, le silicate, plutôt que le carbonate. *Materrup* explore la terre crue, tandis que *Sublime Systems* développe des solutions sans calcaire, à base de silicate et d'alumine.

Ces avancées sont prometteuses et méritent d'être suivies, car elles dessinent les contours d'un avenir où la décarbonation du secteur passera nécessairement par la découverte de substituts viables au calcaire.

Une autre approche innovante consiste à recarbonater le ciment (*Figure 33*). C'est ce que propose, par exemple, la société suisse *Neustark*, qui inverse le processus en réinjectant du CO_2 dans le ciment pour le transformer à nouveau en calcaire. Ainsi, au lieu d'être une source d'émissions, le ciment devient un puits de carbone, une solution pertinente face à la surproduction de CO_2 . *Solidia* adopte une démarche similaire. Ces méthodes marquent une transition vers des procédés plus durables.

Si les défis urbains appellent à une chimie plus sophistiquée,

il est tout aussi crucial de souligner l'importance de la conception des villes et des bâtiments, ainsi que le choix des matériaux. Nous allons voir comment de grands architectes, grâce à leur talent, parviennent à créer des édifices remarquables en exploitant intelligemment ces matériaux.

3 La ville face à la transition environnementale selon Jean-Paul Viguier

Un défi interdisciplinaire

François Bertière a dressé le tableau du monde actuel et des défis auxquels nous sommes confrontés dès qu'il s'agit d'aménagement urbain, une responsabilité majeure pour nous tous. Comme vous le savez, la population mondiale ne cesse de croître, et il est de notre devoir non seulement de loger ces nouvelles générations, mais aussi de concevoir des villes et des bâtiments où chacun pourra s'épanouir, travailler et se développer.

Cette mission, presque sacrée, exige une approche éclairée et rigoureuse, car les erreurs commises en urbanisme – comme celles de l'après-guerre – sont



Figure 33

Les technologies de rupture : les start-ups recarbonant le ciment.

souvent longues à corriger, voire irréversibles.

Alors, que peut apporter l'architecture en collaboration avec la chimie ? C'est une question que nous nous posons tous, et que je me suis moi-même posée. En effet, bien que je côtoie peu les chimistes, je travaille régulièrement avec les industriels et j'utilise constamment des matériaux. Ainsi, sans toujours en avoir conscience, la question de la chimie se pose fréquemment dans ma pratique : dans les façons d'habiter, de construire, de faire évoluer ou de transformer les espaces. Bref, elle intervient dans presque tous les aspects de ma vie professionnelle.

C'est d'ailleurs pour cette raison que j'ai participé, il y a 14 ans, au précédent colloque *Chimie et l'habitat*, et que je reviens aujourd'hui avec plaisir pour en reparler, car la situation a profondément évolué depuis.

3.1. La ville transformée et non plus créée

Pendant des décennies, et surtout durant l'après-guerre, la ville nouvelle était conçue comme une reconstruction sur un sol libéré de ses anciennes structures. On considérait alors que les bâtiments avaient un cycle de vie limité : une fois ce cycle achevé, ils devaient être démolis pour laisser place à de nouveaux programmes, de nouveaux matériaux, voire de nouvelles architectures. Aujourd'hui, cette approche est devenue bien plus complexe à justifier. En effet, la démolition soulève des enjeux majeurs : la consommation de matières premières, comme l'a rappelé François Bertière, les

émissions de gaz carbonique, la production de nouveaux déchets et des dépenses énergétiques souvent superflues.

La question qui se pose désormais aux architectes – et à laquelle je me suis particulièrement intéressé – est la suivante : face à des bâtiments existants, peut-on les transformer plutôt que les démolir ? Et par transformation, je n'entends pas simplement une rénovation superficielle, comme cela a souvent été fait par le passé, mais une mutation structurelle. Par exemple, peut-on convertir des bureaux inutilisés en logements ? Ou encore, des logements désaffectés en hôtel ? plus généralement modifier la fonction pour laquelle un bâtiment a été construit et le faire renaitre sous une forme nouvelle pour un nouvel usage et une nouvelle architecture.

Autrement dit, les fonctions urbaines peuvent-elles évoluer d'un usage à un autre de manière fluide, tout en s'appuyant sur des technologies et des pratiques vertueuses ? L'objectif est double : d'une part, réaliser cette transformation avec une dépense énergétique minimale, et d'autre part, obtenir un bâtiment qui ne soit pas simplement rafraîchi ou consolidé, mais complètement repensé – c'est-à-dire, en fin de compte, un bâtiment nouveau.

La transformation, plutôt que la démolition : Le bâtiment École des Mines Télécom, Paris 14^e

Le premier exemple que je vais vous présenter est particulièrement révélateur. Il s'agit du bâtiment de l'École des

Mines-Télécom (**Figure 34**), situé rue Dareau à Paris 14^e. Ce type de bâtiment, comme beaucoup d'autres en milieu urbain, appartenait à une Société Foncière. Ces sociétés, en effet, investissent dans l'immobilier pour en faire un capital de croissance : elles louent, transforment ou reconstruisent ces bâtiments, utilisant ainsi le patrimoine immobilier comme levier de développement et d'investissement pour leur activité.

Ce bâtiment, propriété de la grande foncière française *Gecina*, était inoccupé depuis longtemps. Situé dans un cadre agréable, à proximité du parc Montsouris – un quartier élégant du 14^e arrondissement entouré de logements –, il était resté ouvert aux intempéries, parfois squatté, sous les yeux des riverains qui se demandaient : Que faire de ce bâtiment ? C'est précisément la question que m'a posée le propriétaire, *Gecina*, dans le cadre d'un projet économiquement et socialement viable.

La demande était claire : Seriez-vous capable de

transformer ce bâtiment en logements ? La réponse, bien sûr, était positive, mais sous certaines conditions. La **figure 35** illustre cette transformation : à gauche, le bâtiment existant avant les travaux, et à droite, le résultat final. Cependant, nous avons rapidement compris que cette opération n'était pas aussi simple.

En effet, la structure d'un bâtiment de bureaux diffère radicalement de celle d'un bâtiment résidentiel. Un immeuble de bureaux repose sur une organisation horizontale : des plateaux ouverts, avec des escaliers situés aux extrémités pour faciliter la circulation entre les étages. Les gaines verticales y sont rares, tout comme les circulations verticales, à l'exception des sanitaires, parfois.

Un bâtiment résidentiel, à l'inverse, repose sur une structure verticale : il faut organiser les étages pour créer des appartements traversants, permettant de bénéficier de la lumière naturelle des deux côtés. L'idéal pour un logement est d'avoir un ensoleillement optimal, d'une façade à l'autre.

Contrairement aux bureaux, les immeubles d'habitation nécessitent des dalles régulièrement percées de gaines pour accueillir les salles de bain, les cuisines, les toilettes et toutes les canalisations verticales indispensables à la vie quotidienne, ainsi que de nombreuses circulations verticales pour éviter de longs couloirs qui empêchent la transversalité du plan.

De plus, l'isolation phonique y est cruciale : personne ne



Figure 34

Transformation bureaux – logements, Rue Dareau, Paris 14^e ; l'ancienne École des Mines-Télécom.

souhaite entendre ses voisins, une préoccupation bien moins prioritaire dans des bureaux. L'isolation thermique est également un enjeu majeur, car les occupants doivent maîtriser leurs consommations énergétiques, qui impactent directement leurs charges.

Enfin, les logements s'ouvrent sur l'extérieur, contrairement aux bâtiments de bureaux, souvent conçus comme des espaces fermés, climatisés ou chauffés, mais peu connectés à l'environnement extérieur. Dans un logement, les balcons, les fenêtres et les espaces extérieurs sont essentiels : on veut sentir l'air frais, profiter de la lumière naturelle, et pouvoir ouvrir les fenêtres le matin dans sa chambre.

Autant d'exigences qui, à première vue, semblent difficilement conciliables avec la structure initiale d'un bâtiment de bureaux.

Pourtant, nous nous sommes lancés dans ce défi, et vous allez constater que, malgré l'ampleur des travaux, le résultat en valait largement la peine.

Voici ce que nous avons réalisé (**Figure 36**) : les anciennes fenêtres de bureaux ont été transformées en loggias et balcons, créant ainsi des espaces extérieurs indispensables à un logement. La hauteur du bâtiment résidentiel n'est pas la même que celle de l'ancien immeuble de bureaux : elle a été augmentée. Vous remarquerez que toutes les façades, y compris les murs pignons autrefois opaques, ont dû être repensées : il a fallu percer des baies, des fenêtres, des portes-fenêtres, et ajouter des balcons.



Figure 35

Transformation du bâtiment dans la rue Dareau ; à gauche : avant, à droite : après.

Si nous étions restés strictement dans le volume initial du bâtiment de bureaux, le coût des travaux aurait dépassé la valeur capitalisée du bâtiment par la foncière, rendant l'opération économiquement irréalisable. L'agrandissement du volume existant a donc été une condition indispensable. Comme vous l'avez vu sur les images précédentes, nous avons élargi le bâtiment en ajoutant des loggias, des balcons, et en repoussant les



Figure 36

Transformation du bâtiment de la rue Dareau ; à gauche : avant, à droite : après.



Figure 37

Le bois : un choix vertueux de matériau pour la construction des étages supplémentaires.

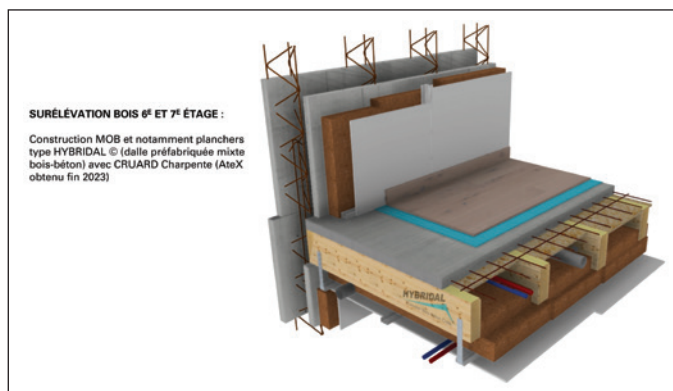


Figure 38

Surélévation bois 6^e et 7^e étages : complexité des assemblages.

murs pour créer des pièces vitrées ouvertes sur l'extérieur. Mais nous avons aussi ajouté des étages supplémentaires.

Ces étages supplémentaires, visibles sur la [figure 37](#), ont été construits en bois. Pourquoi ce choix ? Comme l'a souligné François Bertière, le bois est un matériau vertueux : il séquestre le carbone de manière remarquable, et il est plus léger et plus facile à mettre en œuvre que le béton, qui aurait pourtant été une

extension logique, l'immeuble existant étant en béton.

En outre, le bois présente l'avantage d'être léger : les fondations et les structures existantes de l'immeuble ont pu être conservées, avec seulement un léger renforcement des fondations, mais sans toucher aux structures de plancher. Non seulement le bois est plus léger que le béton, mais en plus, le chantier s'en trouve simplifié et bien plus agréable ([Figure 38](#)).

C'est un atout majeur en milieu urbain, où les travaux s'effectuent au cœur de zones habitées. Les riverains n'ont pas envie de subir quotidiennement le passage de camions de béton, la poussière, la boue ou le bruit.

Construire en bois, c'est aussi plus simple sur le principe : on livre des éléments préfabriqués sur le chantier (off site), et on les assemble comme un jeu de construction. C'est la méthode que nous avons adoptée, mais pour y parvenir, il a fallu maîtriser une certaine complexité technique ([Figure 38](#)). Nous avons conçu des assemblages sophistiqués, spécialement étudiés pour répondre aux exigences de structure et de portée, notamment après avoir élargi les espaces intérieurs du bâtiment. Ces solutions permettent également d'assurer une isolation phonique performante dans les logements et de faciliter la construction intérieure ([Figure 39](#)).

Finalement, ce projet a permis de créer 120 logements locatifs, dont 20 logements sociaux. Comme vous pouvez le voir, l'intérieur a été entièrement repensé et rénové.

Les riverains de la rue Dareau ont accueilli ce bâtiment comme une réelle nouveauté : nous avons réussi l'exploit de ne pas nous limiter à une simple rénovation, mais de créer un édifice entièrement repensé, à partir d'une structure existante.

Nous avons souhaité aller plus loin avec ce projet en réintroduisant la « nature en ville ». Pour cela, nous avons aménagé des jardins et des terrasses végétalisées (Figure 40). Bien sûr, nous avons aussi intégré des éléments favorisant la biodiversité, comme des hôtels à insectes – un détail ludique que les enfants et les familles adorent. Mais surtout, nous nous sommes engagés dans une démarche d'économie circulaire (Figure 41).

C'était une première pour moi, et j'avoue que j'étais plutôt sceptique au départ. Pourtant, le résultat a dépassé nos attentes. Nous avons la chance de collaborer avec une foncière disposant d'un vaste patrimoine immobilier. Lors de démolitions antérieures, elle avait conservé des éléments récupérables : radiateurs, parquets, carrelages, revêtements muraux, cuvettes de WC, équipements de salle de bain... (Figure 42).

Nous avons récupéré, renové et réinstallé tous ces matériaux dans le bâtiment ; comme vous pouvez le constater sur ces images, l'environnement ainsi recyclé semble flambant neuf.

Il est donc tout à fait possible, en architecture, de réintégrer une économie circulaire en recyclant une grande variété d'éléments. Cette approche permet de réduire significativement

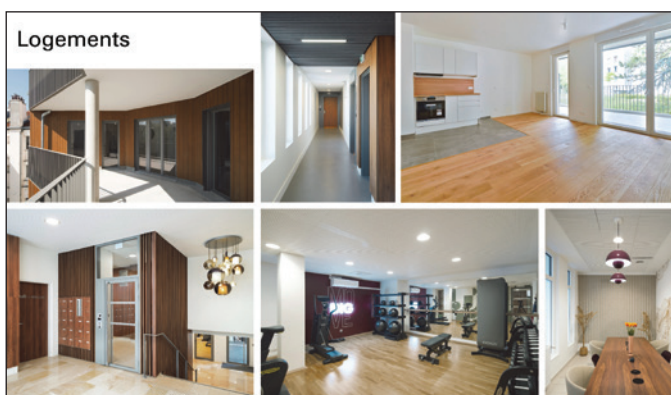


Figure 39

L'intérieur du bâtiment totalement renové.



Figure 40

Le paysage environnant recréé pour apporter la nature en ville.



Figure 41

L'économie circulaire de construction.

Économie circulaire

✓ Réemploi in-situ :

- Portes de caves : 63 unités
- Dalles gravillonnées : 400 m²

✓ Réemploi ex-situ :

- Pierre de Turquie : 120 m²
- Radiateurs : 350 unités
- WC Geberit : 120 unités
- Chemins de câbles : 1 800 ml
- Pavés de verre : 700 unités
- Façade tôle aluminium : 120 m²



Figure 42

Économie circulaire : réemploi au sein du bâtiment d'éléments récupérés dans des immeubles démolis.

l'impact environnemental du bâtiment. Finalement, ce bâtiment, non seulement transformé et embelli, a également été reconnu et primé dans le domaine de l'architecture (Figure 43).

Transformation d'un site industriel en logements

Encouragés par cette expérience à la fois complexe, encore rare, mais couronnée de succès, nous nous sommes cette fois attaqués à un bâtiment industriel. Vous pouvez le voir sur la figure 44 : il s'agit de l'ancien siège de Suez, la Compagnie des Eaux située à Rueil/Suresnes, lui aussi abandonné depuis longtemps.

Nous avons appliqué la même méthode que pour le projet de la rue Dareau – les principes que j'ai décrits précédemment pourraient d'ailleurs s'y transposer presque mot pour mot. La seule différence réside dans l'ampleur de la rénovation intérieure et dans la proportion de construction neuve, plus importante dans ce cas.



Figure 43

Vue d'ensemble de la transformation architecturale : le bâtiment de logements est à droite., nous avons souhaité poursuivre dans cette voie. Nous avons acquis une certaine notoriété dans ce domaine, car peu d'architectes s'étaient lancés dans ce type de projet, plutôt complexe et intimidant au départ. En effet, on ne sait jamais vraiment à quoi s'attendre au final, ce qui peut rendre l'exercice un peu décourageant.

Tout d'abord, nous avons choisi de conserver des éléments du bâtiment existant qui, a priori, auraient pu être démolis, car leur utilité future semblait incertaine.

Regardez l'image de gauche (**Figure 45**) : il s'agit d'un pont soutenu par des poteaux cylindriques en béton, surplombant d'anciens bâtiments en brique. Ces derniers étaient les vestiges des anciennes installations industrielles de la société

Degrémont, qui avait contribué à la création de *Suez* au début du xx^e siècle.

Nous avons décidé de préserver ces traces, les plus anciennes et les plus marquantes de l'histoire du site, pour écrire la nouvelle architecture comme une sorte de palimpseste.

Certaines parties ont tout de même dû être démolies, comme les éléments marqués en bleu en haut des immeubles



Figure 44

Transformation du site Rueil-Degrémont : site initial.

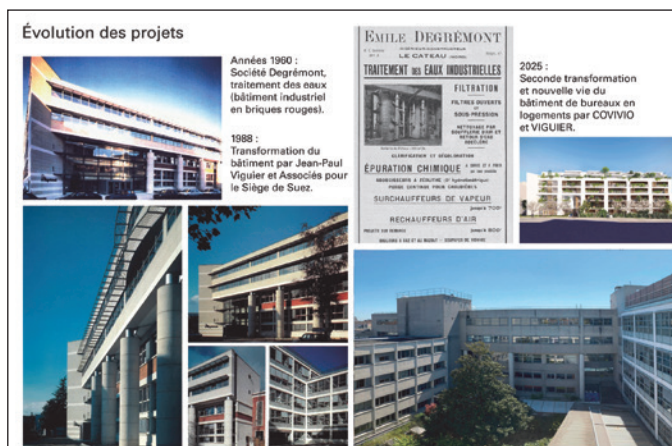


Figure 45

L'architecture du siège Suez avant la transformation.

et des toitures (*Figure 46*).
À leur place, nous avons aménagé des toits terrasses : ces

terrasses végétalisées qui
rencontrent aujourd'hui un vif succès dans les logements, et

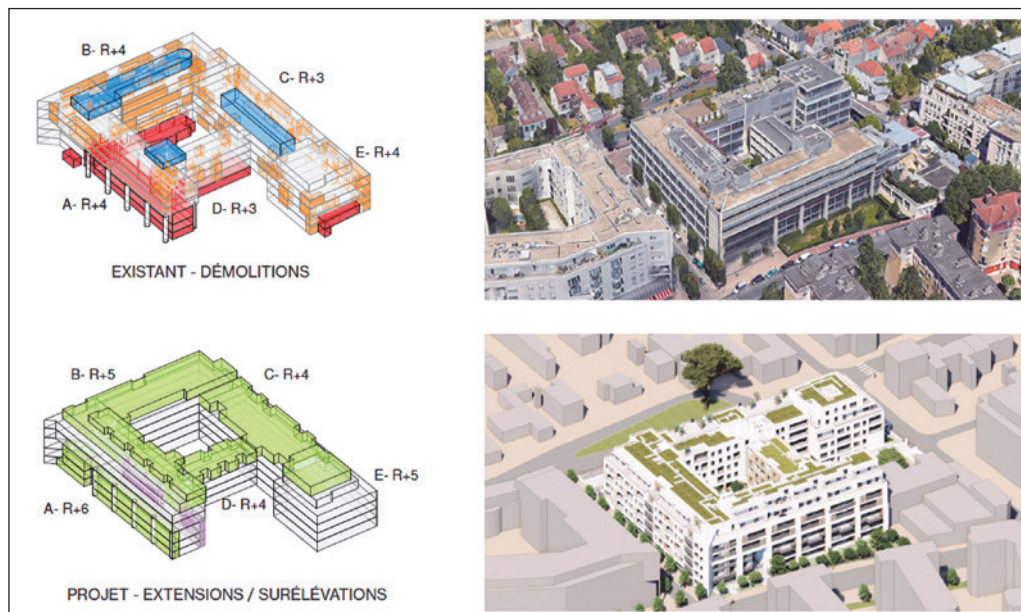


Figure 46

Démolitions et extensions/surélévations.

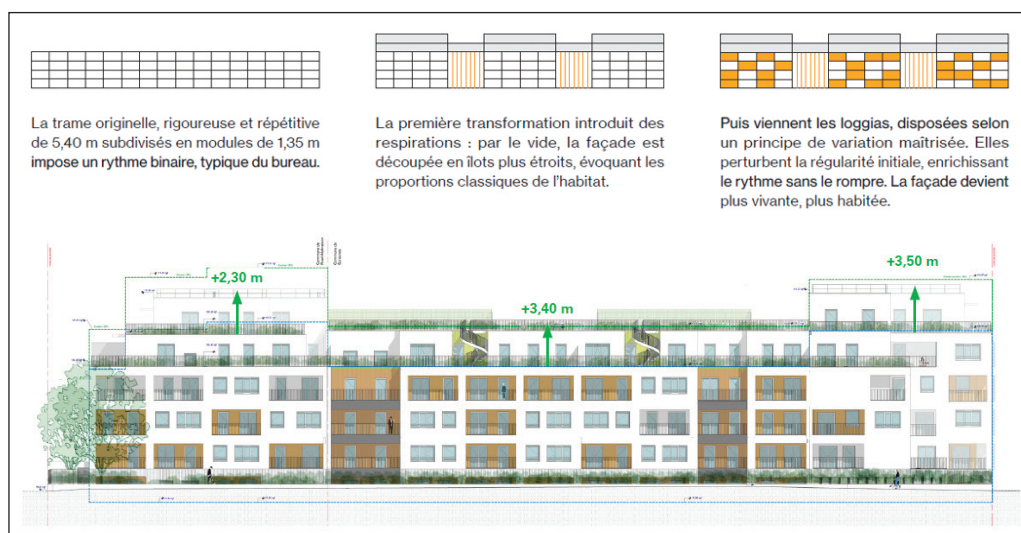


Figure 47

Transformation de la trame originelle du bâtiment.

diminuent l'effet d'îlot de chaleur créé par l'échauffement des toitures en ville.

Petit à petit, le nouveau bâtiment a pris forme (**Figure 47**).

Nous avons dû modifier les rythmes structurels du bâtiment, car ceux des immeubles tertiaires diffèrent radicalement de ceux des logements. Il a donc fallu repenser les façades, les percements et l'architecture dans son ensemble.

Les images de gauche de la **figure 48** montrent le bâtiment d'origine, tandis que celles de droite révèlent le résultat après rénovation et transformation en logements.

Les plans ont, bien sûr, été entièrement repensés (**Figure 49**). Le plan initial des bureaux, visible à droite, a été transformé en logements,



Figure 48

Avant (gauche) et après (droite) la rénovation.

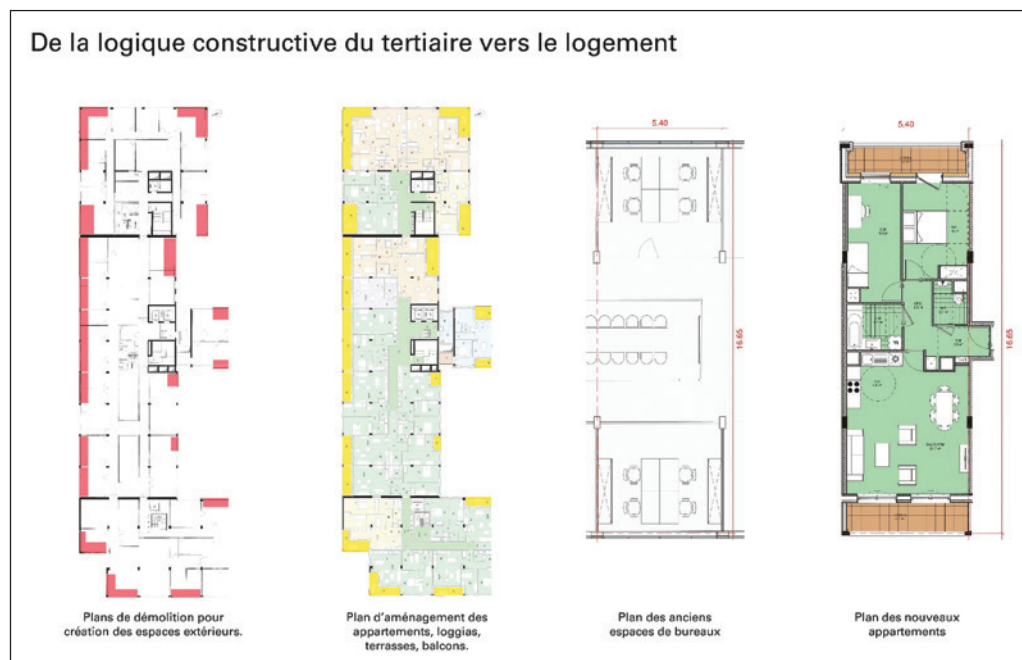


Figure 49

De la logique constructive du tertiaire vers le logement.

comme le montre le plan de gauche. Vous remarquerez l'ajout de loggias et de balcons, ainsi que l'intégration de pièces d'eau et de cages d'escalier centrales. Ces modifications permettent d'assurer un éclairage naturel traversant des appartements sur les plateaux. La reconstruction de ce bâtiment a mobilisé des technologies de pointe pour chaque aspect : façades, isolation thermique, ventilation, structure et finitions (**Figure 50**).

Aujourd'hui, au premier abord, on pourrait croire qu'il s'agit d'un bâtiment neuf (**Figure 51**). Pourtant, en y regardant de plus près, on distingue encore les traces du pont et des grands poteaux d'origine. Ainsi, ce bâtiment raconte son histoire et entame une deuxième vie – voire une troisième, si l'on considère l'époque *Degrémont*

comme sa première existence, l'époque *Suez Compagnie des Eaux*, comme sa deuxième, et notre intervention pour en faire des logements, comme sa troisième.

Ces deux expériences, désormais très étudiées dans le milieu de la construction, prouvent qu'il est possible de transformer la ville – plutôt que de la reconstruire – tout en respectant un modèle économique viable.

Nous obtenons des labels de performance Bas Carbone pour ces bâtiments par l'Association BBKA, (Bâtiment Bas Carbone), qui certifie leur caractère durable.

La décarbonation des constructions : une tour en bois

Pour poursuivre notre apprentissage de la décarbonation, nous avons choisi d'explorer et

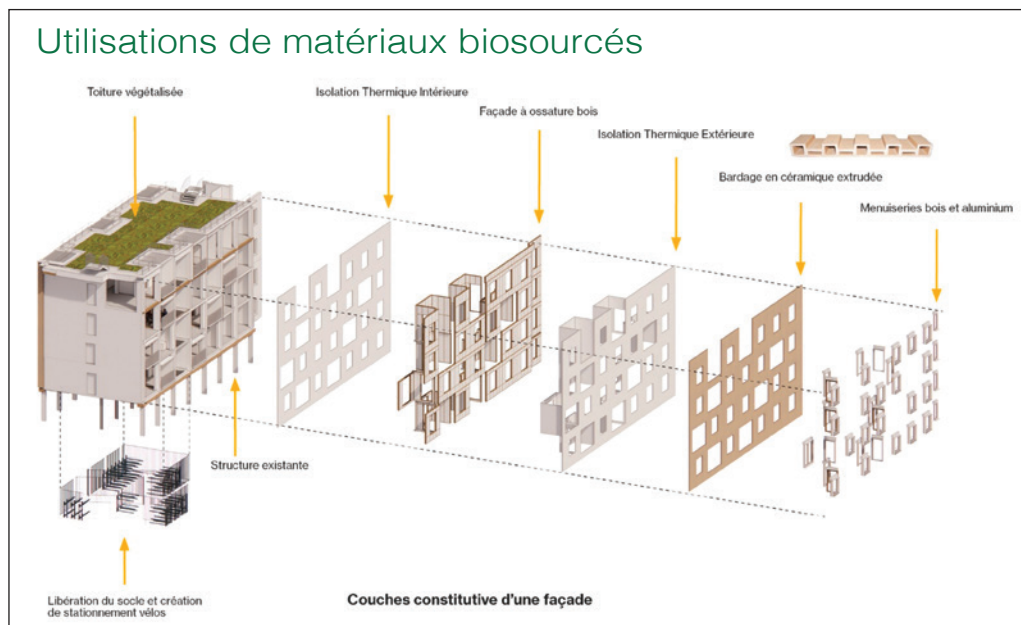


Figure 50

Utilisations de matériaux biosourcés (découpe en plans).



Figure 51

Transformation finale du site Rueil-Degrémont.



Figure 52

La tour en bois à Bordeaux.

de travailler avec la construction en bois massif collé CLT, et décidé de relever un défi plus ambitieux : construire une tour de 57 mètres de haut, entièrement en bois (**Figure 52**).

Alain Juppé étant Maire de Bordeaux avait lancé un concours international, s'adressant à des groupements constitués de Constructeur, d'Architecte, et d'Ingénieur

pour édifier dans le nouveau quartier de *Belcier, en bord de Garonne*, à l'orée de la Gare Saint Jean, une Tour d'habitation en bois, qui serait la plus haute d'Europe, dépassant 50 mètres de hauteur. L'entreprise EIFFAGE Construction et l'Agence VIGUIER, Architecture Paysage Urbanisme, ont remporté ce Concours International et réalisé les études et la construction de cette Tour, appelée « Hypérion », ainsi que celles du quartier qui l'entoure (*Figure 53*).

Un point essentiel à souligner est que les performances énergétiques et de décarbonation que nous recherchions dans ce projet n'ont pu être atteintes que par la combinaison de différentes technologies, à base d'acier, de bois CLT et du moins de béton possible ; autrement dit, il est devenu nécessaire de combiner différentes technologies

et matériaux. Selon les contraintes et les performances recherchées, nous devons trouver les assemblages les plus optimisés, adaptés aux efforts que les bâtiments doivent supporter et aux objectifs que nous leur fixons (*Figure 54*).

C'est précisément ce que nous avons fait pour la structure de la tour : celle-ci est principalement en bois, mais pas entièrement. En effet, ses fondations plongent dans l'eau, car elle est située près de la Garonne. Nous avons donc dû concevoir un socle en béton, mais sans parking souterrain, qui a dû être construit en élévation, latéralement à la Tour Hypérion ;

De plus, cette tour se trouve dans une zone sismique à risque, avec un aléa évalué à 6,2 sur l'échelle de Richter – une valeur élevée pour un matériau d'assemblage ; il a donc fallu renforcer la



Figure 53

La tour en bois et le nouveau quartier à proximité de la gare de Saint-Jean à Bordeaux.

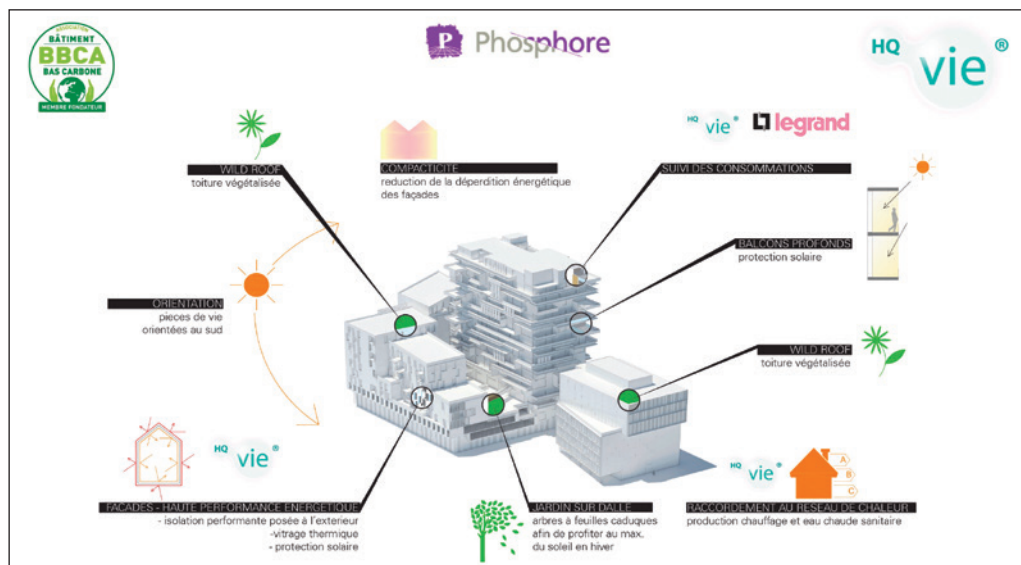


Figure 54

Un Bâtiment doit être vu comme assemblage optimisé.

structure de manière significative. Nous avons procédé par strates : un socle en béton à la base, et une gaine centrale en béton – abritant les cages d’escalier et les ascenseurs – qui assure le contreventement de l’ensemble.

Le reste de la structure, en revanche, est entièrement en bois : les planchers, les voiles, et même les façades – que j’ai choisi de réaliser en bois léger, puisqu’elles n’avaient pas de rôle porteur. Pour les éléments extérieurs des façades, nous avons utilisé du chêne et du châtaignier issus des forêts du Périgord. J’avais aussi envisagé d’utiliser des copeaux de bois provenant des caisses de vin de Bordeaux – habituellement jetés ou brûlés – pour en faire des « chips », un isolant exceptionnel pour les façades ! les pompiers instructeurs ayant refusé ce dispositif, il

fallut revenir à une isolation « classique », à base de laine de verre...

Mis à part cela, l’ensemble du bâtiment est bien en bois, et les balcons, en structure bois-métal, comme vous pouvez le voir (Figure 55), ont pu être préfabriqués hors site.

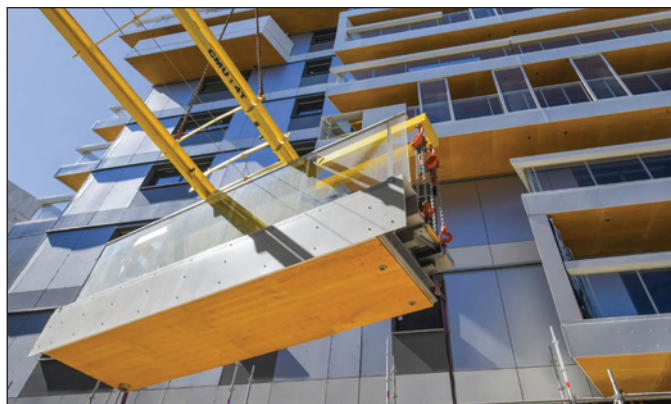


Figure 55

Balcons.

Pour les réaliser, nous avons dû innover – un brevet a même été déposé par *Eiffage*. Nous avons conçu des pièces mixtes, associant métal et bois : des éléments métalliques permettent de reprendre les efforts structurels des balcons, qui s'étendent sur 4,50 mètres de portée. Il fallait en effet compenser les forces de levier exercées sur les montants verticaux en bois. Ces bâtiments illustrent donc une tendance croissante vers des solutions hybrides, combinant différentes technologies et matériaux.

Cette tour, composée de 100 logements privés, a coûté plus cher à construire qu'un bâtiment de logements en béton classique – mais acquise rapidement par un public séduit par l'ambition environnementale de sa conception et la douceur de l'image architecturale produite par la présence du bois.

L'utilisation du bois dans la construction nous a permis de mettre en lumière un enjeu majeur : pourquoi ce matériau est-il plus coûteux en France qu'au Canada, par exemple ? L'une des raisons principales réside dans la fragmentation des métiers impliqués, depuis la plantation en forêt jusqu'à la livraison du bois sur un chantier. Chaque étape, chaque transition entre les acteurs – de la croissance de l'arbre à la fabrication des éléments de construction – engendre des coûts supplémentaires.

Pour résoudre ce problème, les Canadiens ont mis en place une filière bois intégrée, couvrant l'ensemble du processus, de la plantation

à la livraison des éléments finis. FiBois, la filière de la construction en bois en France a souhaité à cet égard se pencher sur la restructuration de la filière bois. Il se trouve que nous avions un projet en cours à Tours, en plein cœur d'une région riche en forêts (*Figure 56*), nous avons décidé d'utiliser cette opportunité pour y réunir les acteurs concernés par l'usage du bois dans la construction.

Sur le site de Tours, nous avions d'anciennes casernes (*Figure 57*), dont une partie a été démolie. Ces bâtiments dataient des opérations de reconstruction d'après-guerre, une période que François Bertière qualifie de post-corbuséenne : une époque où les principes de Le Corbusier étaient appliqués de manière systématique, dans l'urgence de reconstruire

Sur ce site, nous avons choisi de conserver les écuries des anciennes casernes, et de les transformer d'un point de vue architectural (*Figure 57*). Nous avons conçu un pont en bois qui s'appuie sur ces écuries, intégrées elles-mêmes dans notre structure bois. Ce lieu est devenu le centre national de *FiBois*, la filière bois, qui réunit tous les artisans, ingénieurs et acteurs du secteur.

Nous l'avons placé au cœur du quartier que nous aménageons, comme un bâtiment emblématique de la ville, entouré des nouveaux immeubles. À l'intérieur, l'ambiance est chaleureuse et agréable, avec cette présence constante du bois, toujours au centre du projet.



Figure 56

La Maison du Bois et des Biosourcés, Tours, 2025. Nous allons donc créer à Tours une Maison du Bois, un lieu où tous les métiers de la filière pourront se rencontrer, échanger et collaborer en continuité, voire fusionner lorsque cela est possible.

3.2. Aujourd'hui où en est la modernité ?

Pendant des décennies, la modernité d'après-guerre s'est incarnée dans ce qu'on appelle le modernisme. Être qualifié d'architecte moderniste était, à une certaine époque, un véritable compliment. Ce mouvement trouvait ses racines aux États-Unis, où il avait émergé grâce à l'immigration des fondateurs du Bauhaus, fuyant le nazisme. Ces pionniers y avaient créé un courant artistique qui, après la guerre, avait essaimé en Europe.

En Europe, les architectes se sont inscrits dans le mouvement moderne de l'architecture – ce qui était une qualité. Mais avec le temps considérer le modernisme comme une valeur universelle, applicable sans distinction à l'échelle

planétaire, ne correspondait plus aux aspirations de l'époque.

Comme l'a souligné François Bertièrre, notre planète évolue



Figure 57

Ecoquartier – ZAC Beaumont-Chauveau.

rapidement, et il devient urgent de l'observer avec plus d'attention. Les modernistes, eux, estimaient qu'un bâtiment, qu'il soit construit à Paris, Londres, Francfort, Bombay ou ailleurs, conservait les mêmes qualités dès lors qu'il était moderne.

Ce modernisme, tout comme le post-modernisme avant lui, a finalement atteint ses limites. Les architectes ont pris conscience que ce courant ne répondait plus aux aspirations des populations, qui cherchaient à valoriser ce que Christian Norberg-Schulz, ce grand architecte finlandais, appelait le *génie du lieu* – une notion que je reprends aujourd'hui.

Le génie du lieu repose sur l'idée que chaque endroit possède une identité culturelle propre, et que la conception de chaque bâtiment doit s'imprégner à priori de la culture du lieu où il sera bâti. Un édifice peut être moderne, mais il doit tenir compte de la culture locale, du lieu, des sociétés qui l'habitent, ainsi que des désirs et besoins de ses habitants.

Il faut donc intégrer cette contextualité dans l'architecture.

Cette question nous a profondément préoccupés. Comme vous l'avez vu dans les figures présentées par François Bertière, la ville se reconcentre : au lieu de s'étaler comme elle l'a fait tout au long du xx^e siècle, elle se densifie rapidement aujourd'hui autour de métropoles existantes devenues des pôles lumineux, visibles sur le globe, et surtout le long des littoraux.

L'exemple d'une école de brousse : École à Madagascar

D'ici 2050, 75 % de la population mondiale vivra en ville ou dans des agglomérations. Nous avons souhaité mettre cette contextualité à l'épreuve dans un cadre particulièrement exigeant. Nous nous sommes rendus à Madagascar, où nous avons été sollicités par l'Association Ecole du Monde fondée par Charles Gassot, pour construire une petite école, à Majunga Besly, une école d'exception en brousse.

Le défi était de taille : nous ne disposions que d'un budget de 50 000 euros, sans ressources supplémentaires. Notre seul atout ? Les idées que nous avons apportées avec nous et notre enthousiasme pour le projet.

Nous avons relevé le défi et accepté de construire cette petite école (Figure 58). Pour ce faire, nous avons opté pour la brique de terre crue séchée. Nous avons collaboré avec CRATERre, un groupe d'experts lyonnais spécialisés dans les



Figure 58

École de Brousse, Besely Mahajanga, Madagascar, 2014.

matériaux biosourcés et naturels (*chapitre de Thierry Joffroy et David Gandreau* dans cet ouvrage).

Nous avons d'abord identifié des carrières d'argile, car il fallait de l'argile humide, mélangée à d'autres composants. Puis nous avons décidé que ce serait la population locale elle-même qui fabriquerait cette école.

Pour mener à bien ce projet, il fallait produire 30 000 briques. Nous avons donc formé la population locale et enseigné aux Malgaches comment préparer le mélange d'argile – comme vous pouvez le voir sur la *figure 59*. Ce sont surtout les femmes qui se sont investies dans cette tâche. Nous leur avons fourni des presses pour qu'elles puissent fabriquer les briques à partir de ce mélange.

Sur cette photo, vous les voyez, légitimement fières, avec les

briques qu'elles ont réalisées. Ces dernières ont ensuite été séchées pendant deux ans pour qu'elles soient parfaitement prêtes pour la construction.

Une fois les briques parfaitement sèches, elles ont servi à construire cette petite école, qui comprend aussi des logements modernes pour les enseignants, et des greniers surélevés pour la conservation et la protection des réserves de riz. Aujourd'hui, 80 enfants y reçoivent une éducation de qualité (*La Brousse a droit à l'Éducation*) – un spectacle magnifique et une vraie récompense pour nous (*Figure 60*).

Sur cette image, vous voyez l'aboutissement du projet lors de la livraison de l'école à Majunga, dans le nord de Madagascar. Auparavant, le site était dévasté : la population locale avait brûlé tous les bois disponibles pour cuisiner, se chauffer ou d'autres usages.



Figure 59

Fabrication de briques de terre crue.



Figure 60

Images de l'école une fois les travaux achevés.

Il était urgent de mettre fin à cette pratique.

L'idée d'utiliser la brique crue a permis de mettre un terme à cette dégradation. Dix ans plus tard, voici ce que l'école est devenue : vous la voyez au cœur du petit village qu'elle a contribué à faire naître (**Figure 61**). Elle a permis

de restaurer toute la nature autour, et c'est pour nous une immense fierté de constater qu'un simple geste, avec seulement 50 000 euros, beaucoup de patience, d'intelligence et une belle coopération avec la population locale, peut aboutir à la reconstruction d'un village entier.

Conclusion

Je ne reviendrai pas sur les bétons bas carbone, puisque François Bertière en a déjà parlé précédemment. Nous venons de les utiliser pour la construction du siège de VINCI (**Figure 62**), l'une de nos grandes entreprises de construction.

Quant à la mixité des usages, je vous en ai déjà parlé, et nous l'avons appliquée dans de nombreux projets. Ici, à Lyon Confluence, entre la Saône et le Rhone, nous avons utilisé ce



Figure 61

Le village construit autour de l'école.



Figure 62

Nouveau siège de VINCI.

matériau, le tétrafluoroéthylène, pour faire des coussins, gonflés, de cette toile transparente magnifique et transparente, insensible aux UV, utilisée pour couvrir et protéger les bâtiments habillés de mélèze.

Le bonheur de l'architecte est de découvrir que des matériaux issus de la chimie peuvent être utilisés pour construire des édifices nouveaux, traduisant l'audace architecturale de leur conception. Regardez ce bâtiment construit à Lyon, (*Figure 63*) : il est incroyable, et aussi mixte, puisqu'il abrite des bureaux, des commerces, des cinémas, un hôtel, et bien d'autres fonctions.

Nous avons renouvelé cette approche à Metz (*Figure 64*), sur une friche urbaine située derrière la gare. Là, nous avons aménagé un quartier de 80 000 m². Sur cette image, vous distinguez un bâtiment de logements en haut, un club de sport en dessous, un immeuble de bureaux à gauche, des restaurants en rez-de-chaussée, un étage commercial, et encore des



Figure 63

Lyon Confluence, Pôle de loisirs et de commerces, 2012.

logements en fond. Ce seul bloc intègre en réalité quatre à cinq fonctions différentes.

Pour réaliser ce type de projets, il faut aussi repenser nos méthodes de travail. C'est pourquoi je vous ai parlé de l'intelligence artificielle, des collaborations et des groupes pluridisciplinaires que nous formons, architectes et ingénieurs, pour concevoir ces bâtiments complexes.

Nous ne sommes plus dans une logique où l'on alterne simplement un terrain, un bâtiment : les blocs urbains que nous construisons aujourd'hui sont totalement mixtes, et cela donne, architecturalement, des résultats plutôt réussis.

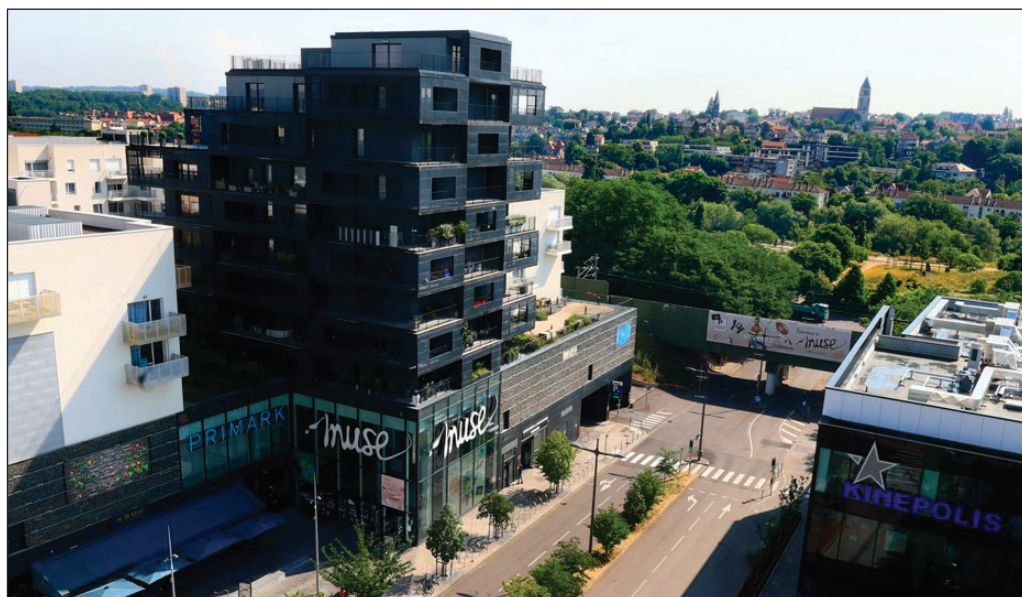


Figure 64

Quartier à Metz.

L'habitat innovant au service de notre bien-être et de la planète

Didier Roux est membre de l'Académie des sciences et de l'Académie des technologies.

1 Pourquoi le monde de la construction doit innover

1.1. Les trois grandes raisons du besoin d'innovation

Ce chapitre aborde sous un nouvel angle une question récurrente dans ce livre : Pourquoi le monde de la construction doit-il innover, alors que l'habitat existe depuis des milliers d'années ? Et plus précisément : pourquoi a-t-on besoin de scientifiques dans un domaine déjà marqué par la diversité et l'invention ?

La réponse découle bien sûr de trois observations : la croissance démographique depuis des millénaires, la crise énergétique qui en résulte et qui impose de remplacer les énergies fossiles¹ par de nouvelles sources, ainsi que les problématiques environnementales omniprésentes.

1. Énergies fossiles : sources d'énergie non renouvelables issues de restes fossilisés d'organismes anciens (pétrole, gaz naturel, charbon). Elles libèrent du CO₂ en brûlant et contribuent au réchauffement climatique.

Dans les années 2010, la Terre comptait environ 7 milliards d'habitants, répartis pour moitié en milieu urbain et pour l'autre en zones rurales. Les projections démographiques estiment que nous serons 10 milliards en 2050, avec une explosion de la population urbaine. Ce phénomène, déjà marqué en Europe et en Amérique, prend une ampleur bien plus grande en Asie et, surtout, en Afrique. Selon les prévisions, 66 % de la population mondiale vivra en ville d'ici 2050 (voir **Figure 1**). Si ces estimations se confirment, cela signifie qu'entre 2010 et 2050,

il faudra construire autant d'habitats urbains que tout ce qui a été bâti depuis les origines de l'humanité.

Un effort sur l'histoire de l'habitat, comme on la trouve dans les universités spécialisées ou dans les cabinets d'architecture, fait prendre conscience de l'extrême diversité des réalisations faites dans les zones d'habitation anciennes : des habitations troglodytes présentes dans les zones désertiques et rocheuses aux célèbres (et pas seulement anciennes) habitations adaptées aux zones polaires, les igloos... pour ne pas parler des trésors d'inventivité observables pour les habitations en bois des régions forestières ou à cultures végétales, ainsi que d'autres surprenantes réalisations.

Ces données révèlent l'ampleur du défi auquel est confrontée la construction mondiale, sous l'effet conjugué de la croissance démographique et de l'exode rural. Une véritable révolution s'impose dans le domaine de l'habitat : les bâtiments doivent évoluer, tant dans les matériaux que dans les méthodes de construction, pour répondre aux contraintes émergentes.

Un bref éclairage sur la question énergétique permet de mesurer l'étendue du problème. La **figure 2** compare les dépenses énergétiques en Europe selon trois secteurs : 1/ l'habitat, 2/ le transport et 3/ l'industrie. Les bâtiments représentent à eux seuls 42 % de la consommation énergétique totale du continent. Près de la moitié de cette énergie

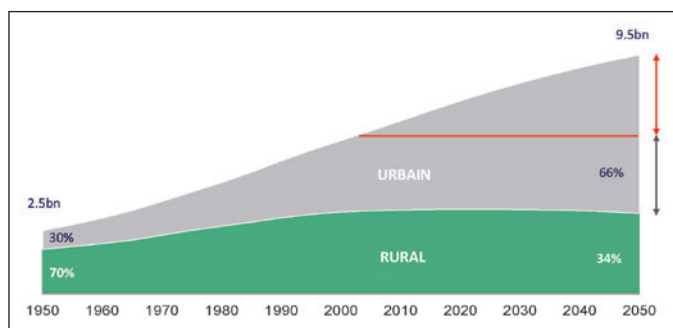


Figure 1

Répartition de la population rurale/urbaine.

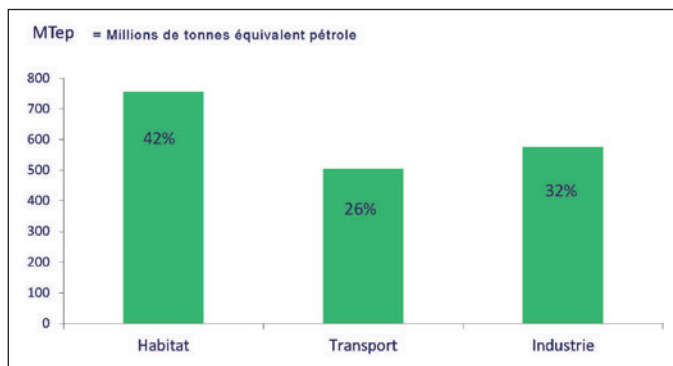


Figure 2

Dépenses énergétiques en Europe selon le secteur.

est consacrée au chauffage ou à la climatisation des lieux où nous vivons et travaillons. En comparaison, le transport en absorbe environ 26 % et l'industrie (incluant l'agriculture) 32 %. L'habitat constitue donc le premier poste de dépense énergétique, non seulement en Europe, mais aussi à l'échelle mondiale.

Tous les pays ont pris conscience de cette réalité et de l'urgence à agir. Les études techniques analysent et détaillent les dépenses énergétiques selon les types d'habitations et d'équipements (**Figure 3**). En France, cette prise de conscience a conduit à l'élaboration de règles strictes, notamment les réglementations environnementales (RE).

La maîtrise des consommations énergétiques permet d'exercer un contrôle plus efficace sur ces dépenses. Par exemple, dans l'habitat ancien, le chauffage peut engendrer des consommations de l'ordre de 400 à 500 kWh/m² du fait de la contribution du chauffage, alors que celle-ci grâce à la réglementation thermique RT2005 applicable aux habitations modernes a pu être réduite à environ 40 kWh/m².

Face à la situation mondiale des ressources énergétiques, l'impératif est clair : réduire la consommation. Il ne s'agit pas seulement du chauffage, dont les coûts sont scrupuleusement suivis par les autorités, mais de l'ensemble des dépenses énergétiques – qu'il s'agisse du sanitaire, de l'électroménager, ou d'autres usages. C'est ce que met en lumière la **figure 4**. On y

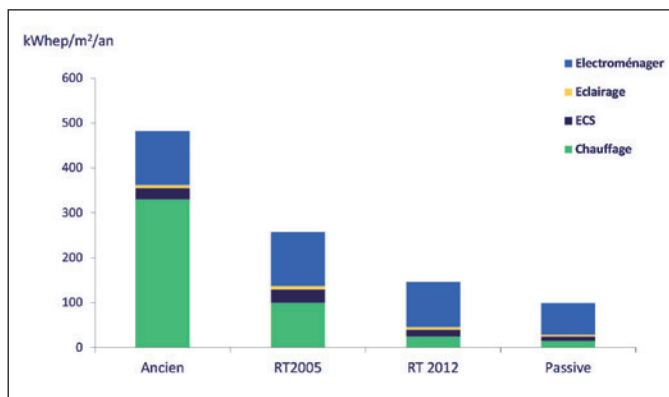


Figure 3

La consommation énergétique des bâtiments (RT = Réglementation Thermique).

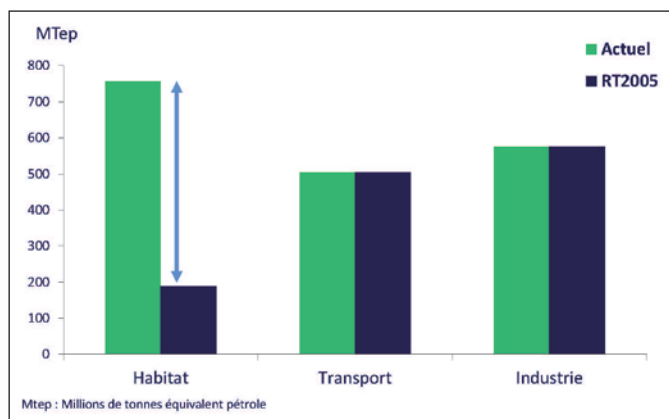


Figure 4

Économie potentielle énergétique.

observe de manière frappante le poids de l'habitat : les économies réalisables chaque année sur ce poste, au rythme actuel, pourraient équivaloir à la totalité des dépenses annuelles combinées du transport et de l'industrie. Un constat qui souligne, une fois encore, la responsabilité majeure de l'habitat dans la gestion de l'énergie.

1.2. Différences de besoin entre pays développés et pays en développement

La question énergétique est, par nature, une problématique internationale. Certains pays sont producteurs et exportateurs, tandis que d'autres, comme l'Europe, dépendent des importations. C'est un domaine où la solidarité doit s'imposer, ce qui implique de bien comprendre les disparités de situations et de solutions entre les nations.

Quelques observations sur la construction de logements, synthétisées dans la **figure 5** :

- dans les pays en développement, marqués par une forte croissance démographique et un exode rural, l'enjeu consiste à construire du neuf en appliquant des normes réglementaires plus exigeantes que celles qui prévalaient autrefois ;
- dans les pays développés, le défi principal réside dans la rénovation du parc immobilier existant, la construction de nouveaux logements ne représentant qu'environ 1 % par an.

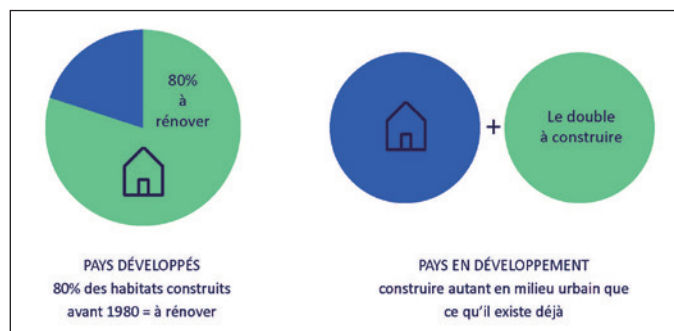


Figure 5

Besoin des habitats entre pays développés et en développement.

2 Exemples d'innovations dans les matériaux et techniques

2.1. Principes de l'isolation

Une maison, c'est avant tout une enveloppe conçue pour protéger l'intérieur des agressions extérieures. Pour limiter les pertes énergétiques, il est essentiel de l'isoler efficacement. Le meilleur isolant, c'est l'air, à condition qu'il soit immobile.

Prenons un exemple concret : notre corps est entouré d'un air ambiant à environ 22-23 °C, tandis que notre peau affiche une température de 35-36 °C. Si nous sortons sans protection, nous ressentons le froid, car l'air extérieur est bien plus frais. En revanche, si nous portons un vêtement épais, nous emprisonnons une couche d'air autour de nous. Cet air, immobile, conserve notre chaleur et nous isole du froid.

Un bon isolant fonctionne sur le même principe : un matériau léger qui piège l'air et empêche son déplacement par un air plus froid.

2.2. Isolants à haute performance

Il existe aujourd'hui des matériaux innovants offrant des performances d'isolation exceptionnelles. Je vais vous en présenter deux : l'aérogel et le panneau isolant sous vide. Qu'est-ce qu'un aérogel ? Prenons l'exemple de l'aérogel² de silice. Il s'agit d'une

2. Aérogel : matériau ultraléger et très poreux (composé jusqu'à 99 % d'air), fabriqué à partir d'un gel dont on remplace le liquide par du gaz.

particule de silice poreuse, une forme de sable cristallisé, extrêmement légère et dotée de pores microscopiques – de moins d'un micron. Pourquoi des pores aussi petits ? Parce qu'à cette échelle, les molécules d'air ne peuvent se déplacer d'un micron sans entrer en collision avec les parois de leur environnement. Résultat : leur capacité à transporter la chaleur devient très faible. Grâce à des pores de quelques centaines de nanomètres, les aérogels réduisent suffisamment la conductivité thermique pour offrir une isolation encore plus performante que celle de l'air immobile évoquée précédemment.

Un deuxième matériau utilisé pour concevoir des isolants hautement performants est inspiré des technologies de réfrigération. Pour l'exploiter, on y crée un vide partiel, tout

en le stabilisant avec de la silice (appelée aussi « fumée de silice³ »), selon la technique des panneaux isolants sous vide (*Vacuum Insulating Panels* en anglais). Ces panneaux sont recouverts d'une couche d'aluminium, qui assure deux fonctions essentielles : l'étanchéité⁴ et le blocage des rayonnements thermiques.

La **figure 6** montre les performances obtenues avec différents matériaux.

Un panneau isolant sous vide affiche une conductivité thermique de l'ordre

3. Poudre très fine de dioxyde de silicium (SiO_2), utilisée comme charge légère dans certains matériaux isolants.

4. Étanchéité : propriété d'un matériau ou d'une construction à empêcher le passage de l'air, de l'eau ou de la vapeur, essentiel pour une bonne isolation.

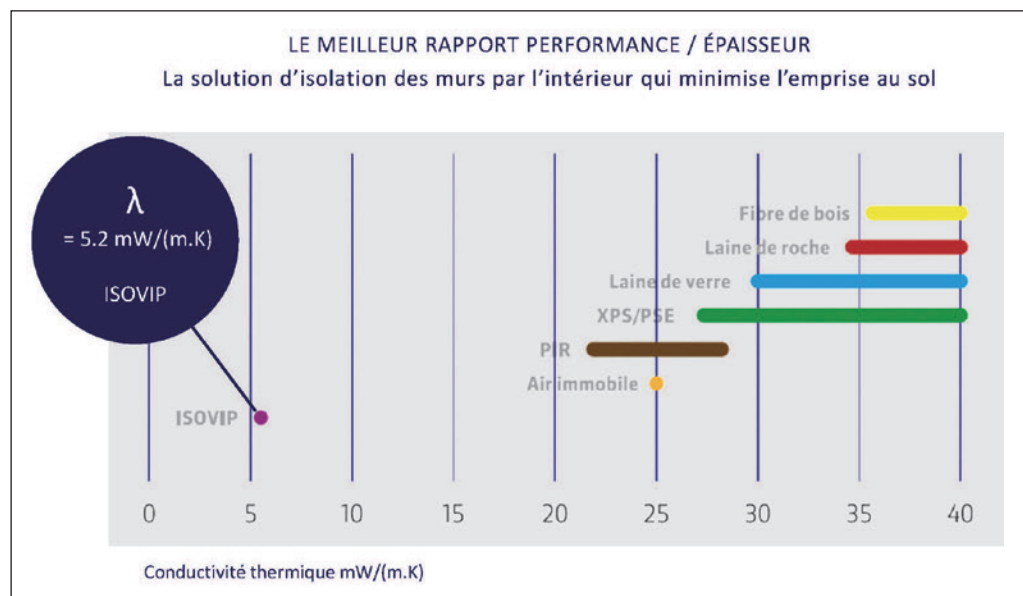


Figure 6

Performance d'isolation de différents matériaux, sous vide.

de 5 000 W/m·°C contre 30 à 35 W/m·°C pour les isolants classiques. Cette performance en fait une solution particulièrement adaptée aux enjeux d'isolation. Pourtant, bien que largement adoptés en Allemagne et dans les pays nordiques, ces panneaux restent peu utilisés en France, où ils sont vendus trop chers.

3 Mesure des performances énergétiques des bâtiments

3.1. Problème actuel

Bien sûr, les professionnels du bâtiment réalisent de nombreux calculs sur les matériaux : les performances énergétiques ou la résistance des structures. Pourtant, un constat surprenant s'impose : s'ils calculent beaucoup, ils mesurent rarement. Lorsqu'un bâtiment est livré ou vendu, ses performances réelles sont peu ou pas vérifiées par rapport aux calculs théoriques initiaux. Chaque matériau est certifié individuellement, mais l'ensemble construit, qui détermine les performances globales du bâtiment, est rarement évalué dans son intégralité.

Un exemple frappant, mené par les ingénieurs de Saint-Gobain, illustre cette problématique. Leur objectif ? Mesurer – et non simplement calculer – la performance énergétique réelle d'un bâtiment. Résultat : les mesures n'ont pas concordé avec les prévisions. La réponse à ce paradoxe est la présence de

ponts thermiques⁵. Des fuites thermiques, non anticipées dans les calculs, proviennent d'imperfections dans l'assemblage des matériaux – des défauts rendus visibles grâce à des photos infrarouges.

3.2. Analogie avec les circuits électriques

D'un point de vue thermique, un bâtiment fonctionne comme un circuit électrique RC⁶. Cela signifie que, lorsque vous entrez dans un bâtiment froid et que vous activez le chauffage, l'énergie consommée sert à deux choses distinctes :

- réchauffer les matériaux intérieurs (par exemple, les porter de 5 à 20 °C) – une énergie comparable à la capacité⁷ d'un circuit RC, qui correspond à l'inertie thermique des matériaux ;
- compenser les pertes thermiques : la chaleur qui s'échappe par les vitrages, les murs, le sol ou le toit. Cette énergie, équivalente à la résistance d'un fil conducteur, vise à maintenir la température malgré les fuites.

5. Ponts thermiques : zones d'un bâtiment où l'isolation est rompue ou moins efficace (ex. : jonctions mur/plancher), provoquant des fuites de chaleur importantes et des déperditions énergétiques.

6. Circuit RC : modèle physique comparant un bâtiment à un circuit électrique avec résistance (R, pertes thermiques) et capacité (C, stockage de chaleur dans les matériaux).

7. Capacité (thermique) : quantité de chaleur nécessaire pour augmenter la température d'un matériau ou d'un objet de 1 °C. Les murs épais ont une forte capacité thermique (inertie).

Le défi réside dans le fait que ces deux types d'énergie – celle qui chauffe la matière et celle qui comble les déperditions – sont indissociables dans la pratique. Il devient alors difficile d'isoler précisément la part des pertes thermiques pures, qui reflète la performance réelle du bâtiment.

3.3. Méthode innovante de mesure

Pour évaluer la performance thermique d'un bâtiment – c'est-à-dire, par exemple, les fuites de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur – il faudrait d'abord fixer des conditions stables : température intérieure, température extérieure, et autres paramètres environnementaux. Mais en réalité, cette stabilité est impossible à obtenir.

Une mesure instantanée n'a que peu de sens, car les échanges thermiques ne sont pas immédiats. De plus, les températures, qu'elles soient intérieures ou extérieures, sont constamment variables (**Figure 7**). À l'extérieur, les cycles jour/nuit, les vents et les variations météorologiques perturbent en permanence les conditions. À l'intérieur, bien que l'on puisse tenter de réguler la température, il reste indispensable de disposer d'un modèle fiable pour comprendre et anticiper ces échanges thermiques complexes.

Une méthode ingénieuse a été développée pour surmonter ces difficultés : la méthode des perturbations. Le principe ? Préparer le bâtiment en minimisant au maximum les variations thermiques – les occupants sont invités à limiter

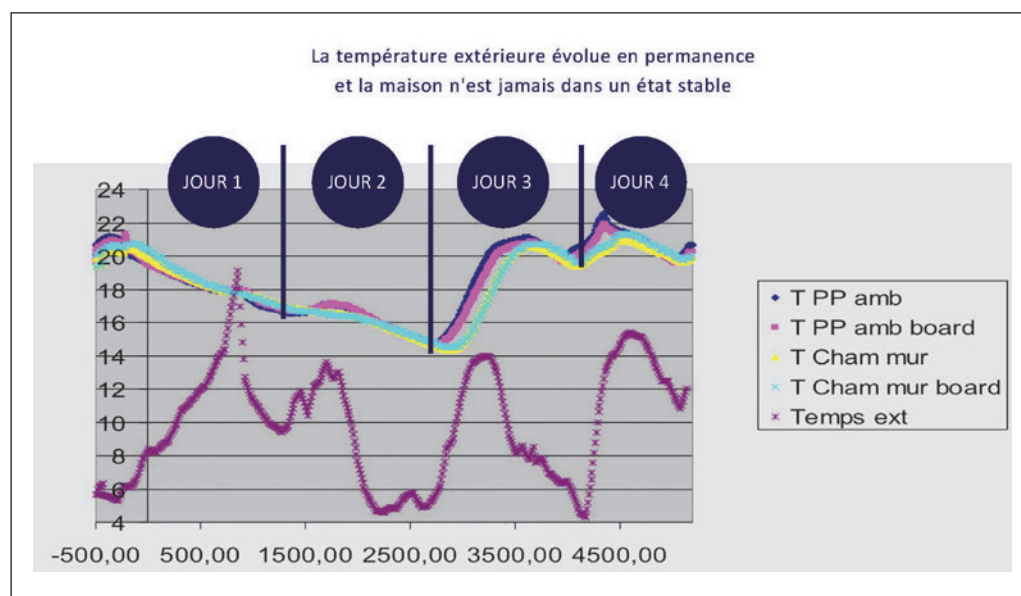


Figure 7

Évolution thermique au sein d'une maison.

leur impact sur l'environnement intérieur. On enregistre alors les températures de référence.

Soudain, une perturbation thermique intense et brève est introduite. Immédiatement après, de nouvelles mesures sont effectuées.

Vient ensuite l'étape cruciale : l'analyse des données. Les variations brutales observées permettent de modéliser la cinétique des réponses thermiques du bâtiment. Les paramètres recherchés – ceux qui définissent la performance thermique réelle de la maison – émergent de cette analyse.

Cette approche est prometteuse, mais elle impose des contraintes expérimentales strictes. Pourtant, elle ouvre une voie concrète : suivre les résultats futurs (issus de la littérature ou d'études en cours)

pour en tirer des enseignements.

Et la bonne nouvelle ? Ça fonctionne, comme en témoignent les développements qui suivent.

3.4. Validation expérimentale

Les ingénieurs de Saint-Gobain ont mis cette méthode à l'épreuve dans des conditions optimales (*Figure 8*). Pour cela, ils ont collaboré avec l'université de Salford, en Angleterre, qui dispose d'une installation unique : une maison anglaise typique, intégralement reconstruite à l'intérieur d'un bâtiment. Ce dernier permet de contrôler parfaitement l'environnement extérieur de la maison : maintenir une température constante, simuler la pluie, voire la neige, afin de recréer des conditions climatiques artificielles identiques à la réalité.

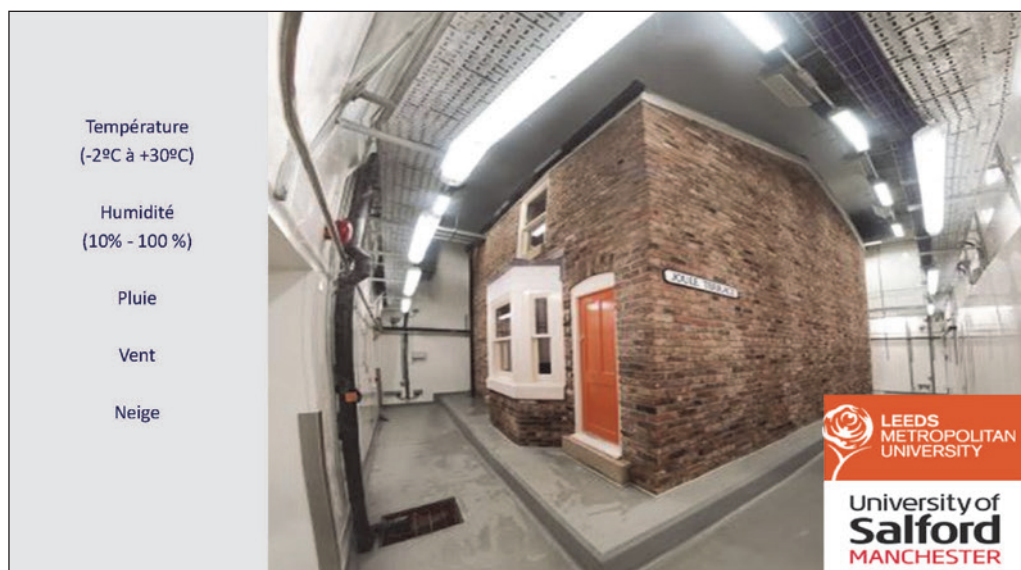


Figure 8

Expérience de mesure thermique en conditions idéales.

Pour les ingénieurs, passionnés de mesures, cette configuration a permis de déployer une multitude de capteurs afin d'analyser les performances thermiques avec une précision inégalée. La **figure 9** illustre les résultats sur 4 à 5 jours : la température intérieure reste parfaitement stable à 20 °C, tandis que la température extérieure est maintenue à 5 °C. Grâce à cet état stationnaire idéal, il devient possible de mesurer exactement les performances du bâtiment (**Figure 9**).

Sur la courbe en bas à gauche, on observe l'énergie nécessaire pour maintenir ces températures. Au début, la consommation est légèrement plus élevée, car il faut réchauffer les parois de la maison. Puis, une fois l'équilibre atteint, l'énergie se stabilise à un niveau constant,

correspondant uniquement aux pertes thermiques à compenser.

Cette méthode, validée en conditions contrôlées, peut désormais être appliquée en seulement 2 ou 3 heures pour évaluer les performances énergétiques réelles d'un bâtiment. Une avancée majeure !

4 De l'imagination pour améliorer la performance

4.1. Matériaux à changement de phase

L'isolation des murs permet d'atténuer les variations de température. Nous avons déjà exploré l'importance des matériaux isolants – une idée simple, naturelle et employée depuis toujours.

Grâce aux avancées scientifiques, de nouvelles approches

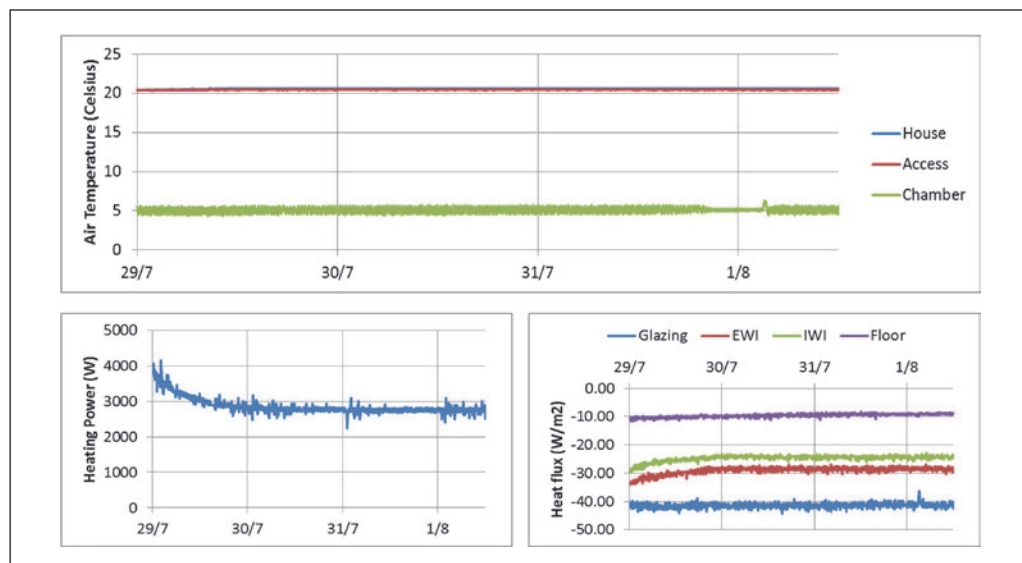


Figure 9

Résultats de l'évolution thermique en conditions idéales.

émergent pour exploiter les matériaux et obtenir des effets similaires, mais avec des propriétés distinctes.

Prenons l'exemple des matériaux à changement de phase et de leur intérêt.

Un rappel de physique et chimie élémentaires : un corps pur change d'état en fonction de la température (**Figure 10**). À température ambiante, l'eau est un liquide. Si vous la chauffez à 100 °C (à pression atmosphérique), elle se transforme en vapeur – une transformation réversible. À l'inverse, si vous l'abaissez à 0 °C, elle se solidifie en glace, là encore de manière réversible.

Ces changements d'état s'accompagnent de phénomènes thermiques qui nous intéressent directement. Par exemple, la glace qui fond en

eau liquide absorbe de la chaleur (chaleur latente⁸), tout comme l'eau qui s'évapore. Plus généralement, dans une maison, il est possible d'utiliser un matériau (pas seulement de l'eau) capable d'absorber ou de restituer de la chaleur lors d'un changement de phase. Ce matériau atténuera ainsi les variations indésirables de température dans son environnement. Beaucoup de composés subissant des changements de phase, susceptibles de réguler la température des bâtiments, sont commercialisés, par exemple sous les marques « Micronal » ou « Dupont ».

8. Chaleur latente : énergie absorbée ou restituée lorsqu'un matériau change d'état (solide → liquide → gaz), sans variation de température.

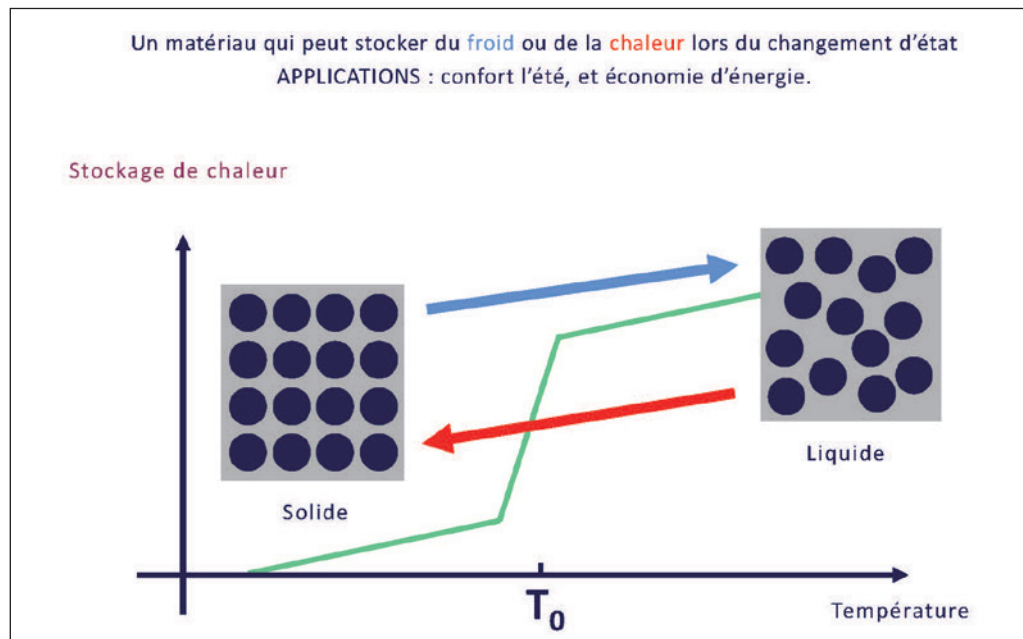


Figure 10

Changement de phase d'un matériau.

Les ingénieurs ont imaginé exploiter cette propriété pour créer des matériaux actifs capables de stocker la chaleur. Leur idée ? Encapsuler des substances qui passent de l'état solide à liquide dans de petites capsules, puis les intégrer directement aux matériaux de construction des murs. L'objectif est clair : utiliser la transition de phase de ces matériaux encapsulés pour atténuer les variations de température indésirables à l'intérieur des bâtiments, et économiser ainsi sur les dépenses d'énergie de chauffage.

4.2. Puits canadien ou puits provençal

Pour réguler la température intérieure d'un bâtiment, la méthode la plus courante, comme nous l'avons vu précédemment, repose sur l'échange entre l'air ambiant et une source de chaleur, que l'on active ou modère selon les besoins. Pourtant, l'innovation ouvre la voie à une diversité de techniques – moins coûteuses, mieux adaptées aux contraintes spécifiques ou aux espaces disponibles. Nous allons en explorer plusieurs ici.

Parmi ces solutions, on trouve par exemple les vitrages actifs, dits électrochromes⁹. Ceux-ci permettent de contrôler la quantité de rayonnement solaire pénétrant dans le bâtiment. Le rayonnement capté génère un signal électrique,

qui peut être directement converti en chaleur.

Une autre technologie, d'une simplicité remarquable, porte différents noms selon les régions : « puits canadien » (*Fig. 11*) ou « puits provençal » (*Fig. 12*). Son principe ? Exploiter l'inertie thermique du sol. Même en plein été, lorsque les températures extérieures atteignent 35 ou 40 °C, à 10 mètres sous terre, la température reste stable, aux alentours de 15 °C. Une ressource naturelle et efficace pour tempérer l'air intérieur.

En période de forte chaleur, il est possible de capter l'air extérieur, de le refroidir par échange thermique avec le sol, puis de le réinjecter dans la maison sous forme d'un air rafraîchi. Ainsi, la maison est climatisée naturellement : l'air chaud extérieur cède ses calories au sol, ce qui abaisse sa température avant qu'il ne pénètre dans l'habitat.

À l'inverse, dans les régions où les températures chutent sous les -20 ou -30 °C, au lieu d'injecter directement cet air glacé dans la maison, on le préchauffe d'abord en le faisant circuler au contact du sol, dont la température se maintient aux alentours de 10 à 15 °C. L'air ainsi réchauffé demande ensuite moins d'énergie pour atteindre une température confortable. Cette méthode permet de climatiser l'habitat de manière naturelle et économique : c'est le principe du « puits canadien ».

La *figure 11* illustre un exemple concret : une maison équipée des tuyaux nécessaires et des tranchées adaptées pour mettre en œuvre ce système.

9. Vitrage électrochrome : verre « intelligent » qui change de teinte (plus sombre) sous l'effet d'un courant électrique faible, pour contrôler la lumière et la chaleur entrantes sans store.

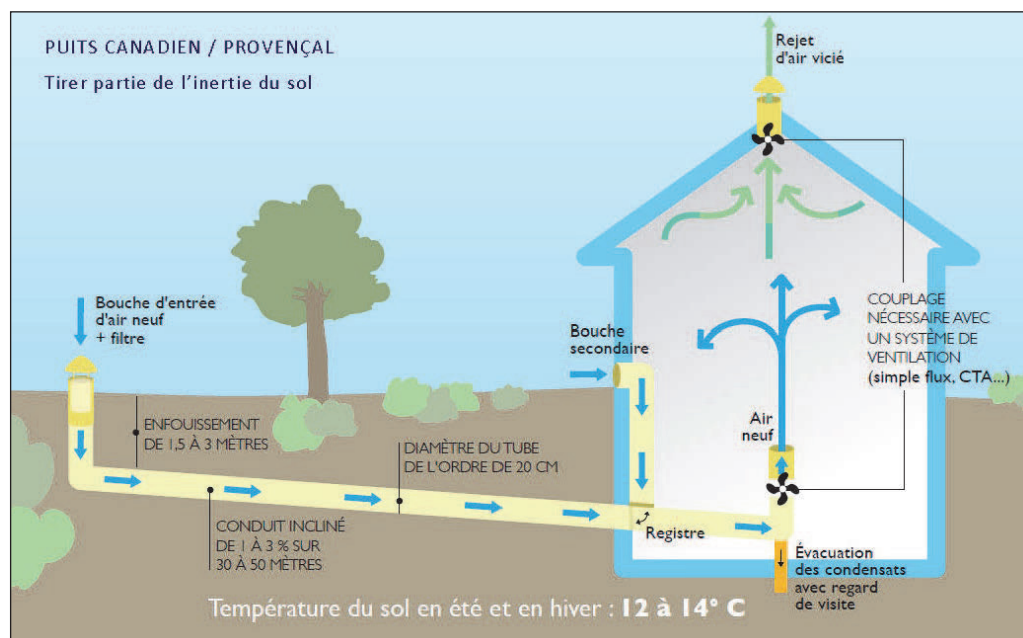


Figure 11

Schéma d'un habitat exploitant un puits canadien/provençal.



Figure 12

Application concrète d'un puits canadien/provençal.

4.3. Utilisation de l'éclairage naturel

Pour améliorer le confort des habitants, l'humanité s'inspire de plus en plus de la nature. Nous venons d'en voir un exemple avec les puits canadiens ou provençaux, qui exploitent les propriétés

naturelles de l'air : sa capacité à circuler et à transporter la chaleur, permettant ainsi d'atténuer les excès ou les carences thermiques selon les besoins.

Les progrès en éclairage, notamment avec l'invention des LED, ouvrent une nouvelle

voie pour reproduire cette approche. Cette fois, ce n'est plus l'air qui déplace la chaleur, mais la lumière elle-même qui en devient le vecteur.

Prenons un exemple concret : agir directement sur le rayonnement solaire. Lorsqu'il atteint la maison, pourquoi ne pas le réfléchir vers le plafond ? À condition, bien sûr, que ce dernier soit très réfléchissant. Résultat : la lumière se diffuse dans toute la pièce, transformant un espace sombre et marqué par des zones d'ombre en un environnement lumineux et homogène. Inutile de préciser que l'énergie lumineuse qui l'accompagne réchauffe naturellement l'ensemble de la pièce.

Il existe aussi des techniques plus avancées pour des effets encore plus ciblés. Par exemple, on peut capter la lumière sur les toits, la rediriger vers l'intérieur de la maison via des fibres optiques, et l'acheminer vers des espaces sans éclairage naturel ni fenêtres – leur redonnant ainsi vie. C'est ce qu'on appelle le *daylighting*, une méthode qui apporte non seulement de la lumière, mais aussi un peu de chaleur pendant la journée.

5 Retour sur les habitats du passé

5.1. Habitats troglodytes et habitation en terre crue et en argile

L'habitat troglodyte¹⁰ est un habitat creusé dans la roche,

au sein de cavernes. On en trouve des traces il y a plusieurs milliers d'années dans des régions au climat continental, c'est-à-dire des zones où les températures atteignaient des extrêmes : très chaudes en été et très froides en hiver.

Les habitants ont rapidement compris qu'il était préférable de vivre dans un tel habitat, où la température reste stable autour de 15 °C, plutôt que de subir des variations extrêmes comme -30 °C en hiver ou +40 °C en été. L'inertie¹¹ thermique de la montagne offre en effet une température plus agréable et stable, bien plus confortable que ces larges fluctuations. L'architecture moderne a su tirer parti de ces propriétés thermiques pour s'adapter au terrain, en construisant des maisons troglodytes modernes, enterrées plus ou moins complètement afin de bénéficier de l'inertie du sol. C'est dans cet esprit qu'ont vu le jour ces habitats.

On a évoqué précédemment l'utilisation du phénomène des transitions de phase pour gérer les variations thermiques. Cela pourrait sembler être une approche très sophistiquée, propre à des ingénieurs scientifiques ayant compris la capacité de certains matériaux à stocker la chaleur. Pourtant, de superbes exemples d'habitats exploitant ces changements de phase ont été présentés récemment : il

10. Habitation creusée directement dans la roche (grottes naturelles ou artificielles), souvent pour profiter de l'inertie thermique naturelle du sol.

11. Inertie thermique : capacité d'un matériau ou d'un bâtiment à stocker la chaleur (ou le froid) et à la restituer lentement, stabilisant la température intérieure malgré les variations extérieures.

s'agit de maisons en terre crue, en argile. Ces matériaux posent d'ailleurs des défis que les architectes du passé savaient déjà maîtriser. L'argile absorbe l'eau, tout comme les habitats construits avec ce matériau. Cette eau se condense sous forme de rosée¹². Ce sont tous ces états physico-chimiques différents qui sont traités comme des phases distinctes d'un même matériau.

Même dans les pays très chauds, la rosée existe, et l'eau se condense puis reste en quelque sorte prisonnière de l'argile hygroscopique¹³. Lorsque, le matin, la chaleur commence à monter, cette eau s'évapore, consommant ainsi de l'énergie et rafraîchissant l'intérieur de la maison. On peut de cette manière maintenir une certaine fraîcheur à l'intérieur de ces habitats en terre crue, au moins pendant une partie de la journée, même dans les régions où il fait extrêmement chaud.

5.2. Le confort à l'intérieur d'un igloo

On ne peut pas, en tant que lecteur de ce chapitre, s'intéresser au logement des gens et au confort de leur habitat sans s'intéresser à l'igloo. Ce logement traditionnel des Esquimaux, situé dans un environnement polaire, est dépourvu de chauffage et entièrement construit en neige

et en glace. C'est un paradoxe fascinant.

L'igloo est un habitat absolument remarquable. Imaginez : vous êtes au milieu de l'Arctique et vous devez construire un abri. Il n'y a pas de forêt, pas d'accès à la terre, à la roche ou aux cailloux. Les Esquimaux, ou Inuits, ont résolu ce problème en utilisant un matériau parfaitement biosourcé¹⁴, renouvelable et local : la neige. C'est avec elle qu'ils construisent les igloos.

Et cette neige, qu'est-ce que c'est ? C'est d'abord un matériau isolant : elle emprisonne de l'air, qui reste plus ou moins immobile car piégé dans ce matériau poreux qu'est la neige.

5.3. L'isolation thermique et la membrane naturelle de glace

Si l'on pose la question « Quelle est la température ressentie dans un igloo ? », on obtient très souvent des réponses comprises entre 10 et 14 °C. Pourtant, il ne peut pas faire 10 ou 14 °C dans un igloo, car à cette température, il fondrait... et pourtant, c'est bien ce qui est ressenti. On ne vit donc pas à l'intérieur de l'igloo dans les mêmes conditions qu'à l'extérieur, où les températures peuvent descendre à -30 ou -40 °C. La raison est simple : vous disposez d'un matériau isolant. Si vous parvenez à maintenir une température de l'ordre de 0°, vous êtes déjà

12. Rosée : eau qui se condense la nuit sur les surfaces froides quand l'air humide refroidit.

13. Propriété d'un matériau qui absorbe facilement l'humidité de l'air ambiant (ex. : argile dans les habitats en terre crue).

14. Biosourcé : matériau issu de la biomasse (origine végétale ou animale renouvelable), comme la neige pour l'igloo ou la laine de mouton en isolation moderne.

bien mieux qu'à l'extérieur, et c'est grâce à l'isolation de ce matériau qu'est la neige poreuse. Encore faut-il avoir une source de chaleur, et j'y reviendrai.

Autre point important : je vous ai dit qu'il fallait de l'air immobile. Or, à l'intérieur de l'igloo, l'air est effectivement immobile dans la neige. Cependant, s'il y a beaucoup de vent, celui-ci exerce une pression sur cet air, qui peut traverser le milieu poreux, car les pores sont connectés, et être déplacé par le vent.

Pourtant, les habitants ne disposaient pas de membranes.

Mais naturellement, voici ce qui se passe : les personnes qui vivent dans l'igloo dégagent une certaine chaleur, et cette chaleur fait fondre un peu de la neige à l'intérieur. L'eau de fonte se retransforme ensuite en glace, formant une fine pellicule qui agit comme une membrane, empêchant le vent extérieur de déplacer l'air contenu dans la neige. Il existe donc un système automatique et naturel de création de cette membrane, qui empêche l'air d'être déplacé.

Et ce mécanisme repose sur une source d'énergie : votre propre rayonnement infrarouge en est le moteur.

Conclusion

Pour les scientifiques, ingénieurs et architectes, aborder la question de l'habitation révèle une véritable surprise. On aurait pu croire évoluer dans un domaine maîtrisé, voire banal – « c'est essentiel, mais nous savons tout faire ! ».

Pourtant, ce chapitre nous a offert une révolution : non, nous ne sommes pas en terrain connu. La démographie galopante, le changement climatique et les enjeux géopolitiques des ressources transforment radicalement les données du problème. Plus que jamais, nous sommes appelés – voire contraints – à innover, à créer.

Heureusement, nous disposons aujourd'hui d'un réservoir inépuisable de connaissances : les avancées matérielles et technologiques accumulées ces dernières décennies.

Alors, pour conclure : observez les maisons qui nous émerveillent et nous inspirent. Elles ne sont que les prémices d'une centaine de merveilles que les décennies à venir vont édifier pour nous.

Partie 2

La chimie acteur
de la décarbonation
de l'habitat

Comment décarboner l'industrie cimentière et gérer le recyclage du béton ?

D'après la conférence de Laurent Duveau, par Paul Rigny

D'après la conférence de Laurent Duveau, Directeur Performance Environnementale pour le groupe Vicat. Diplômé d'AgroParis-Tech et de l'ESSEC, il a débuté sa carrière dans le domaine de la production microbiologique, avant de s'orienter vers la gestion des systèmes d'information et devenir le directeur des systèmes d'information du groupe Vicat en 2008. Depuis 2020, il supervise le plan d'action destiné à accompagner la transition du groupe Vicat vers une industrie du ciment et du béton bas carbone, en intégrant l'ensemble des enjeux environnementaux majeurs. (Figure 1).



Figure 1

Présentation de la conférence et du conférencier.

1 Présentation du groupe Vicat et de ses activités

1.1. Historique du groupe

Le ciment est une invention française (**Figure 2**). En 1817, Louis Vicat, ingénieur diplômé de l'École polytechnique et des Ponts et Chaussées, découvre qu'en combinant, à haute température, des proportions précises de calcaire et d'argile, une réaction chimique permet d'obtenir un matériau à la formulation homogène et stable. Cette invention permet d'industrialiser un procédé déjà connu depuis l'Antiquité, les Romains utilisant des pierres pouzzolaniques aux propriétés similaires.

L'histoire du groupe est marquée par une forte dimension familiale : c'est le fils de Louis Vicat qui fonde la première

cimenterie, et aujourd'hui, Vicat est toujours une entreprise familiale, dirigée par la 7^e génération. Estimant devoir son invention à la nation française, Louis Vicat renonce à la déposer sous brevet, permettant ainsi à l'industrie cimentière de se développer rapidement. Si l'on entend souvent le nom de « ciment Portland » pour qualifier le ciment commun, c'est parce qu'un de nos voisins anglais, sur la base des travaux de Louis Vicat, a ensuite breveté un procédé similaire¹.

Pour introduire ce chapitre, je commencerai par un mot du PDG² de Vicat (**Figure 3**) :

« Le Groupe met tout en œuvre pour atteindre

1. Le ciment Portland est le nom donné par Joseph Aspdin, détenteur du premier brevet sur le ciment.

2. Président directeur général.

À l'origine, une découverte scientifique

- En 1817, Louis Vicat invente le ciment moderne lors de la construction du pont de Souillac dans le Lot (46).
- En 1853, son fils, Joseph Vicat crée la première cimenterie du Groupe au Genevrey-de-Vif en Isère (38).
- De 1853 à nos jours, 7 générations de dirigeants ont développé le groupe Vicat.



Pont de Souillac sur la Dordogne (Lot), dit Pont Louis Vicat



Les fours dits « biberons » de l'usine du Genevrey-de-Vif

Figure 2

Historique du béton et de l'entreprise Vicat.

sur l'ensemble de sa chaîne de valeur. »

Une affirmation forte, qui soulève une question : pourquoi un dirigeant dont l'objectif premier est de produire et vendre du ciment accorde-t-il une telle importance à l'environnement ? Nous allons tenter de le comprendre.

Avec un chiffre d'affaires proche de 4 milliards d'euros et environ 10 000 collaborateurs, Vicat est présent dans 12 pays (Figure 5). Ses activités couvrent la chaîne de valeur de la fabrication du béton : des cimenteries, des centrales à béton et des carrières de granulats, comme le montrent les chiffres clés de son activité (Figure 4).

1.2. Les enjeux de la production de béton

Le béton est un matériau remarquablement polyvalent, composé de trois éléments :

Le mot du Président

« Le Groupe met tout en œuvre pour atteindre l'objectif de neutralité carbone sur sa chaîne de valeur. »

Guy Sidos
Président-directeur général



Figure 3

Engagement écologique du PDG de l'entreprise Vicat.

Le groupe Vicat en chiffres

3,9 Mds€
de chiffre d'affaires
2/3 réalisés hors de France

Près de
10 000
collaboratrices et collaborateurs

12 pays
d'implantation

3 activités
principales



CIMENT
17 cimenteries
5 centres de broyage
28 millions de tonnes
de ciment vendues



BÉTON
275 centrales à béton
9,4 millions de m³ de
béton vendus



GRANULATS
67 carrières de granulats
22,9 millions de tonnes
de granulats vendues

Figure 4

Chiffres-clés sur la taille et l'activité du groupe Vicat.

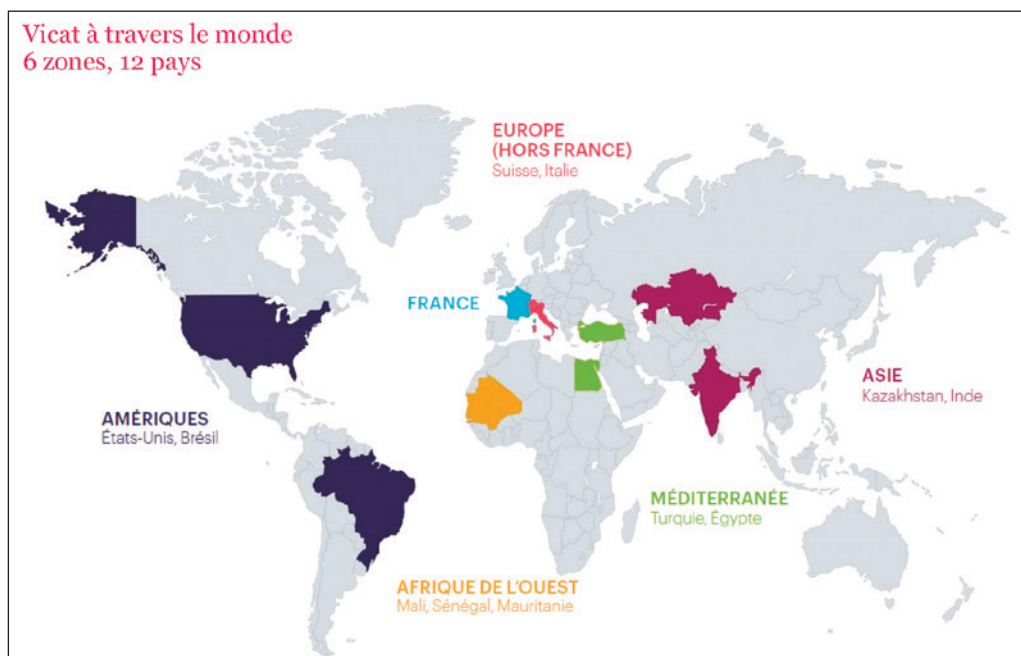


Figure 5

Implantation mondiale du groupe Vicat.

le ciment, les granulats (des cailloux concassés) et l'eau (**Figure 6**). Sa propriété fondamentale repose sur la réaction du ciment qui, au contact de l'eau, durcit en liant les granulats entre eux. À l'instar des adhésifs (comme évoqué dans le **chapitre de François Court** dans cet ouvrage), le ciment agit comme une colle, un liant hydraulique : au contact de l'eau, il permet d'assembler les granulats pour former une pierre artificielle, modulable à volonté. La force du béton réside dans son accessibilité universelle, son bas coût et sa facilité de mise en œuvre.

Ses qualités intrinsèques sont telles qu'elles suscitent parfois des remarques ironiques, comme « *Le béton est si simple et économique à produire qu'on*

arrive même à faire des choses très laides avec », ou encore l'usage péjoratif du verbe « *bétonner* ». Pourtant, il ne faut pas s'y tromper : le béton permet aussi de réaliser des œuvres architecturales magnifiques. Pour s'en convaincre, il suffit, par exemple, d'admirer le palais d'Iéna, réalisation en béton par l'architecte Auguste Perret au début du ^{xx}^e siècle, siège du CESE³ (Conseil Économique, Social et Environnemental), 3^e institution démocratique française après l'Assemblée nationale et le Sénat.

Disponible partout dans le monde, le béton (et donc le

3. Le CESE, situé au palais d'Iéna à Paris, représente les professionnels et permet de les mettre en relation.

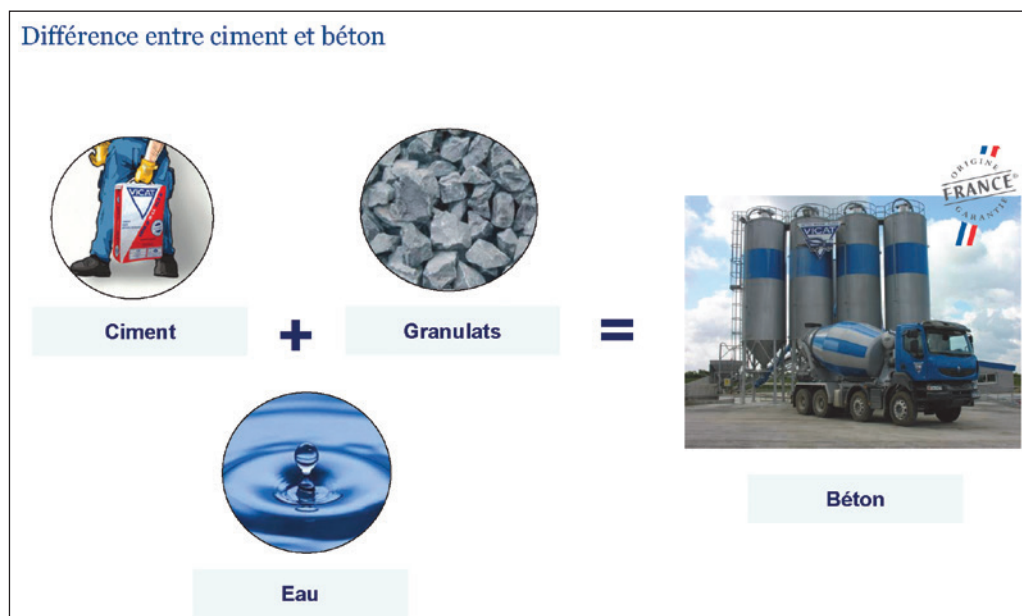


Figure 6

Détail de la composition du béton.

ciment) est aujourd'hui un matériau de construction indispensable, malgré l'émergence d'alternatives. Le bois, par exemple, bien que séduisant, voit son utilisation limitée par les ressources disponibles : la planète ne peut en produire assez pour répondre aux besoins mondiaux en construction. D'autres innovations proposées par des start-ups peinent à offrir la même durabilité et reposent sur des matériaux issus d'autres industries, disponibles en quantité limitée, comme ceux issus des hauts fourneaux⁴.

Le béton est avant tout utilisé pour le logement, ce qui nous conduit directement au défi

du changement climatique. En 1900, la Terre comptait 1,6 milliard d'habitants. Aujourd'hui, la population mondiale atteint environ 8 milliards d'habitants et devrait dépasser les 10 milliards à l'horizon 2050, selon les projections de l'ONU. Or, cette population croissante doit être logée dans des maisons et des immeubles, et dotée d'infrastructures telles que routes, ponts, hôpitaux... Sans le béton, il serait impossible de répondre à ces besoins en termes de volume, de quantité et de coût.

Cependant, ce matériau présente un inconvénient majeur : son empreinte carbone. La responsabilité de l'industrie cimentière est donc double : répondre aux besoins fondamentaux de construction à l'échelle mondiale, tout en limitant ses émissions de CO₂

4. Le métier de haut fourneau désigne l'action de surveiller et contrôler la qualité des installations de production de fontes.

afin de préserver l'équilibre climatique. Et cette réflexion ne peut se limiter à la France : elle doit englober la planète entière. À cet égard, les initiatives comme celles de l'école de Madagascar présentée dans cet ouvrage montrent que des solutions émergent aussi en Afrique⁵.

1.3. Procédé de fonctionnement de l'entreprise

Le modèle économique de Vicat repose sur trois étapes clés (Figure 7) :

1. l'extraction des matières premières : calcaire, argile et granulats,
2. la production du ciment dans une cimenterie, une industrie lourde, suivie de

son mélange avec des granulats et de l'eau dans une centrale à béton,

3. la fourniture du béton à ses clients constructeurs de bâtiments ou d'infrastructures.

La figure 8 illustre le procédé de fabrication du ciment. Les pierres extraites sont d'abord broyées, puis introduites dans une tour de préchauffage avant de passer dans le four de cuisson. Sous l'effet d'une chaleur intense, la matière se transforme progressivement pour devenir du clinker⁶. Une fois broyé, ce dernier acquiert cette propriété unique : celle de se lier à l'eau pour former une pierre artificielle, le béton.

Dans un groupe comme Vicat, où le ciment représente environ 50 % du chiffre d'affaires,

5. Exemple évoqué dans une conférence précédente de ce cycle.

6. Le clinker est le principal composant du ciment.

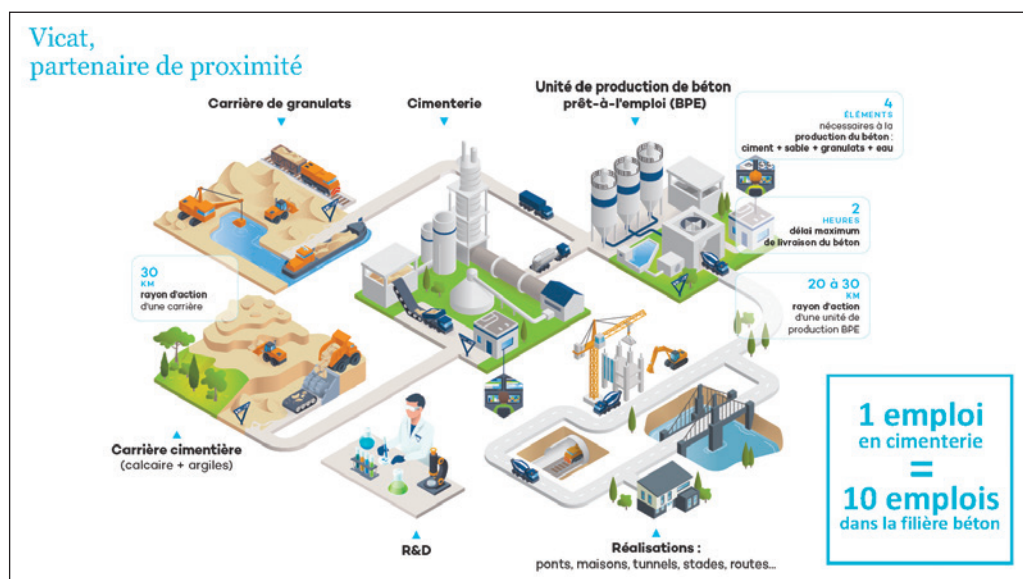


Figure 7

Organisation générale du groupe Vicat.

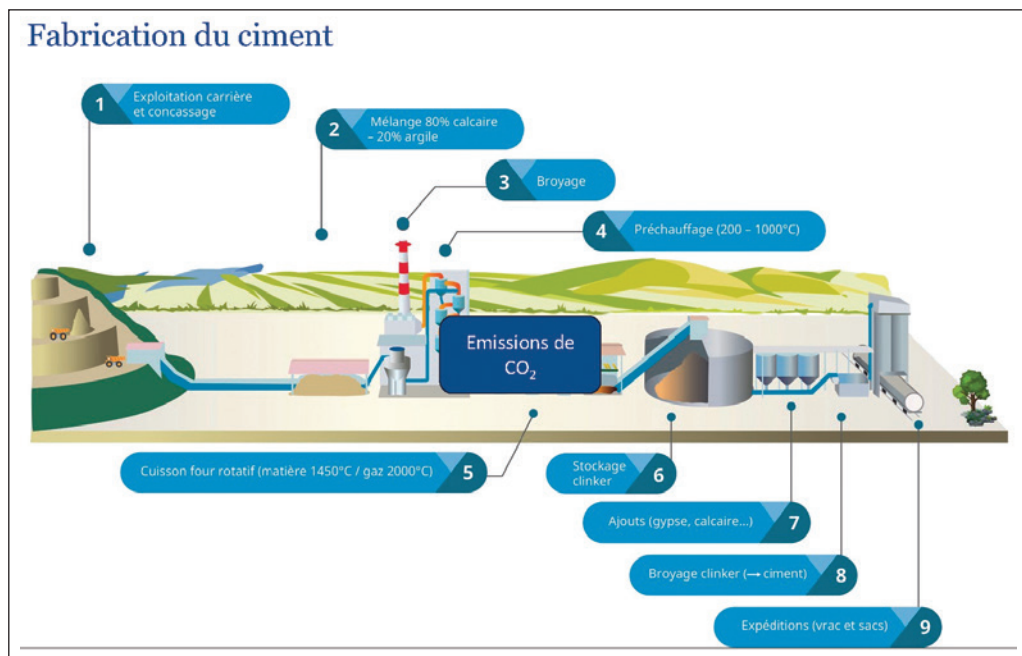


Figure 8

Procédé de fabrication du ciment.

95 % de nos émissions (scopes 1, 2 et 3⁷) proviennent de cette phase de transformation en cimenterie. C'est donc là que se joue l'enjeu majeur de notre activité. Et c'est précisément dans ce contexte que l'expertise des chimistes devient indispensable.

7. Scope : étendue en français. Lorsque l'on dresse un bilan carbone, on regarde différents domaines d'émissions de gaz à effet de serre. Dans le scope 1, nous prenons en compte les émissions réalisées par les installations de l'entreprise. Dans le scope 2, nous regardons les émissions indirectes liées à l'achat d'énergie (chauffage, électricité...) par l'entreprise. Enfin, le scope 3 permet la prise en compte des émissions indirectes induites par l'activité en amont et à l'aval de ses activités, notamment les approvisionnements et les transports réalisés par des tiers.

2 Lutte contre les émissions de gaz à effet de serre dans la production de ciment

2.1 Utilisation de l'équation de réaction chimique pour identifier les leviers d'action

Le clinker est le constituant principal du ciment. Pour simplifier, il résulte de la fusion partielle d'un mélange de calcaire pour 80 %, d'argile pour 20 % et de quelques autres additifs en très faible quantité.

La **figure 9** présente l'équation de formation de la chaux vive (CaO) qui se produit dans la tour de préchauffage par la réaction de décarbonatation du calcaire (CaCO₃) à haute température obtenue par une

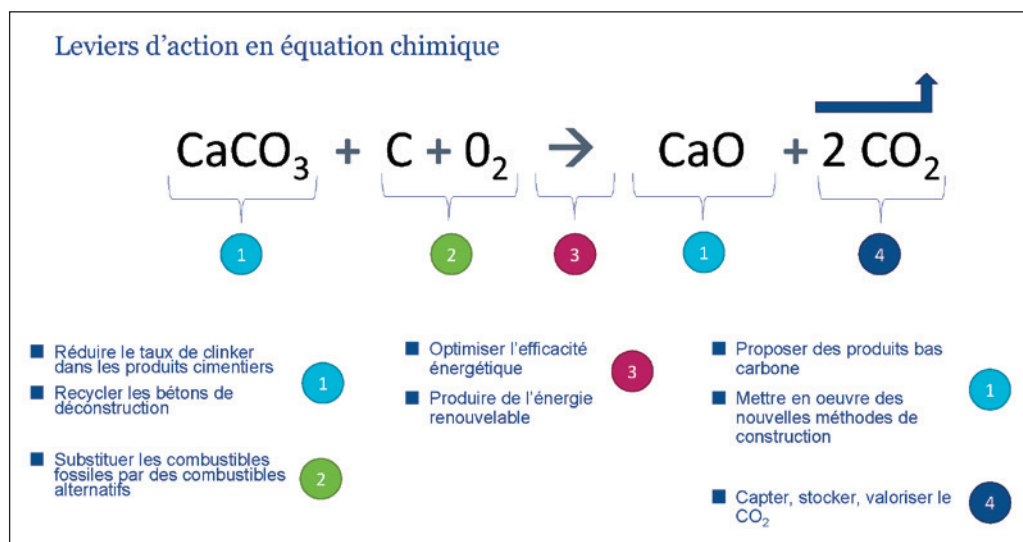


Figure 9

Équation de formation de la chaux active et leviers d'actions contre l'émission de gaz à effet de serre.

combustion d'une source de carbone © et d'oxygène (O₂). Tant la décarbonatation que la combustion dégagent du CO₂. La chaux vive est le constituant de base du processus

de clinkérisation qui se produit dans le four.

Réduire les émissions de gaz à effet de serre revient à optimiser cette équation chimique.

L'offre bas carbone DECA
Exemple : béton

LE BAS CARBONE PAR VICAT





Une offre adaptée aux besoins des acteurs de la construction pour la RE2020

Engagé sur une trajectoire de neutralité carbone sur sa chaîne de valeur, Vicat présente son offre bas carbone : DECA. La gamme DECA répond ainsi aux enjeux de la RE2020 et plus globalement aux grands défis environnementaux.

Résidence ABC (Autonomous Building for Citizens) à Grenoble (France) : premier ouvrage réalisé avec du béton bas carbone DECA



Figure 10

Produits bas carbone proposées par le groupe Vicat.

On observe que la quantité de CO₂ rejetée est directement proportionnelle à la quantité de calcaire (CaCO₃) introduit dans le four et donc de clinker qui en sortira. Le premier levier pour réduire les émissions de CO₂ consiste donc à limiter la part de clinker dans les produits cimentiers, en le compensant par des ajouts minéraux variés moins carbonés. Ceci implique des travaux rigoureux de validation des nouveaux produits et leur adoption progressive sur le marché de la construction. Parallèlement, il est essentiel de développer des filières de recyclage adaptées aux bétons de déconstruction, permettant de limiter l'utilisation de produits neufs.

Le deuxième levier de réduction d'émissions de gaz à effet de serre vise à substituer les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) par des combustibles alternatifs issus des déchets des territoires. La cimenterie est un outil particulièrement pertinent pour cette approche. La température de combustion très élevée (1 450 °C) permet en effet une destruction en quantité massive des polluants contenus dans les déchets, et le clinker réintègre les cendres issues de la combustion directement dans sa matrice. La cimenterie peut ainsi être considérée comme un outil industriel de valorisation et de destruction des déchets non dangereux ultimes, dont la production de ciment constitue le résultat final. On peut citer à titre d'exemple historique l'incinération des farines animales issues de la crise de la vache folle qui a été effectuée en cimenterie. Deux premières cimenteries du groupe Vicat

fonctionnent d'ores et déjà avec un taux de quasi 100% de combustibles alternatifs, sans recours aux combustibles fossiles.

Le troisième levier, mais on aurait pu commencer par lui, est l'optimisation du rendement de l'équation, qui passe par l'optimisation énergétique forte génératrice d'économies, diminution des consommations électriques par l'amélioration du rendement des machines et amélioration du bilan thermique.

Enfin, le quatrième levier est le déploiement de technologies de captation du CO₂ (projets CCU – Carbon Capture and Utilisation – et CCS – Carbon Capture and Storage), indispensables pour éviter toute émission résiduelle dans l'atmosphère. Ces technologies émergentes commencent à se concrétiser : la première cimenterie équipée d'un système de captation a démarré en Norvège, et Vicat prépare la sienne à Montalieu (Nord-Isère). Ces investissements, colossaux et non rentables à court terme sans mécanismes de support à la décarbonation, illustrent l'engagement du groupe en faveur de l'innovation et sa confiance en l'avenir.

2.2. Les solutions décarbonées développées par le groupe Vicat

En explorant des solutions pour réduire l'empreinte carbone de ses ciments, Vicat s'engage dans une démarche commerciale innovante, rompre avec les pratiques traditionnelles du secteur. Voici deux exemples de produits développés dans cette optique.

En France, Vicat propose la gamme DECA, une offre de produits aux bilans carbone réduits, conçus pour s'adapter aux besoins spécifiques des clients, aux différents types de construction ou à des exigences techniques particulières (Figure 10). La réglementation RE2020 joue un rôle clé dans cette approche, en fixant des limites strictes d'émissions de CO₂. Ces contraintes nous permettent de proposer des solutions clés en main, adaptées à une économie en transition. Sans ce cadre réglementaire, il serait en effet plus difficile de promouvoir ces nouveaux produits face au béton standard, largement dominant sur le marché.

Dans la gamme DECA, on trouve en particulier l'offre novatrice nommée CARAT. Celle-ci combine du clinker, émetteur de CO₂, avec du biochar, un matériau qui agit comme un puits de carbone (Figure 11). Le biochar, de couleur noire, donne au béton une teinte sombre. Il est aussi possible de substituer une partie du clinker par des argiles activées, ce qui confère au béton une couleur légèrement rosée. Les clients étant habitués au béton gris traditionnel sont aussi en transition pour adapter leurs habitudes. Convaincre les acteurs de la construction – un secteur par nature conservateur – prendra du temps, mais c'est une étape nécessaire pour effectuer la transition écologique.

Développement du premier liant zéro carbone

CARAT



L'offre bas carbone DECA de Vicat s'enrichit du **premier liant carbo-négatif CARAT** permettant d'obtenir un béton ultra bas carbone. Cette innovation renforce les engagements du Groupe pour atteindre la **neutralité carbone** sur sa chaîne de valeur d'ici 2050.

Disposant de **Modules d'Informations Environnementales vérifiées**, ce nouveau liant atteint les niveaux d'émissions nettes de CO₂ suivants :

- Le liant 0133H, dont les performances techniques se rapprochent d'un ciment 42,5 R a une valeur de -15 kg CO₂ /t.
- Le liant 2402H, dont les performances techniques se rapprochent d'un ciment 32,5 R a une valeur de -310 kg CO₂ /t.



Chantier de construction du nouveau siège social de Léon Grosse (Bron)

Figure 11

Projet CARAT à base de biochar proposé par le groupe Vicat.

Conclusion : de l'invention du ciment à l'industrie bas carbone

L'offre développée par le groupe Vicat illustre le passage d'un modèle linéaire à une économie circulaire intégrée aux territoires. À travers des solutions comme proposées par sa filiale CIRCULère (**Figure 12**), les matériaux issus de la déconstruction et les déchets locaux sont valorisés et réintroduits dans les cycles de production. Les cimenteries deviennent ainsi des plateformes industrielles locales, consommant des ressources et des énergies issues du territoire, et fournissant des matériaux à proximité des chantiers. Par leur ancrage géographique, elles limitent les transports, soutiennent l'emploi local et participent à une économie à taille humaine.

Le ciment et le béton, souvent perçus comme des matériaux bien connus, sont en réalité le support d'innovations scientifiques et industrielles continues. En 1817, Louis Vicat pose



Figure 12

Procédé du projet bas carbone CIRCULère du groupe Vicat.

les bases de la formulation du ciment et initie une aventure industrielle. Deux siècles plus tard, ses héritiers prolongent cette dynamique, pour répondre aux enjeux contemporains tout en réduisant l'empreinte carbone des produits (**Figure 13**).



Figure 13

Les actions menées par le groupe Vicat pour atteindre la neutralité carbone.

Adhésifs pour concevoir durable et recyclable

D'après la conférence de François Court, par Paul Rigny

D'après la conférence de François Court, docteur en chimie à l'ESPCI. Après avoir commencé sa carrière au Japon, il a occupé plusieurs postes en recherche et marketing dans la société Arkema. Il est actuellement vice-président pour la recherche et le développement durable de la société Bostik, le segment Adhésif d'Arkema.

1 Introduction : l'adhésif, un levier méconnu de la construction durable

La construction représente l'un des secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre, ce qui a conduit à la mise en place de nombreuses initiatives visant à diminuer son empreinte carbone. Les stratégies déployées couvrent divers aspects, notamment le design, l'architecture, l'isolation des bâtiments et le choix des sources d'énergie pour le chauffage. Parmi les enjeux clés figure la question des matériaux, avec par exemple

l'utilisation accrue du bois et la réduction de l'empreinte des matériaux comme le béton.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux adhésifs, un domaine souvent négligé bien qu'il joue un rôle fondamental. Ces produits permettent non seulement d'assembler divers matériaux entre eux, mais remplissent également de nombreuses autres fonctions, dont nous verrons comment elles contribuent à réduire l'empreinte carbone des bâtiments.

L'adhésif est au cœur de mon activité en tant que responsable R&D chez Bostik, la division

spécialisée dans les adhésifs du groupe Arkema (*Figure 1*). C'est avec enthousiasme que je m'attache à mettre en lumière ce composant chimique indispensable, mais trop souvent sous-estimé.

Arkema, c'est vingt mille collaborateurs à travers le monde, dédiés aux matériaux innovants. Rien que pour les adhésifs, ce sont sept mille personnes, dont plus de six cents chercheurs, qui œuvrent dans ce domaine, générant un chiffre d'affaires de 2,7 milliards d'euros. Ces chiffres témoignent de l'importance cruciale de l'innovation dans ce secteur.

Les adhésifs sont utilisés dans pratiquement tous les secteurs d'activité. Ici, nous nous concentrons sur la construction, mais leur utilité s'étend bien au-delà : dans l'industrie, par exemple, presque tout est collé. Sans adhésifs, les voitures ne pourraient pas circuler, car ces produits permettent une réduction significative de leur poids, ce qui diminue leur empreinte carbone. On en trouve également

dans les batteries des véhicules électriques, dans le packaging, ainsi que dans les systèmes de construction.

On pense peut-être moins à leur présence dans les objets du quotidien, pourtant, un simple téléphone portable contient plus d'une quinzaine de colles différentes. Même dans le domaine de l'hygiène, comme les couches-culottes, les adhésifs sont omniprésents. Leur utilisation s'étend ainsi du smartphone aux produits les plus inattendus, ce qui fait de ce secteur de la chimie un domaine particulièrement fascinant.

2 Un matériau omniprésent au service de la performance

Revenons au secteur de la construction et intéressons-nous à un schéma illustrant les multiples usages des adhésifs. Sans vouloir jouer sur les mots, leur présence s'étend littéralement du sol au plafond (*Figure 2*).

Ils interviennent dès la préparation des sols, avec les chapes

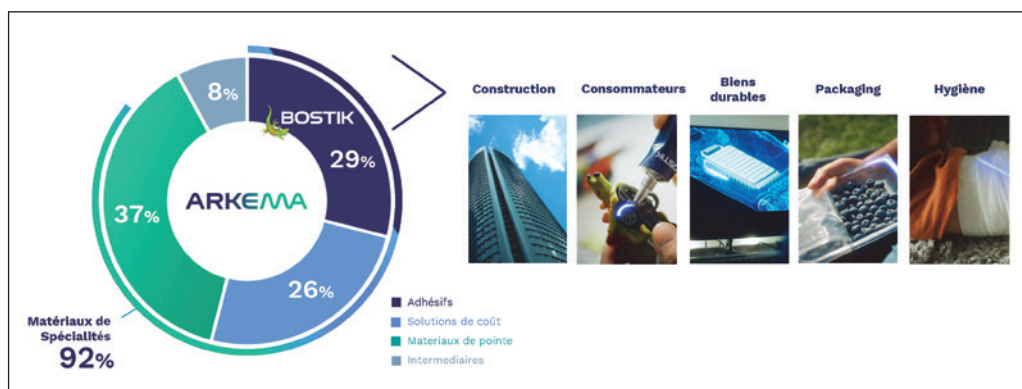


Figure 1

Les secteurs d'activité de Bostik.

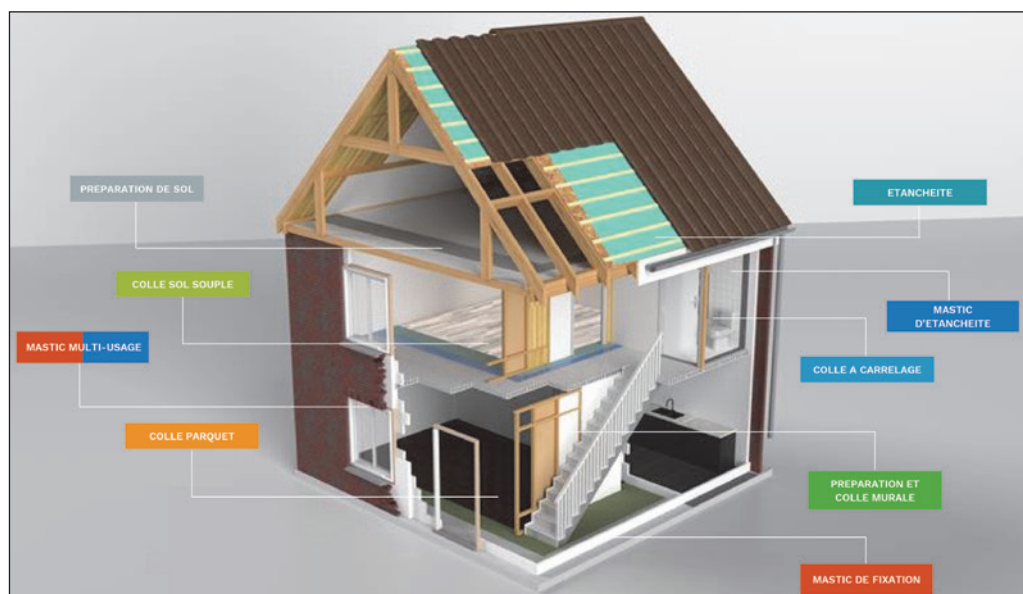


Figure 2

Lieux d'utilisation des adhésifs dans une maison.

de ragréage, puis pour fixer les différentes structures : parquets, carrelages, ou encore les mastics d'étanchéité que l'on retrouve dans les salles de bains ou sur les toitures.

De plus, le double vitrage ne pourrait exister sans adhésif, car ce sont les joints qui garantissent l'étanchéité du système. Et il n'y a pas non plus de bois de structure sans adhésif parce qu'aujourd'hui, on ne veut pas se contraindre à n'utiliser que des chênes centenaires comme à Notre-Dame. Grâce à des techniques comme le lamellé-collé¹,

rendu possible par des colles ignifugées, le bois devient un matériau structurel performant.

3 La stratégie de décarbonation du groupe Arkema

Revenons à la question de l'empreinte carbone, une préoccupation centrale pour l'industrie aujourd'hui. Arkema s'est engagé à réduire son impact environnemental, comme en témoigne une feuille de route claire, précise et chiffrée (Figure 3).

L'objectif est d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, en prenant comme référence les émissions de 2019, avec une étape intermédiaire fixée à 2030. Cela se traduit par une réduction de plus de 48 % pour

1. Système de construction utilisant des planches de bois assemblées par des colles spécifiques ignifuges (résistantes au feu). Ce procédé permet de créer des structures porteuses performantes sans nécessiter de bois massifs centenaires.

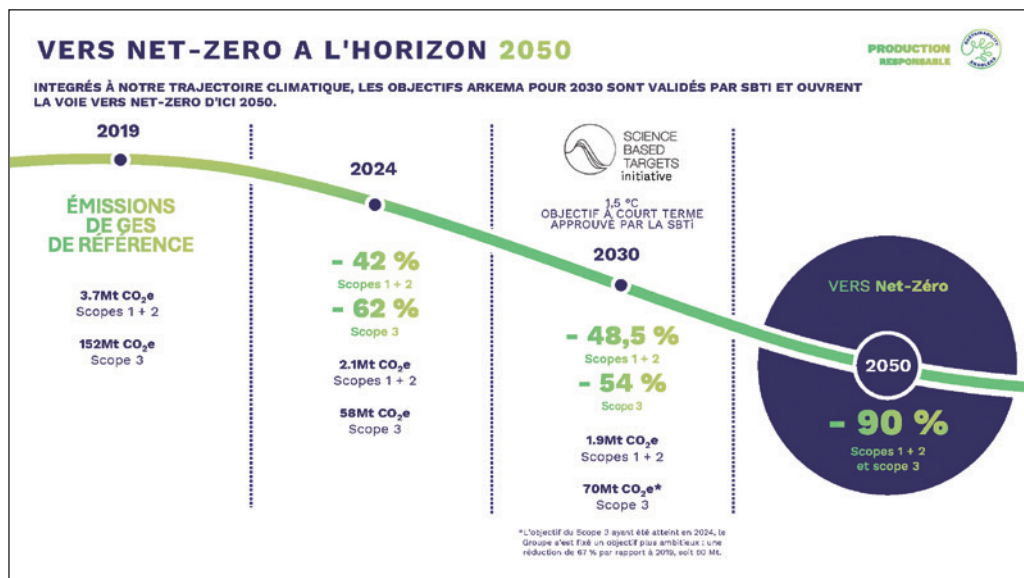


Figure 3

Feuille de route d'Arkema sur l'empreinte carbone, source : Arkema.

les scopes 1 et 2², et de 54 % pour le scope 3. Ces cibles ont été validées par des organismes indépendants, dans le cadre de la *Science Based Targets initiative*³ (SBTi). Pour le scope 3, une réduction de 62 % a déjà été atteinte en 2024, ce qui a conduit à revoir à la hausse les ambitions pour 2030.

Les scopes 1 et 2 concernent les émissions directes liées à la production : énergie

consommée et CO₂ rejeté par nos usines. Le scope 3, quant à lui, englobe l'empreinte carbone de nos produits, des matières premières utilisées pour les fabriquer, ainsi que leur gestion en fin de vie. Bien que le recyclage soit souvent mis en avant, le scope 3 représente, en termes d'ordre de grandeur, jusqu'à 50 fois plus d'émissions que les scopes 1 et 2, car il inclut l'impact des produits eux-mêmes et de la gestion de leur fin de vie.

Pour illustrer comment les adhésifs peuvent contribuer à réduire l'empreinte carbone dans l'habitat, prenons un exemple concret : la rénovation des sols (**Figure 4**), et plus particulièrement celle des revêtements de surface, comme les parquets.

Avec une colle standard, lorsque l'on retire un revêtement de sol, une partie du

2. Catégories d'émissions de gaz à effet de serre définies pour une entreprise. Scopes 1 et 2 : émissions directes liées à la production et à la consommation d'énergie des usines ; scope 3 : émissions indirectes incluant l'empreinte des matières premières et surtout la gestion de la fin de vie des produits.

3. *Science Based Targets initiative* : partenariat international créé lors de la COP21 pour inciter les entreprises à agir pour le climat.



Figure 4

Illustration d'un cas réel de la rénovation du sol.

ragréage⁴ est inévitablement arrachée en même temps. Résultat : le sol plastique ne peut pas être recyclé tel quel, et il devient nécessaire de prévoir plusieurs jours pour refaire une préparation complète du sol. Autrement dit, c'est une source évidente de gaspillage.

4 L'innovation au service de l'économie circulaire : la solution REBOND

Les chercheurs de Bostik se sont attachés à résoudre ce défi lié à la rénovation des sols. Leur objectif ? Permettre un retrait aisé du revêtement plastique, afin de le récupérer et de le recycler.

La solution développée repose sur une colle aux propriétés chimiques légèrement modifiées, combinée à la pose préalable d'une trame souple. L'innovation réside dans la

manière dont la colle adhère à son support. Une fois la colle appliquée, le revêtement de sol est posé par-dessus. Cette méthode, utilisée aussi bien dans l'habitat que dans des bâtiments commerciaux comme les hôpitaux ou les écoles, s'avère particulièrement avantageuse pour les établissements hospitaliers. En effet, l'immobilisation d'une chambre pendant plusieurs jours n'est pas souhaitable. Grâce à cette technique, l'immobilisation passe de quatre à cinq jours à une seule journée, car elle élimine le besoin de refaire le ragréage ou de préparer à nouveau le sol.

Les tests ont confirmé l'efficacité de cette approche : le sol peut être facilement soulevé et retiré. Ensuite, la colle est éliminée, laissant une chape parfaitement propre ainsi qu'un revêtement non souillé. Cela permet de remplacer le revêtement, de recycler le sol plastique et de lui offrir une seconde vie (Figure 5).

Un autre atout de cette innovation réside dans la composition même de la colle, partiellement réalisée à partir de matières

4. Action de lisser et d'égaliser une surface [généraliser une chape de sol] avant la pose d'un revêtement. Dans le système traditionnel, l'arrachage d'un sol abîmé souvent cette couche, empêchant le recyclage.



Figure 5

Comparaison entre système traditionnel et système R3BOND pour la rénovation de sol.

biosourcées, ainsi que dans l'optimisation de son packaging (**Figures 6 et 7**), ce qui contribue à réduire davantage l'empreinte carbone du système R3BOND. La **figure 8** présente une comparaison des impacts environnementaux entre cette solution et les méthodes traditionnelles.

L'un des principaux avantages du système R3BOND, outre le gain de temps, est sa contribution à la réduction des émissions de CO₂. Les premières applications et leur succès ont permis d'évaluer systématiquement ses bénéfices. En comparant R3BOND à la solution classique (**Figure 8**),



Figure 6

Présentation du système R3BOND.

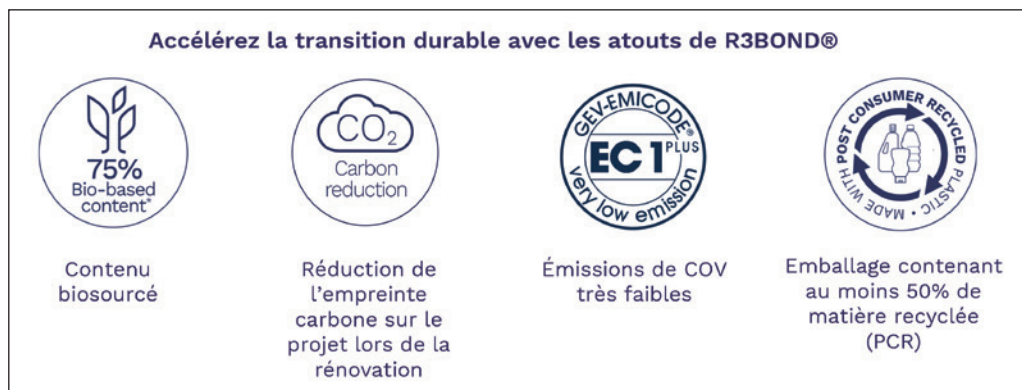


Figure 7

Atouts écologiques du système R3BOND. * 75 % de carbone biosourcé dans l'adhésif selon le standard EN 16640.

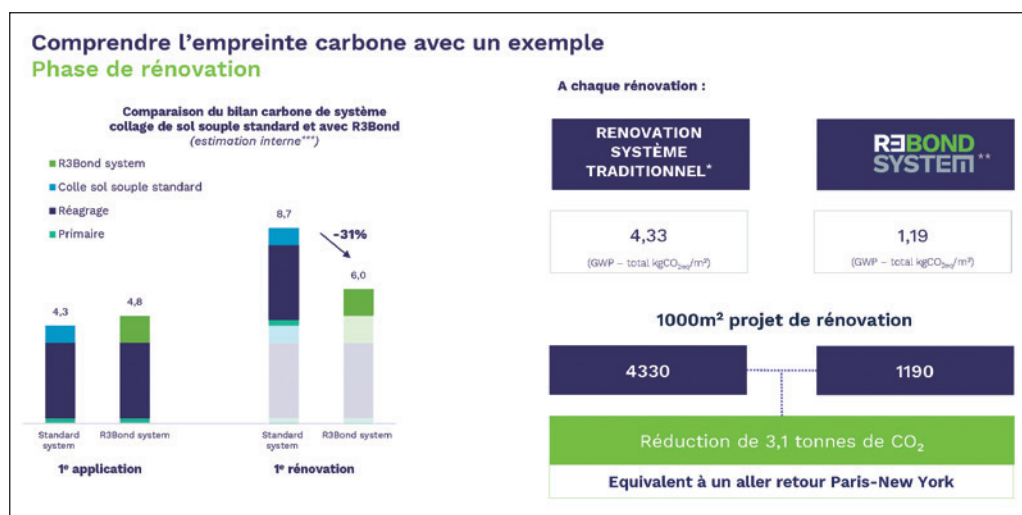


Figure 8

Empreinte carbone du système R3BOND. * Système traditionnel à la rénovation = primaire, ragréage, colle sol souple, ** système R3BOND = colle sol souple + trame, *** estimation interne basée sur les modèles EPDs de la FEICA d'un scénario de collage sol souple (primaire, ragréage, colle sol souple/ R3Bond system).

on observe une diminution spectaculaire de l'empreinte carbone, notamment lors des opérations de rénovation.

Ce progrès s'explique par l'adoption d'une approche circulaire, qui supprime une étape autrefois indispensable. Cette avancée incite à repenser

la conception des sols pour intégrer des systèmes écocirculaires⁵, favorisant ainsi

5. Modèle de conception visant à réutiliser ou recycler les matériaux en fin de vie pour éviter le gaspillage, illustré par le système R3BOND qui permet de retirer la colle proprement pour recycler le sol plastique.

une réduction significative des émissions de CO₂⁶.

5 Éco-conception et matières premières renouvelables

D'autres initiatives mettent en lumière le rôle clé des adhésifs dans la décarbonation de l'habitat, notamment en agissant sur le scope 3, lié à l'empreinte carbone des matières premières. L'enjeu ? Privilégier des ressources renouvelables, qu'elles soient recyclées ou biosourcées (*Figure 9*).

Parmi les innovations phares du groupe, la *SuperGlue*⁷ se distingue. Grâce à un procédé chimique inédit et peu énergivore, Arkema a intégré un dérivé d'huile de ricin⁸ dans sa

composition, une matière première biosourcée largement exploitée au sein du groupe. La plante *Ricinus communis*, dont est issue cette huile, pousse sur des terres impropres à l'agriculture et n'entre pas en concurrence avec les cultures alimentaires humaines ou animales. Il s'agit donc d'une ressource biosourcée particulièrement vertueuse. Cette matière première, déjà utilisée pour produire des polymères techniques hautement performants, a permis de développer une *SuperGlue* encore plus efficace que les versions déjà existantes car mieux résistante à l'eau.

Autre axe de travaux

D'autre part, le ciment, largement présent dans les mortiers de ragréage et les colles pour carrelage, fait l'objet d'efforts pour réduire son empreinte carbone. La méthodologie REBOND a souligné l'importance d'optimiser le packaging des produits, afin

6. Dioxyde de carbone, gaz à effet de serre.

7. Colle cyanoacrylate.

8. Plante vertueuse car elle pousse sur des terres arides non destinées à l'alimentation humaine ou animale. Ses dérivés permettent de créer des polymères techniques et des colles haute performance.

Les adhésifs : matériaux pour contribuer à la décarbonation de l'Habitat

- Formuler avec des matières premières **renouvelables** : **Recyclées ou Biosourcées**
- Développer des alternatives aux matières premières à haute empreinte Carbone (ex : Ciment dans les mortiers colles)
- **Packaging** :
 - Limiter les plastics mono-usage
 - Choisir des Plastics PCR*
- Concevoir pour la **circularité** / Réduction des déchets
 - Ecodesign et Fin de vie des produits (ex : R3BOND)



Figure 9

Exemples d'autres axes d'amélioration en termes de développement durable (éco-conception).

* PCR : Post Consumer Resin.

d'en faciliter l'utilisation et le recyclage. Cette approche, appliquée au ciment chez Arkema, s'inscrit dans une logique d'éco-conception dès la phase de développement, comme illustré par l'exemple de R3BOND. L'amélioration de la circularité passe aussi par la mise en place de filières de recyclage dédiées.

On peut également évoquer le projet Zebra⁹ (consultable en ligne), qui vise à rendre

9. Initiative collaborative (incluant Arkema, Veolia, Engie, etc.) visant à créer des pales d'éoliennes 100 % recyclables grâce à des résines et colles permettant de revenir aux composants initiaux en fin de vie.

les pales d'éoliennes recyclables grâce aux matériaux d'Arkema (résine thermoplastique et adhésif). Ce projet permet de séparer les constituants de la pale et pour la partie résine revenir aux monomères initiaux, s'inscrivant ainsi dans une économie circulaire. Son intérêt réside aussi dans sa dimension collaborative coordonnée l'IRT Jules Verne et réunissant des acteurs industriels majeurs le long de la chaîne de valeur comme Owens Corning, LM Windblades, Arkema, Veolia et Engie. Ce sont de tels efforts communs qui, souvent, permettent de réussir l'écodesign.

Conclusion

Pour Arkema, la chimie est un levier essentiel pour concevoir des matériaux innovants et durables. Le secteur de l'habitat, en particulier, offre un terrain idéal pour concrétiser cette vision.

Recyclage du verre : exemples du verre plat et de l'isolation

François Guillemot est responsable de marché international offre durable pour le verre bâtiment Saint-Gobain Glass. Il est diplômé du Cambridge Institute for Sustainability Leadership et de Chimie Paris Tech et est engagé dans des solutions bas carbone¹ et circulaires dans le secteur du verre pour le bâtiment.

Introduction

Le groupe Saint-Gobain intervient dans plusieurs secteurs d'activité (**Figure 1**). Dans ce chapitre, nous nous

intéresserons plus particulièrement au verre plat² et à l'isolation.

Examinons d'abord quelques données clés concernant ce groupe international, présent sur de nombreux marchés. Dans le domaine de la construction, il emploie 160 000 collaborateurs,

1. Bas carbone : qui émet très peu de dioxyde de carbone (CO₂), le principal gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique.

2. Verre en grandes feuilles plates utilisé pour les fenêtres, façades de bâtiments ou pare-brise.



Figure 1

Présentation de Saint-Gobain en quelques chiffres.

selon les chiffres de 2024. L'ambition de Saint-Gobain est de s'imposer comme leader de la construction durable³, en se concentrant sur trois axes principaux (cadres bleus) : la construction neuve et légère, la rénovation énergétique, ainsi que son rôle central dans la décarbonation⁴ de la construction et de l'industrie.

La **figure 2** présente les atouts de la construction légère et durable :

- Il s'agit non seulement de diminuer les émissions de carbone, mais aussi de limiter la consommation

des ressources (sujet de ce chapitre), de simplifier la déconstruction et d'améliorer la santé et le confort des occupants des bâtiments.

- Un autre objectif est d'optimiser la performance, notamment en réduisant les délais de construction.

Les bâtiments jouent un rôle clé dans l'économie circulaire

Le secteur du bâtiment représente 40 % de la consommation mondiale de matières premières⁵ et environ 40 % des flux de déchets solides⁶ (**Figure 3**). On mesure ainsi

3. Construction durable : façon de construire des bâtiments qui respecte l'environnement (moins de CO₂, moins de ressources consommées) tout en étant confortable et économique sur le long terme.

4. Décarbonation : action de réduire fortement (jusqu'à zéro) les émissions de CO₂ dans un secteur.

5. Matières premières : ressources naturelles extraites de la Terre (sable, calcaire...) utilisées pour fabriquer des produits.

6. Flux de déchets solides : quantité de déchets non liquides ou gazeux produits par une activité.



Figure 2

Les avantages de la construction légère et durable.



Figure 3

Les défis de l'industrie du bâtiment liés à l'économie circulaire.

l'importance d'agir sur cette problématique aujourd'hui.

J'ai inclus deux graphiques relatifs à l'exploitation et à l'extraction des ressources⁷ (Figure 4) : l'axe horizontal

correspond au temps, tandis que l'axe vertical indique les quantités en millions de tonnes. On observe qu'à partir des années 1970, les volumes de matières extraites ont connu une forte augmentation. Le sable, représenté en bleu foncé, se distingue comme une ressource majeure. Si les pays

7. Extraction des ressources : action de prélever des matériaux dans la nature.

Une extraction croissante de matières

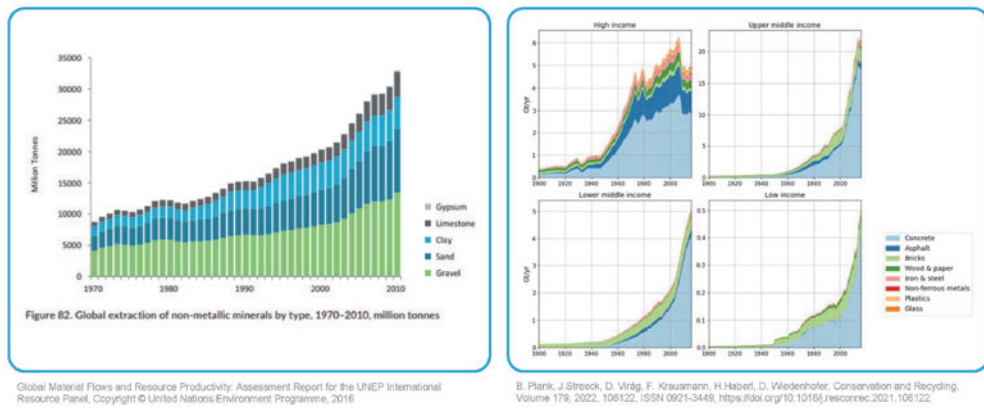


Figure 4

L'évolution de l'extraction des matières premières.

Sources : Global Material Flows and Resource Productivity: Assessment Report for the UNEP International Resource Panel, © United Nations Environment Programme, 2016. B. Plank et al., Resources, Conservation and Recycling 179, 106122 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106122> (CC BY license).

Le verre chez Saint-Gobain



Verre plat
pour la construction et
la mobilité



Laine de verre
pour la construction et
l'isolation technique



**Voiles de verre et
textiles techniques**
pour la construction et les
marchés industriels

Figure 5

Les différents produits de chez Saint-Gobain.

les plus développés ont commencé à extraire plus tôt, cette tendance s'est généralisée à l'échelle mondiale.

Quant aux domaines d'application, la construction n'est

pas toujours la plus visible, mais une grande partie de cette extraction est bel et bien destinée aux matériaux, et en particulier à la production de béton.

1 Les activités de Saint-Gobain dans le verre et l'isolation

Chez Saint-Gobain, le verre se décline principalement sous forme de verre plat, utilisé pour les fenêtres des constructions résidentielles, les façades vitrées, ainsi que pour les vitrages destinés à la mobilité, qu'il s'agisse de transports collectifs ou individuels.

On retrouve également la laine de verre, un isolant largement présent dans les murs et les cloisons intérieures des habitations. Il s'agit de fibres de verre entrelacées, formant une sorte de matelas généralement recouvert d'un parement en papier pour en faciliter la pose. Enfin, l'offre inclut des voiles de verre⁸ et des textiles

8. Voiles de verre : tissus ou renforts en fibres de verre utilisés pour renforcer des matériaux.

techniques, utilisés dans une multitude d'applications industrielles (*Figure 5*).

1.1. Procédés de fabrication

Les usines de Saint-Gobain Glass en France, situées dans le nord, au sud de Lyon et près de Compiègne, accueillent le public pour des visites. Ces sites valent vraiment le détour et laissent une forte impression. Une usine de verre plat (*Figure 6*) s'étend sur plusieurs centaines de mètres et abrite un élément central : le four verrier⁹. Imaginez une piscine olympique contenant 2 000 tonnes de verre en fusion – un spectacle impressionnant. Ce four, cœur du processus

9. Four verrier : four industriel très chaud (environ 1 500 °C) où l'on fait fondre les matières premières pour obtenir du verre liquide.

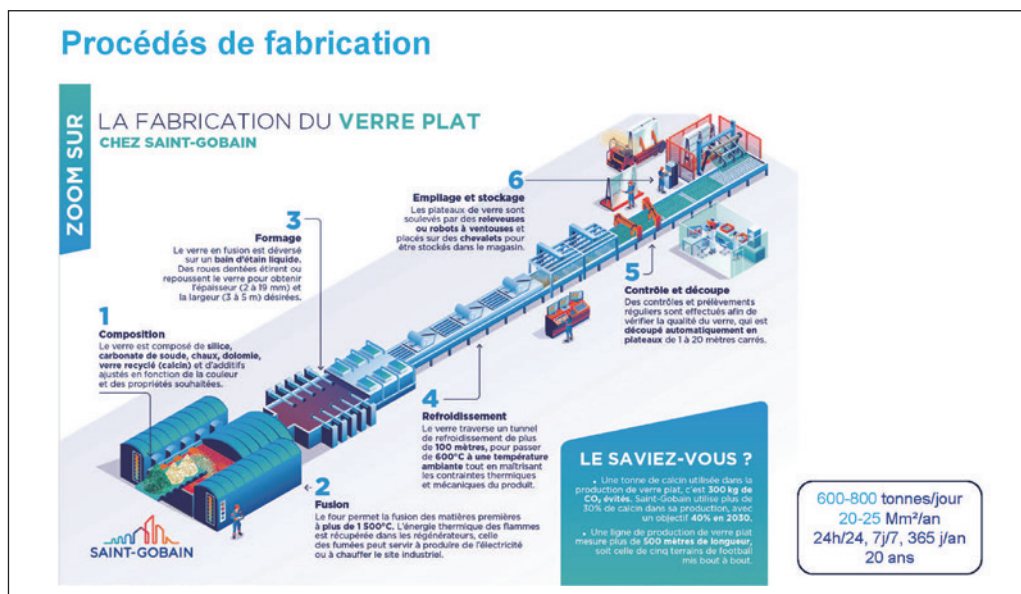


Figure 6

Usine de fabrication de verre plat.

de fusion, est suivi d'un bain d'étain liquide d'une centaine de mètres de long, la méthode la plus efficace pour obtenir du verre parfaitement plat. Le verre entre à 1200 °C et ressort à environ 600 °C. À cette température, il devient possible de le manipuler : il est alors acheminé sur des rouleaux, refroidi progressivement (et recuit¹⁰ pour éliminer les contraintes¹¹ internes), puis découpé en plaques d'environ 20 mètres carrés, prêtes à être utilisées dans l'industrie.

10. Recuire : refroidissement lent et contrôlé du verre pour éliminer les tensions internes et éviter qu'il casse facilement.

11. Contraintes : tensions dans le verre dues au refroidissement rapide ; si on ne les libère pas par recuit, le verre peut casser tout seul.

Dans l'usine, un ruban de verre de plus de 3 mètres de large circule sur 200 mètres de long. Une seule usine produit entre 600 et 800 tonnes de verre par jour, soit environ 25 millions de mètres carrés par an. Une fois en marche, une usine fonctionne sans interruption pendant 20 ans, car il est impossible d'éteindre et de rallumer facilement un four contenant 2 000 tonnes de verre en fusion.

Pour la laine de verre, on retrouve également un four de fusion, de taille plus modeste, mais la partie la plus fascinante à observer dans une usine de laine de verre reste l'étape de fibrage¹² (Figure 7).

12. Fibrage : procédé pour transformer le verre fondu en fines fibres (comme la « barbe à papa ») pour fabriquer la laine de verre.

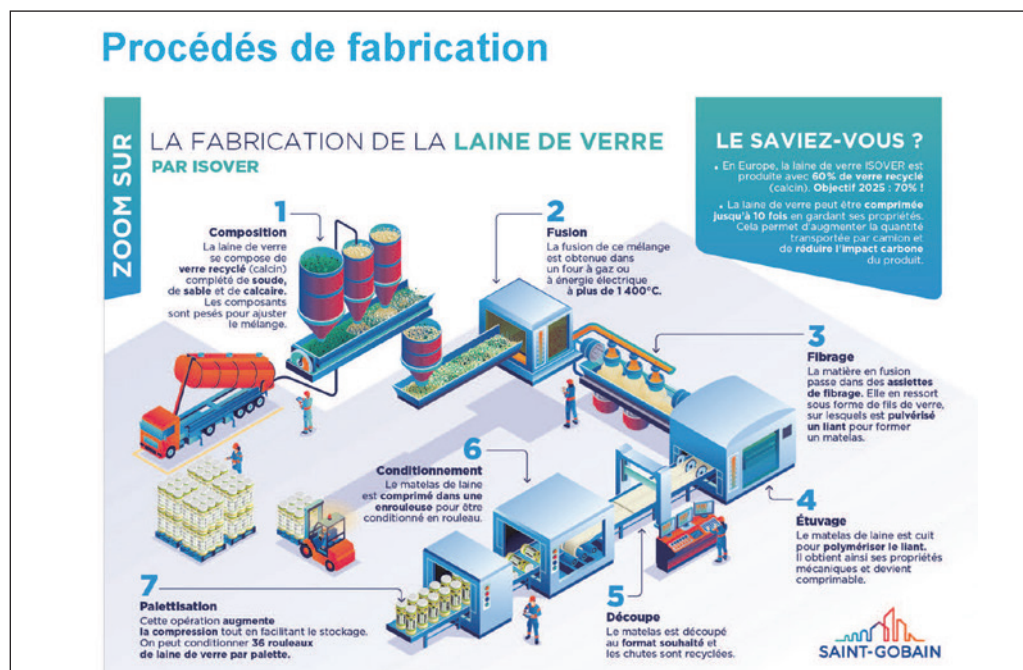


Figure 7.

Usine de fabrication de laine de verre.

Imaginez des machines similaires à celles qui produisent de la barbe à papa, mais au lieu de sucre, c'est du verre porté à plus de 1 000 °C qui en sort pour former ces fibres. Celles-ci tombent ensuite sur un tapis de convoyage, où elles sont légèrement enrobées de matériaux polymères. Ces polymères permettent d'agglomérer les fibres entre elles et de conférer leurs propriétés aux matelas de fibres. Le matelas est finalement découpé pour obtenir les rouleaux de laine de verre que vous connaissez.

Ces deux procédés, qu'il s'agisse du verre plat ou de la laine de verre, partent de matières premières dont la transformation s'accompagne d'émissions de CO₂.

1.2. Composition des matières premières et chimie du verre

Les matières premières utilisées pour fabriquer le verre (**Figure 8**) sont principalement composées de sable, donc de silice¹³, ainsi que d'éléments permettant d'abaisser son

13. Silice : composé principal du verre (SiO₂) issu du sable.

point de fusion et de stabiliser sa composition chimique une fois solidifié. Il s'agit surtout de carbonates de sodium, de calcium et de magnésium¹⁴. Bien sûr, d'autres composants mineurs peuvent être ajoutés selon les besoins, mais la production de verre repose avant tout sur ces matières de base. Les fours, qui doivent atteindre des températures très élevées, fonctionnent actuellement majoritairement au gaz naturel, même si l'électricité prend une part croissante dans leur alimentation.

D'où viennent les émissions de CO₂ quand on fait du verre ?

Les émissions proviennent de deux sources principales :

- L'énergie utilisée : la production repose encore largement sur la combustion de gaz, ou sur de l'électricité qui n'est pas toujours décarbonée.
- Les matières premières : les carbonates utilisés dans la fabrication libèrent du CO₂.

14. Carbonates de sodium, calcium, magnésium : sels (comme le carbonate de calcium = calcaire) ajoutés au sable pour abaisser la température de fusion et stabiliser le verre.

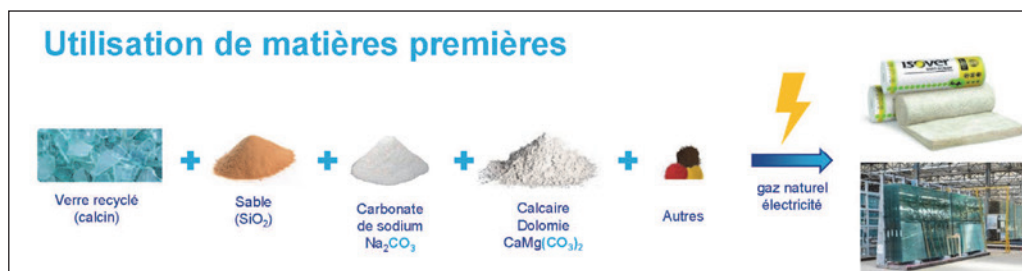


Figure 8

Composés de fabrication du verre.

Par exemple, une plaque de verre standard d'1 m² et de 4 mm d'épaisseur pèse environ 10 kg, et sa production émet à peu près 10 kg de CO₂. Ce chiffre est indicatif et appelé à diminuer grâce aux efforts déployés pour réduire les émissions, mais il donne un bon ordre de grandeur. À retenir : environ la moitié des émissions de CO₂ proviennent de l'énergie utilisée, et l'autre moitié des matières premières.

Comment réduire les émissions liées au procédé de fabrication

Nous développons des procédés de fusion alternatifs utilisant de l'électricité décarbonée. Par exemple, un projet mené en République tchèque, en collaboration avec un concurrent, teste un four fonctionnant à 50 % à l'électricité pour produire du verre destiné au bâtiment. Pour la laine de verre, nous avons également des initiatives avec des fours entièrement électrifiés. Ces programmes, en cours de déploiement, dépendent fortement du contexte énergétique

local et de la disponibilité des sources d'énergie décarbonée.

Pour réduire les émissions liées aux carbonates, la solution la plus rapide et efficace reste le recyclage : réutiliser du verre déjà formé, dont le CO₂ a été émis il y a 20 ou 30 ans lors de son installation dans un bâtiment. C'est pour nous le meilleur levier pour diminuer nos émissions de CO₂ et préserver les ressources naturelles (**Figure 9**).

2 Le recyclage du verre

Le recyclage du verre (**Figure 10**) présente un intérêt majeur, car le verre est 100 % recyclable, sans perte de matière, tout en conservant ses propriétés optiques, ses performances, sa résistance mécanique et sa durabilité.

Recycler signifie donc :

- moins de matières premières carbonées à extraire et à transformer,
- moins d'émissions de CO₂ liées au traitement de ces matières premières,

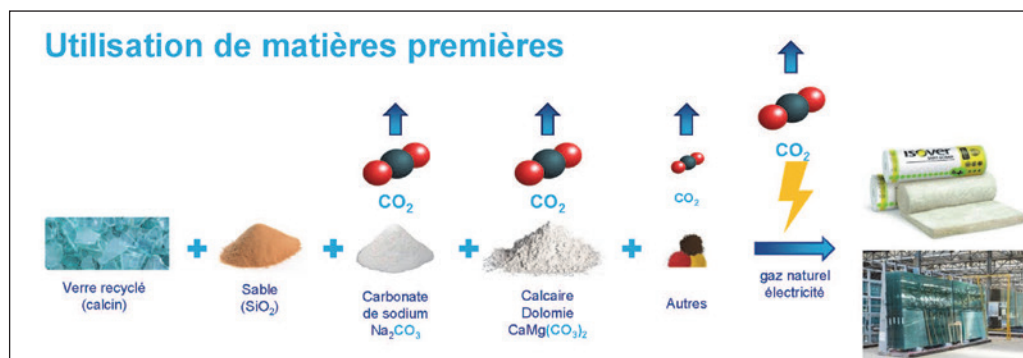


Figure 9

Émissions de CO₂ dû à la production.

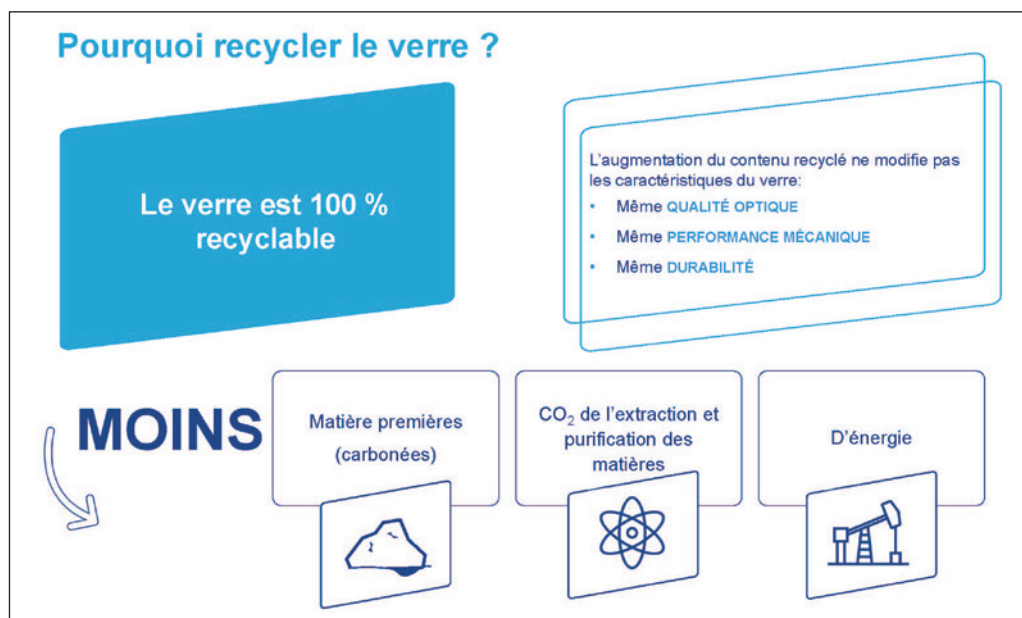


Figure 10

Les raisons du recyclage du verre.

— une économie d'énergie, correspondant à la réduction des émissions évitées grâce à cette boucle de recyclage.

2.1. Les contraintes du recyclage

Cependant, le recyclage dans les fours présente certaines contraintes.

Les filières de recyclage du verre domestique sont assez tolérantes vis-à-vis des impuretés et peuvent accepter diverses sources de verre. Pour l'isolation, en théorie, presque tous les types de verre pourraient être réutilisés, même si la manipulation des grands matelas de laine de verre¹⁵ issus de la déconstruction reste complexe.

En revanche, le recyclage du verre plat provenant des bâtiments est plus délicat : recycler du verre pour produire des panneaux de 18 m² sans défaut, compte tenu de la longueur du processus, n'est pas simple. De plus, il existe des limites concernant les gisements¹⁶ de verre disponibles et exploitables (**Figure 11**).

Le cycle de recyclage

La **figure 12** illustre le cycle de vie du verre, depuis sa production jusqu'à sa déconstruction et son recyclage, en mettant en évidence les flux de retour du verre.

Plusieurs sources de retour existent déjà :

15. Laine de verre : matériau isolant fait de fibres de verre entrelacées, souvent en rouleaux ou panneaux, utilisé dans les murs et toits.

16. Gisement : réserve ou source disponible de matériaux à recycler.



Figure 11

Matrice de recyclage.

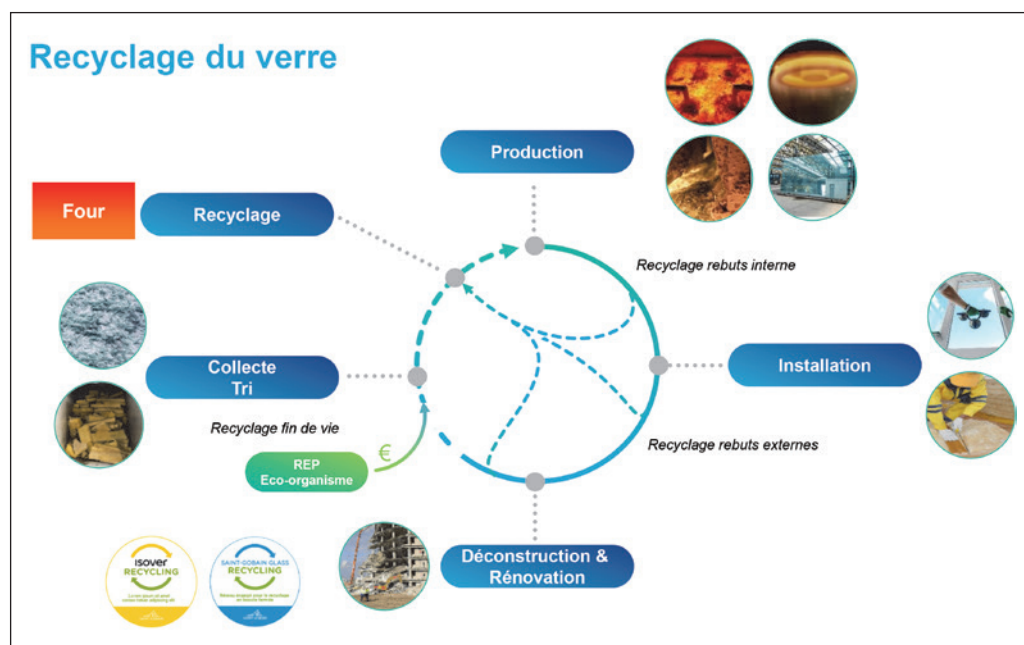


Figure 12

Le cycle du recyclage du verre.

- lors de la production, où des rebuts¹⁷ sont générés en continu. Une partie de ces chutes peut être directement réintroduite dans le four ;
- lors de l'installation ou de la transformation : pour la laine de verre, car le produit est presque finalisé, et pour les produits verriers, car les grands plateaux subissent des manipulations avant de devenir, par exemple, des vitrages isolants pour fenêtres. Ces étapes entraînent des pertes et créent des gisements récupérables.

En prenant en compte l'ensemble du verre fondu (notamment pour le verre destiné au bâtiment), on estime que 10 à 20 % de la quantité produite revient sous forme de rebuts. Cela s'explique aussi par des

pertes géométriques : découper des rectangles ou des carrés dans de grands plateaux génère inévitablement des chutes.

Étapes post-collecte

Pour augmenter les volumes de verre récupérable, le groupe Saint-Gobain déploie des actions et des réseaux de recyclage dédiés à la déconstruction et à la rénovation. Ces initiatives, comme les programmes *Isover Recycling* et *Saint-Gobain Glass Recycling*, sont mises en place partout où cela est possible.

2.2. Enjeux et obstacles au développement du recyclage

Facteurs économiques et logistiques

Les défis du recyclage du verre sont synthétisés dans la **figure 13**. En effet, cette filière n'est pas uniformément développée à travers le monde.

17. Rebuts : déchets ou chutes produits pendant la fabrication ou la transformation.



Figure 13

Les enjeux du recyclage.

Un facteur clé de son développement réside dans les coûts : la valeur du calcin reste modeste (surtout en l'absence d'un marché structuré pour le recyclage), et la balance entre les coûts de transport et ceux de l'enfouissement joue un rôle déterminant.

Présent dans 80 pays, le groupe fait face à des réalités contrastées : pour un propriétaire ou un professionnel de la rénovation, opter entre le recyclage et une démolition rapide – souvent moins onéreuse qu'un démontage soigné – dépend largement du contexte économique local. Il est donc essentiel d'identifier les zones où les initiatives sont les plus pertinentes et efficaces. Par ailleurs, le manque d'infrastructures pour la collecte et le traitement limite encore les possibilités. C'est pourquoi nous développons nos propres réseaux, en partenariat avec des acteurs de

l'économie locale (en France, par exemple), afin de récupérer davantage de vitrages et de laine de verre.

Problème majeur de la contamination

Deux problèmes majeurs se posent :

— d'abord, celui de la contamination : le calcin, en particulier le verre cassé provenant d'un chantier de déconstruction ou d'une benne à ordures, peut contenir toutes sortes de polluants (**Figure 14**). Par exemple, si des restes de canettes en aluminium (comme une canette de soda) se retrouvent dans le verre, l'aluminium, en fondant à haute température réduit la silice pour former de petites billes de Silicium dans le verre. Cela entraîne des casses lors du refroidissement après

Contaminants critiques : origines et conséquences

TYPE DE POLLUTION	ORIGINE TYPIQUE	IMPACT POUR L'INDUSTRIE
Vitrocéramique	Plaque de cuisson, portes de four, inserts de cheminée...	Inclusions dans le verre pouvant entraîner des casses  Infusibles : bouchent les assiettes de fibrage et stoppent la production
Aluminium	Espaceurs de vitrages isolants, cannettes, emballages...	Réduction de la silice, billes de silicium dans le verre, bulles $4 Al + 3 SiO_2 \rightarrow 2 Al_2O_3 + 3 Si$ $4 Al + 6 OH^- \rightarrow 2 Al_2O_3 + 3 H_2$  
Porcelaine, céramiques	Vaisselle, pots de fleurs	Inclusions solides dans le verre 
Organiques	Papier, huile, plastiques	Perturbent les réactions de fusion Surconsommations d'énergie Limitation de la production

Figure 14

Les différents risques de contamination du verre.

le procédé float¹⁸, ce qui réduit fortement le rendement. Le souci, c'est qu'une seule canette dans un four contenant 2000 tonnes de verre en fusion peut causer des dégâts pendant un certain temps, alors que la retrouver dans un tas de verre pilé relève presque de l'impossible ;

- ensuite, il y a le comportement des consommateurs : est-ce que ces derniers – qu'il s'agisse de particuliers comme vous et moi ou d'investisseurs dans la construction – trouvent un intérêt à acheter un produit plus bas carbone ?

La vitrocéramique¹⁹, utilisée dans les plaques de cuisson, les portes de four, les inserts de cheminées ou encore les portes anti-feu, n'est pas non plus facile à trier parmi les déchets. De plus, ses composants ne fondent pas correctement et peuvent provoquer des casses dans le processus de fabrication.

C'est encore plus problématique pour la laine de verre issue de l'isolation. Comme nous l'avons vu précédemment, sa fabrication ressemble à celle d'une barbe à papa de verre : une sorte d'assiette percée de petits trous à travers lesquels on extrude le verre liquide. Les déchets, en endommageant ces assiettes de fibrage (coûteuses), obligent

à interrompre la production pour les remplacer. Sans compter les polluants organiques, qui peuvent perturber les réactions de fusion et générer des problèmes d'odeurs.

Stratégies pour gérer les risques

Notre stratégie pour limiter les risques consiste à nous impliquer activement dans la récupération des matériaux sur les chantiers. Nous aidons à séparer les différents matériaux et à les conserver dans des conditions optimales pour éviter toute contamination, afin de privilégier un recyclage en boucle fermée²⁰ (*Figure 15*) : le verre plat est recyclé en verre plat, et l'isolation en isolation. L'objectif ? Permettre à tous les acteurs de décarboner leur activité.

Il est aussi essentiel d'investir dans des outils de tri plus performants. Par exemple, dans notre usine de verre plat à Emerchicourt, dans le nord de la France, nous avons installé une ligne de tri du calcin. Concrètement, il s'agit de tapis roulants, de détecteurs, d'aimants et de courants de Foucault²¹ pour éliminer un maximum d'impuretés (*Figure 16*). Ces équipements représentent un coût, tant à l'investissement qu'en exploitation, car le traitement de grandes quantités de verre

18. Procédé *float* (flotter) : technique où le verre fondu est versé sur un bain d'étain liquide pour obtenir une surface parfaitement plate et lisse.

19. Vitrocéramique : matériau proche du verre mais cristallisé, très résistant à la chaleur.

20. Boucle fermée : recyclage où le matériau recyclé (ex. verre plat) est réutilisé pour fabriquer le même type de produit.

21. Courants de Foucault : technique utilisant des champs magnétiques pour séparer les métaux non ferreux (comme l'aluminium) lors du tri.

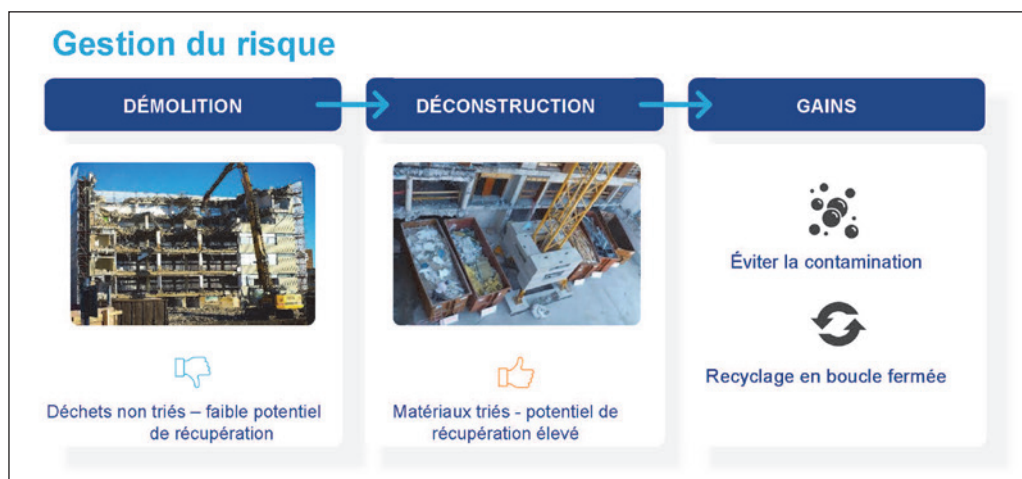


Figure 15

Le processus de gestion du risque.



Figure 16

Projet de tri de Saint-Gobain.

entraîne inévitablement des pertes pour garantir la qualité. En France, le secteur des matériaux de construction bénéficie désormais d'un système de responsabilité élargie du producteur (**Figure 17**), qui inclut les consommateurs via

une éco-contribution. Celle-ci finance la déconstruction et la gestion des déchets. C'est un levier puissant pour avancer, et l'Europe encourage tous les États membres à adopter ce type de dispositif – ce qui peut prendre un certain temps.

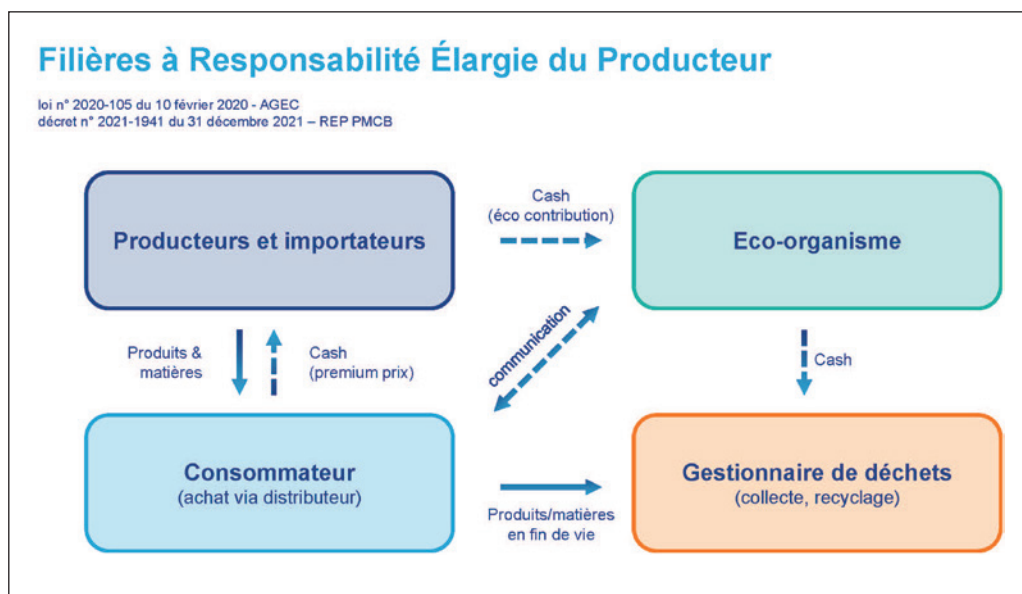


Figure 17

La filière de responsabilité élargie du producteur [loi n° 2020-105 du 10 février 2020 – AGEC, décret n° 2021-1941 du 31 décembre 2021 – REP PMCB].

Conclusion

Saint-Gobain a été le premier à commercialiser un verre bas carbone à haute teneur en recyclé : notre verre ORAÉ. Grâce à lui, nous avons réduit de 42 % l'empreinte carbone par rapport à notre verre clair standard, en intégrant 64 % de contenu recyclé dans sa composition.

Ce verre est produit principalement en Europe, mais aussi en Inde et au Brésil. Dès l'année de son lancement, nous avons démontré qu'il était possible de fabriquer du verre avec 100 % de calcin issu du recyclage à l'entrée du four, et ce pendant 4 jours et demi dans notre usine du nord de la France. L'objectif était de prouver la faisabilité technique, même si cette performance n'est pas réalisable en continu, faute de stocks suffisants de verre à recycler (**Figures 18 et 19**).

Dans le secteur du verre bâtiment, en 2024, nous avons pu recycler 30 000 tonnes de verre en fin de vie, issues de la déconstruction en Europe. Ces volumes proviennent principalement de la France, du Royaume-Uni, ainsi que,



Figure 18

Futurs projets de Saint-Gobain : le verre ORAÉ.

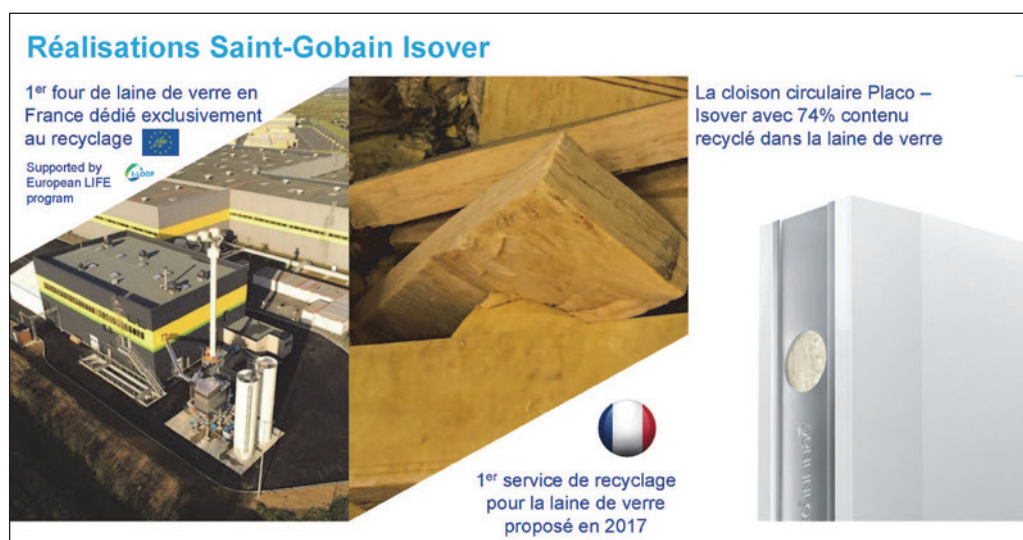


Figure 19

Futurs projets de Saint-Gobain : la laine Isover.

dans une moindre mesure, de l'Allemagne et de l'Espagne. Notre ambition est de renforcer notre engagement dans ce type d'initiatives pour intégrer toujours plus de verre recyclé dans nos productions, tout en acquérant de l'expérience sur le tri, la collecte et l'utilisation de ce verre recyclé.

Côté isolation, à Chemillé-en-Anjou, Saint-Gobain a inauguré son premier four dédié exclusivement au recyclage de panneaux de laine de verre, associé en France à un service de recyclage. Aujourd'hui, nous commercialisons des plaques contenant 74 % de laine de verre recyclé.

Le bois, matériau de construction durable

Benjamin Touraine (Figure 1), ingénieur de l'École Polytechnique, est responsable des projets amonts chez Mathis Construction Bois. Il a été, entre autres, acteur du projet de la Tour Bois de 50 mètres dans le 13^e arrondissement de Paris ainsi que du bâtiment Palazzo Méridia un immeuble en bois de 12 étages situé à Nice.

1 Brève introduction

Le bois n'a rien d'une innovation dans le domaine de la construction. Prenez l'exemple de l'entreprise « Mathis » (Figure 2) : elle existe depuis 200 ans. Depuis deux siècles, on transforme le bois, on l'usine et on l'utilise pour ériger des bâtiments. Il est vrai que la place du bois dans la construction a connu une évolution majeure ces dix dernières années, à partir de 2015 environ, et ce pour une raison déjà mentionnée : il s'agit de l'un des principaux

leviers pour décarboner le secteur du bâtiment. Ainsi, le bois est perçu comme un matériau



Figure 1

Présentation du conférencier.



Figure 2

Vue du centre culturel Tjibaou à Nouméa ; réalisation emblématique de l'entreprise MATHIS.

durable sous cet angle. Mais, au fond, que signifie vraiment le terme « durable » appliqué à un matériau ?

2 De la nécessité d'un matériau durable : analyse des cycles de vie et des ressources

La **figure 3** illustre la notion de durée de vie d'un matériau à travers son analyse de cycle de vie. Le processus commence par une ressource naturelle, transformée en produit, puis utilisée sur un chantier. Une fois la vie du bâtiment terminée, ce matériau pourra être réemployé, traité, mis en décharge, valorisé ou recyclé.

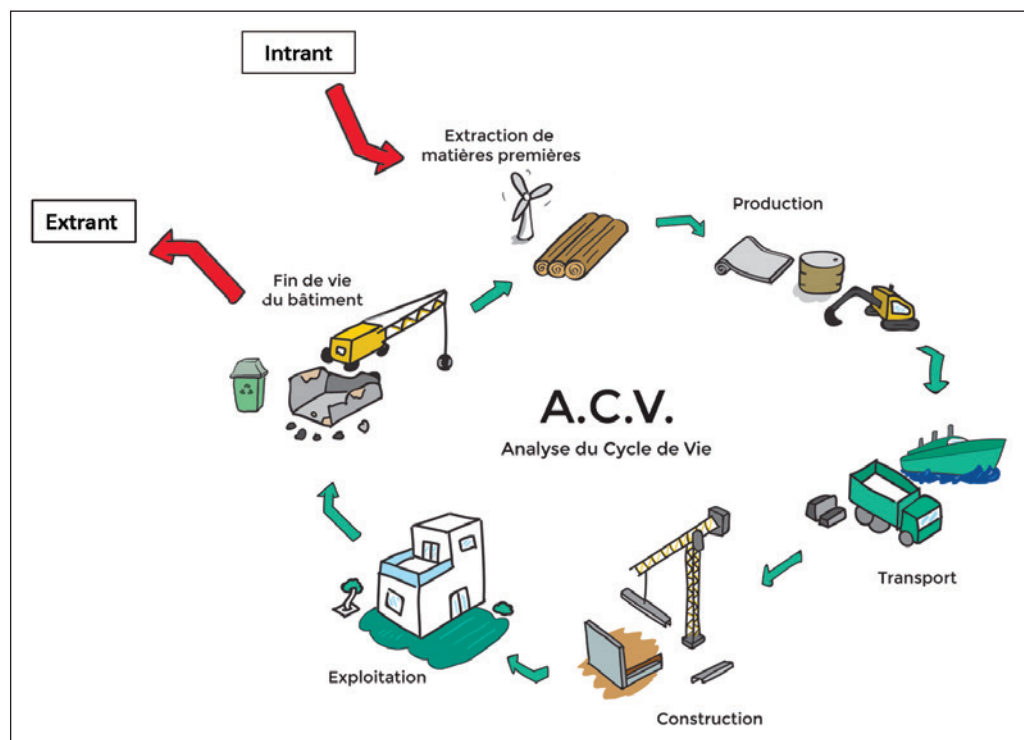


Figure 3

Durabilité et cycle d'un matériau.

Bien entendu, ce concept de durée de vie ne s'applique pas uniquement au bois, mais aussi à d'autres matériaux comme l'acier, l'aluminium, le verre, etc.

Un matériau peut être considéré comme durable si cette boucle d'utilisation peut être répétée un grand nombre de fois. Trois conditions sont alors nécessaires : premièrement, la ressource naturelle de base ne doit pas s'épuiser ; deuxièmement en fin de vie, la détérioration du matériau ne doit pas générer une accumulation de déchets ; enfin, il est essentiel que ces opérations au cours de la fabrication ne causent ni dommages au climat ni à l'environnement.

Le bois répond parfaitement à ces critères. Les forêts, loin de disparaître, ont même tendance à s'étendre, et les arbres restent disponibles pour être récoltés et transformés. Des industriels comme *Mathis* interviennent ensuite

pour produire, à partir de ce bois, les matériaux finis indispensables à la construction. Le transport et la mise en œuvre de ces matériaux respectent des critères de faible consommation d'énergie, ce qui confère au bois une valorisation environnementale optimale.

Examinons de plus près la ressource essentielle de tout le processus de construction en bois : la forêt. Comme l'illustre la *figure 4*, les trois critères évoqués précédemment sont clairement satisfaits. Le point de départ, c'est la forêt, dont on a constaté qu'elle tend plutôt à s'étendre : la ressource est donc pérenne.

Le cycle commence par la récolte du bois, suivie de son sciage. Vient ensuite l'étape clé du savoir-faire de *Mathis*, qui consiste à transformer ces planches en matériaux finis ou semi-finis, prêts à être intégrés dans les bâtiments. Puis, le transport et la

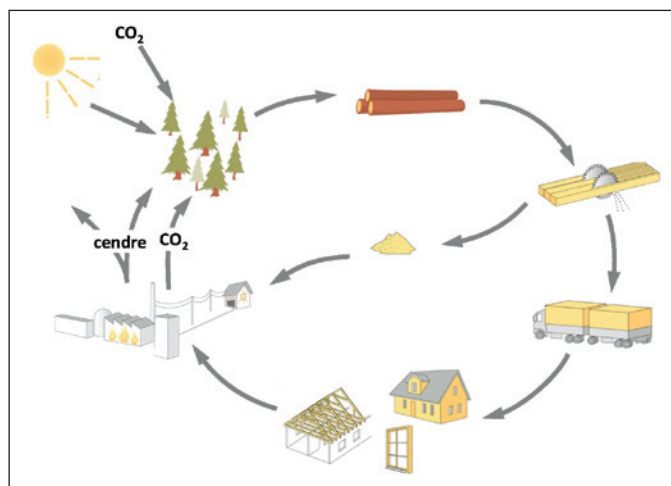


Figure 4

Cycle de vie du bois.

construction, peu énergivores et faiblement émetteurs de carbone, prennent le relais. Durant cette phase, certains sous-produits sont même réutilisés pour alimenter en énergie le processus de fabrication. Enfin, en fin de cycle, le bois est, au minimum, valorisé sur le plan énergétique.

Quelques données sur la forêt française : elle couvre une superficie importante, représentant environ 30 % du territoire national (*Figure 5*). Cette couverture forestière, illustrée par les nombreux points verts répartis de manière homogène sur la carte, est en constante expansion. En effet, sa surface a presque doublé depuis un siècle.

Par ailleurs, la forêt française présente un équilibre en

termes d'essences, avec une dizaine d'espèces dominantes réparties selon les spécificités climatiques, montagneuses, de plaines ou océaniques du territoire. Parmi ces essences, deux sont principalement exploitées pour la construction : le Douglas et l'épicéa, le pin étant utilisé de manière plus marginale.

La distinction entre une forêt laissée à l'état naturel et une forêt gérée pour la production de bois est illustrée par la *figure 6*.

Sur le plan du carbone, la forêt constitue un écosystème neutre. Pendant leur croissance, les arbres captent du CO₂ par photosynthèse, puis le restituent intégralement lors de leur décomposition : c'est un système équilibré, qui agit

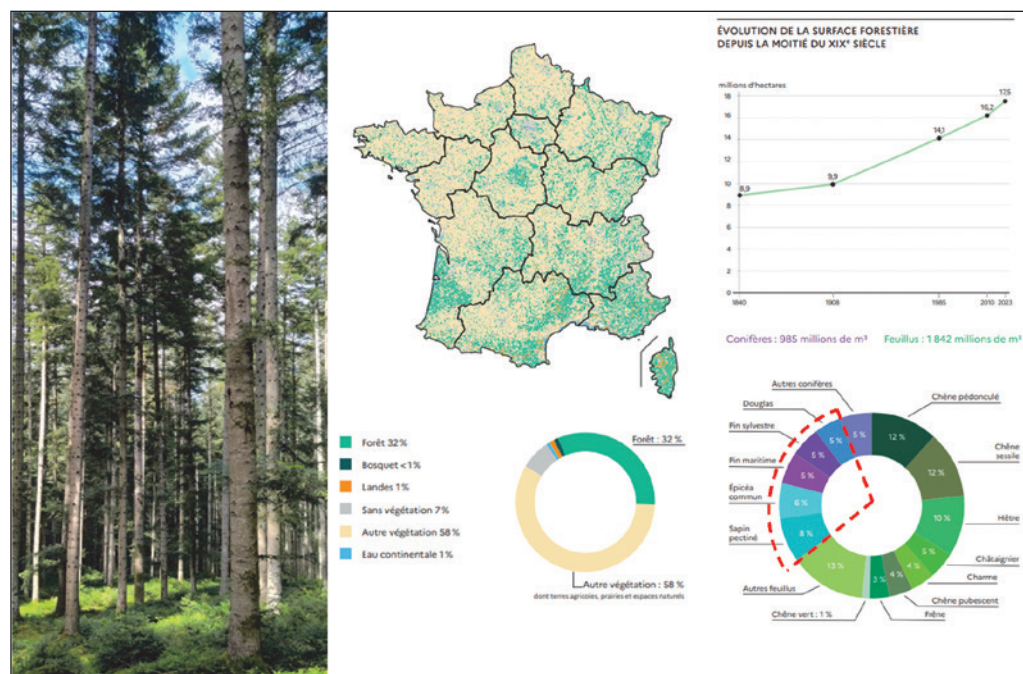


Figure 5

La ressource bois en France. Source : Inventaire national de la forêt 2024 – IGN.

comme un puits de carbone. L'ensemble des arbres sur pied représente un stock de carbone, comparable à celui du charbon ou du pétrole enfouies sous terre. L'enjeu est de préserver ce stock pour éviter de libérer le carbone qu'il contient.

Lorsqu'une forêt est exploitée de manière durable, chaque arbre coupé est immédiatement remplacé par un nouveau. À l'échelle des forêts gérées, ce puits de carbone est ainsi maintenu et devient, en quelque sorte, « permanent ». On peut même dire que ce puits est « déplacé » vers les bâtiments et les matériaux de construction.

Pour donner une idée de l'ampleur de ce puits de carbone à l'échelle nationale, il équivaut à

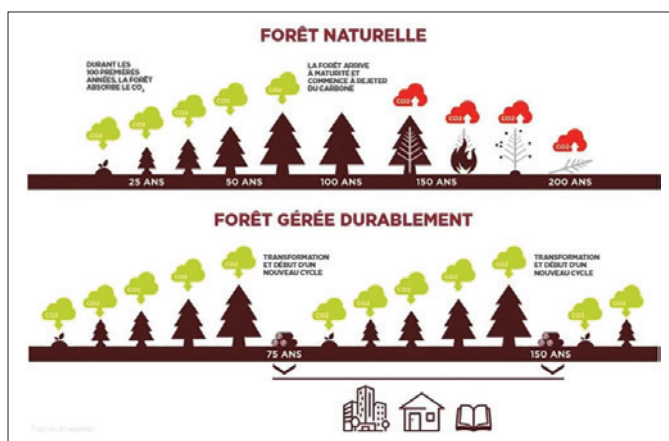


Figure 6

Le cycle carbone de la forêt.

environ 2,8 milliards de tonnes de carbone (Figure 7), soit près de quatre fois les émissions annuelles de la France.



LE PUIT CARBONE DE LA FORÊT FRANÇAISE :

- 170 MILLIONS D'HECTARES DE FORÊTS
- 80 MILLIONS DE TONNES DE CO₂ ABSORBÉ PAR AN
- 2800 MILLIONS DE TONNES DE CO₂ STOCKÉ
- ≈ +40 MILLIONS DE TONNES DE CO₂ /AN

LES ÉMISSIONS CARBONE DE LA FRANCE :

- 644 MILLIONS DE TONNES EQCO₂

12%
x4,3

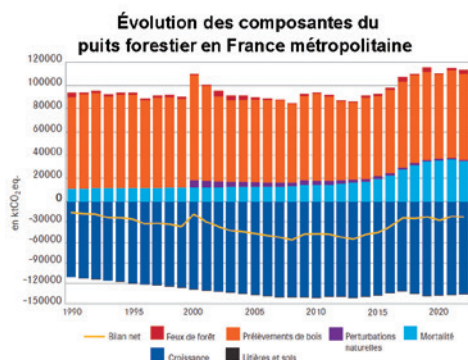


Figure 7

La forêt, un puits de carbone. Source : Les notes du conseil d'analyse économique, n° 86, septembre 2025.

Pour illustrer concrètement cette réalité, imaginons qu'aujourd'hui, la forêt française soit entièrement rasée, que ce soit pour urbaniser ou développer l'agriculture : cela libérerait instantanément l'équivalent de quatre fois les émissions annuelles de carbone du pays. C'est une problématique que l'on observe déjà en Amérique du Sud ou en Asie avec la déforestation.

En France, la situation est différente, mais légèrement préoccupante : la croissance du stock de carbone forestier ralentit chaque année, en raison de l'augmentation de la mortalité des arbres, elle-même liée au changement climatique. À terme, il existe un risque que la capacité de la forêt à absorber le carbone diminue progressivement,

voire s'inverse dans les années à venir. Ce phénomène ne serait pas imputable à l'exploitation du bois pour la construction, mais bien aux évolutions des températures et des conditions climatiques.

3 La transformation du bois

3.1. Première transformation du bois : le sciage

Le bois prélevé en forêt pour la construction subit deux étapes de transformation majeures : le sciage, puis la fabrication de produits finis.

Les scieries (*Figure 8*) récupèrent les grumes et les transforment en produits semi-finis, en les découpant en planches de différentes

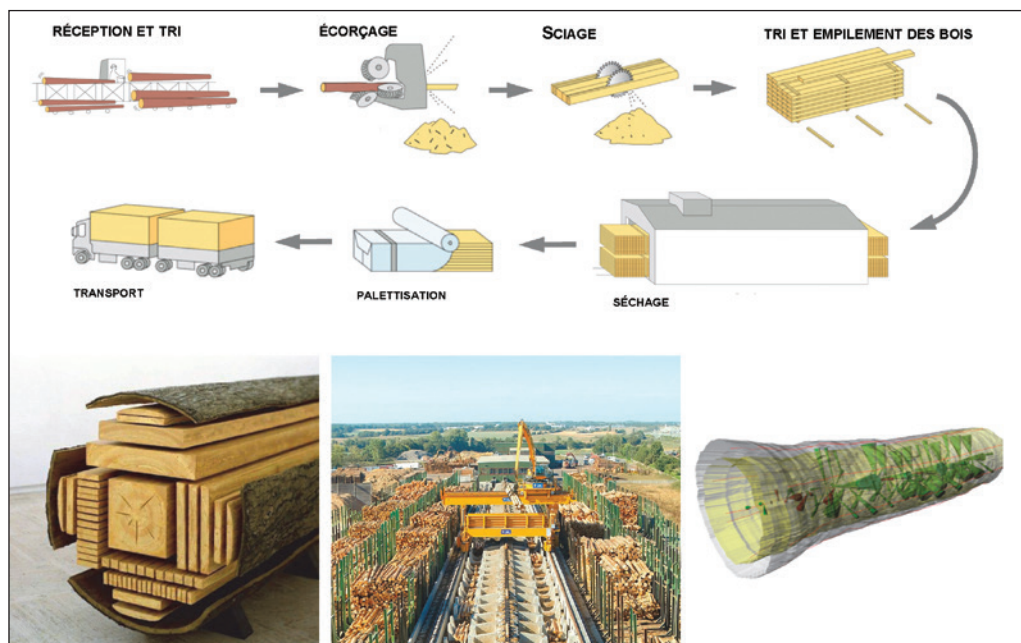


Figure 8

Le bois, transformé une première fois par le sciage.

épaisseurs. Cette opération, loin d'être simple, consiste à optimiser la découpe d'une forme circulaire pour obtenir des éléments rectangulaires – un véritable défi géométrique. L'objectif des industriels est clair : minimiser les chutes et maximiser le rendement utile de chaque grume. Grâce aux technologies numériques, chaque grume est scannée en 3D avant d'être travaillée. Ce scan permet de visualiser sa forme, son rayon et ses défauts (comme les nœuds ou les branches intégrées au tronc, marqués en vert sur la figure en bas à droite), afin de déterminer si ces imperfections sont acceptables ou non.

Une fois analysées, les grumes sont découpées avec précision pour obtenir des planches de qualité optimale. Les lamelles de bois destinées à la construction proviennent principalement de la périphérie de la grume. Elles mesurent généralement entre 40 et 45 mm

d'épaisseur, 80 à 210 mm de largeur, et atteignent jusqu'à 6 mètres de longueur. Les parties non utilisées pour la construction ne sont pas perdues : elles servent à fabriquer du plaquage, du bardage ou encore des emballages.

3.2. Deuxième transformation du bois : produits semi-finis

Entre la grume découpée en planches et son intégration dans un bâtiment, *Mathis* intervient pour transformer cette matière première qu'est la lamelle de bois en un produit semi-fini (**Figure 9**).

Mis à part les noyaux structuraux (points d'ancrage du bâtiment) et les fondations, qui restent généralement en béton, tous les autres éléments d'une construction peuvent être réalisés en bois : poteaux, planchers, façades porteuses, mais aussi façades

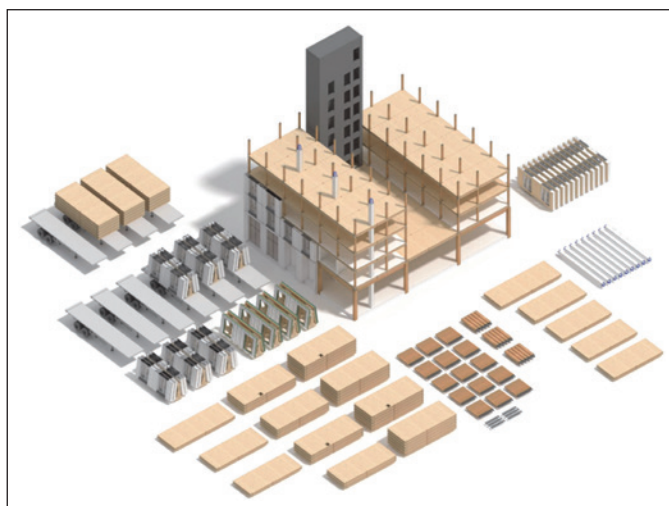


Figure 9

Le bois, transformé une deuxième fois.

non porteuses, comme les enveloppes extérieures.

Pour y parvenir, les lamelles de bois subissent une transformation industrielle. *Mathis* produit trois grandes catégories de produits semi-finis (**Figure 10**) : les ossatures bois, les panneaux de CLT et les éléments en bois lamellé-collé. L'entreprise emploie 150 personnes dans son usine dédiée à la fabrication de ces produits,

afin d'alimenter les chantiers qu'elle gère.

3.3. Conception et utilisations d'ossatures en bois

Les éléments d'ossature bois (**Figure 11**) se distinguent par leur conception et leur fabrication relativement simples. Ils prennent la forme de caissons formée de lamelles de bois assemblées selon les dimensions du bâtiment, ou du pas d'étage et sont déjà équipés des ouvertures pour les fenêtres. Ces structures sont remplies d'isolants variés – paille, laine de bois, laine de roche, etc. – et recouvertes, presque systématiquement, d'un panneau en bois pour assurer la rigidité. On y ajoute aussi un pare-pluie à l'extérieur et un pare-vapeur à l'intérieur.

Aujourd'hui, on utilise également des bardages bois¹ ou d'autres types de revêtements directement sortis d'usine, ce qui permet de maximiser la préfabrication hors chantier.

La **figure 12** illustre différentes vues de chantier. Elle montre d'abord une version « low tech »² (ou *basique*), où seule la structure de base est préfabriquée et posée sur place, l'isolant étant ajouté ensuite. Cette méthode tend à disparaître au profit des versions plus évoluées, présentées en partie basse de la figure : des panneaux de façade complets, intégrant pare-pluie et pare-vapeur, prêts à être installés. Il ne reste alors qu'à ajouter, si nécessaire, un doublage

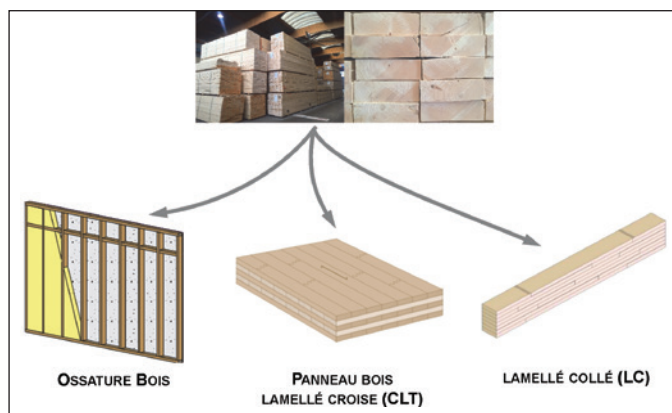


Figure 10

Le bois, deuxième transformation plus raffinée en produits semi-finis.

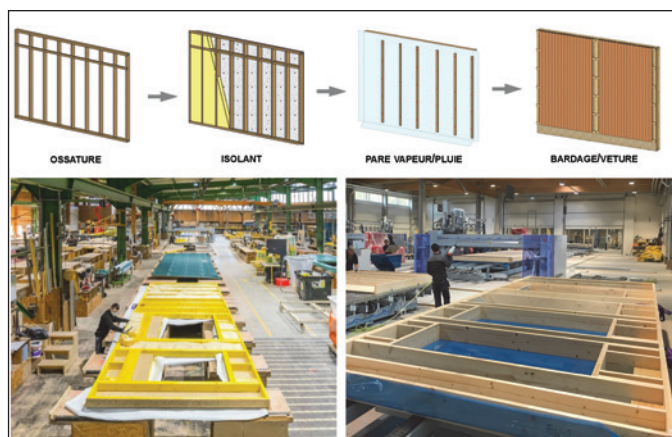


Figure 11

Fabrication d'ossatures en usine.

1. Recouvrir les murs extérieurs d'un bâtiment avec des lames de bois.

2. Basse technologie.



Figure 12

Quelques exemples d'ossatures en chantier.

d'isolant et des finitions en plâtre ou autres matériaux.

Avec ces éléments d'ossature bois, on réalise également des façades de grandes dimensions (Figure 13). L'exemple présenté est celui d'un campus universitaire à Saint-Germain-en-Laye, où ont été conçus des « mégaMOB » – des éléments de façade couvrant trois étages, mesurant jusqu'à 13 mètres de haut sur 2,50 mètres de large, et intégrant menuiseries et épines. Ces modules, fabriqués dans un atelier près de Paris à partir des composants de notre usine, sont assemblés par nos équipes et posés sur site avec une efficacité remarquable : une grande ossature est installée en une heure seulement. Résultat, en une journée, la façade du bâtiment peut

avancer de près de 30 mètres, grâce à l'adaptabilité de ce système d'ossature.

3.4. Conception et utilisations du CLT ou lamellé croisé

Le deuxième produit largement utilisé dans la construction bois est le CLT, ou bois lamellé-croisé (Figure 14). Ces panneaux sont composés de planches collées les unes sur les autres, chaque couche étant orientée à 90 degrés par rapport à la précédente. Leur principal atout réside dans leur grande rigidité et leur stabilité dimensionnelle : ils se déforment très peu, même en cas de variations d'hygrométrie³.

3. Science qui a pour objet la mesure de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air humide.



Figure 14

Conception du CLT : lamellé croisé.

La **figure 15** présente des exemples d'utilisation du CLT. Ces panneaux peuvent servir de planchers, de façades, ou être intégrés derrière des complexes d'isolation ou de revêtement. On les retrouve également en cloisonnement intérieur, qu'il soit porteur ou non.

Ces techniques permettent de réaliser aussi bien des logements que des bureaux. La **figure 16** montre des exemples récents de logements construits par *Mathis*. À Rueil, par exemple, un immeuble de logements ne laisse aucunement deviner, depuis l'extérieur, sa structure en bois : il faut pénétrer à l'intérieur pour en découvrir les façades en bois. Un autre projet, l'Îlot-Bois à Strasbourg – un bâtiment de

10 étages –, illustre la possibilité de construire en hauteur avec ce système. Là encore, une fois le bois revêtu, l'aspect extérieur du bâtiment est identique à celui des constructions classiques.

La **figure 17** présente deux autres réalisations de logements, comme ceux d'Issy-les-Moulineaux ou encore le projet *Universeine*, situé près de Paris.

3.5. Une autre technique de transformation du bois : le lamellé-collé

Le dernier type de matériau bois utilisé est le lamellé-collé (**Figure 18**). Contrairement au CLT, ces éléments sont linéaires. On part toujours de lamelles de bois, que l'on



Figure 15

Utilisation du CLT.



Figure 16

Exemples de logement réalisés par Mathis.



Figure 17

Autres exemples de bâtiments.

raboute – c'est-à-dire que l'on assemble en créant des entures à leurs extrémités pour les coller bout à bout. Des lames de six mètres de long sont ainsi assemblées pour atteindre jusqu'à quarante mètres. Ces planches, d'une épaisseur de 45 mm, passent sous un rideau de colle avant d'être pressées pour former des poutres de grandes dimensions. Elles peuvent ensuite être collées latéralement pour obtenir des éléments très larges, ou encore collés sur des bancs courbes pour obtenir de pièces cintrées et permettent de réaliser des formes variées et complexes.

Les images de l'usine présentées (Figure 19) montrent, en haut, les lamelles de bois raboutées. Dans cet exemple,

une lame de 35 mètres de long résulte de l'assemblage de sections de six mètres dans un banc de collage. Ces lamelles sont ensuite regroupées verticalement, encollées puis placées sous presse pendant environ six heures. La colle durcit pendant la nuit, et le lendemain, les poutres sont soigneusement nettoyées puis rabotées pour obtenir une surface lisse et prête à l'emploi.

En fin de processus, des opérations de finition sont réalisées en usine : les extrémités et les parties intermédiaires des poutres sont taillées pour permettre des assemblages précis. Des robots de taille, entièrement informatisés, sont utilisés pour ces usinages. L'usine en compte cinq ou six, adaptés aux différentes tailles

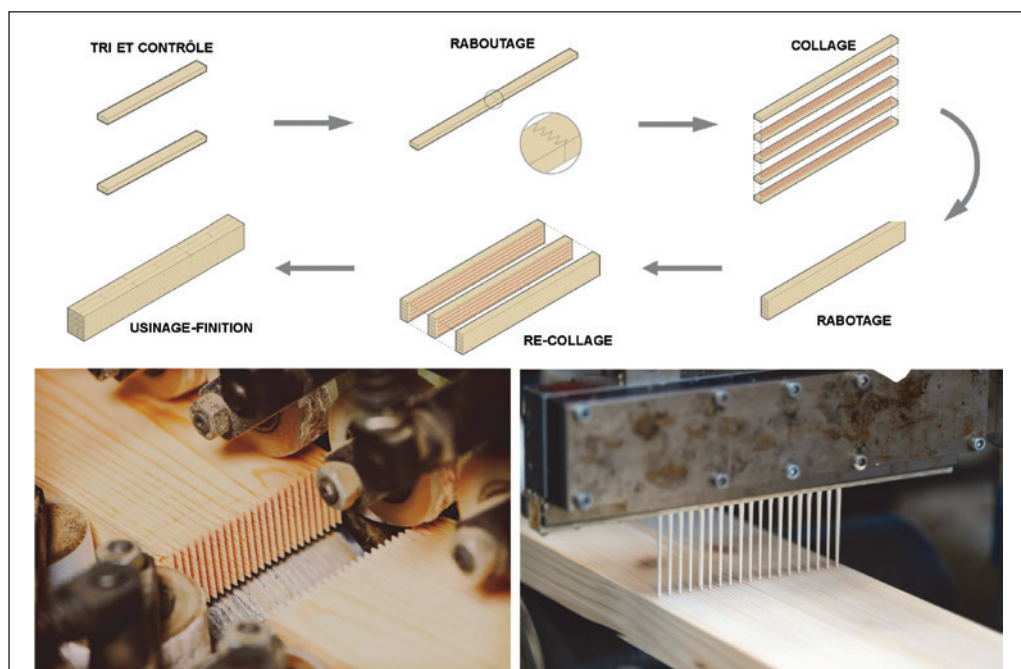


Figure 18

Un autre produit semi-fini : le lamellé-collé.



Figure 19

Vues en usine du processus de fabrication du lamellé-collé.

et formes des pièces à produire. Ces machines réalisent des entailles ([Figure 20](#)) ou des perçages pour y insérer des organes d'assemblage, facilitant ainsi la connexion entre les poutres.

Le lamellé-collé est destiné à la construction de bâtiments. Vous avez pu voir des poteaux et des poutres sur les différentes photos : ces éléments s'utilisent aussi bien dans l'habitat que pour des ouvrages de grande envergure, comme les grandes portées ou les toitures, des domaines où le bois excelle depuis longtemps, bien avant 2015 et la volonté de décarboner le secteur. Dans ces applications, le lamellé-collé rivalise avantageusement avec le métal.

Mathis s'est distinguée par la réalisation d'ouvrages emblématiques, comme ceux illustrés par la [figure 21](#). Parmi les exemples connus du grand public figurent le Grand Palais éphémère sur le Champ-de-Mars, avec ses arches offrant une portée de près de 45 mètres, ou encore la piscine des Jeux Olympiques de Paris 2024, construite face au Stade de France, dont les imposantes poutres en bois – appelées catènes – mesurent 50 centimètres de hauteur et s'étendent sur 90 mètres de longueur.

Mais les applications du lamellé-collé ne se limitent pas à ces projets : il permet aussi de créer des poutres aux formes arrondies et élaborées ([Figure 22](#)), comme celles de la



Figure 20

Vues en usine des machines permettant l'usinage et le recollage des poutres entre elles.



Figure 21

Exemples de bâtiments réalisés par Mathis, avec la technique du lamellé-collé.



Figure 22

Autres exemples, avec des poutres de forme arrondie.

gare de Lorient, ou des structures à très grandes portées, telles que les hangars de l'aéroport de Bâle-Mulhouse, capables d'abriter des avions de ligne.

4 La fin de vie du bois : le réemploi et le recyclage

La dernière étape du cycle de vie d'un bâtiment concerne la gestion du bois en fin d'usage. Plusieurs scénarios sont

possibles, mais deux sont à privilégier : le réemploi et le recyclage (**Figure 23**).

Le réemploi reste complexe, car il nécessite une adéquation parfaite entre la ressource disponible et un projet adapté. Par exemple, réutiliser une charpente implique de trouver un projet compatible avec les dimensions, les hauteurs et les résistances des éléments en bois, ce qui n'est pas toujours évident. Les conditions doivent être réunies pour que cette solution soit viable.

Le recyclage, quant à lui, est encore au stade de la recherche, mais des avancées existent : des études montrent qu'il est possible de fabriquer du lamellé-collé à partir de planches récupérées sur des chantiers, avec des performances équivalentes à celles du bois neuf. Cependant, cette solution n'est pas encore déployée à l'échelle industrielle.

En pratique, la fin de vie des éléments en bois passe surtout par la valorisation énergétique : le bois est alors utilisé pour produire de l'électricité ou de la chaleur.

En conclusion... le monde durable est en marche ! (**Figure 24**)

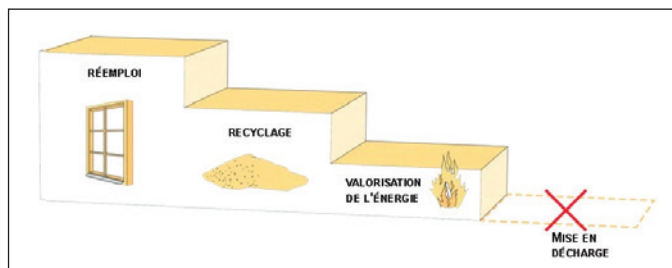


Figure 23

Fin de vie du bois : réemploi, recyclage et valorisation.



Figure 24

Mathis : construire un monde durable.

Partie 3

Innovation et habitat

Les vitrages intelligents

D'après la conférence de Michele Schiavoni, Directeur du département Couches Minces – Saint-Gobain Research Paris.

Introduction

Commençons par une brève présentation du centre de recherche de Saint-Gobain à Paris. Comme vous pouvez le constater sur la **figure 1**, y figurent les données clés

concernant le nombre d'employés, notre capacité d'innovation ainsi que nos collaborations académiques. Ce centre se distingue par un niveau scientifique d'excellence et une qualité exceptionnelle des échanges humains.

D'après la conférence de Michele Schiavoni, par Danièle Olivier



Figure 1

Présentation de l'entreprise et de ses qualités.



Figure 2

Le verre n'est pas aussi simple que vous pouvez l'imaginer.

1 Le verre, un composé omniprésent dans le bâtiment

Dans son chapitre, François Guillemot explique la fabrication du verre ainsi que les stratégies pour le décarboner. Sachez que, chaque fois que vous observez du verre dans un bâtiment neuf, comme celui illustré sur la **figure 2**, celui-ci intègre systématiquement des propriétés supplémentaires, obtenues grâce à des dépôts de couches minces. Ces traitements permettent

notamment d'optimiser les performances énergétiques du bâtiment. Nous allons en examiner quelques exemples.

1.1. La conception du verre : le dépôt des couches minces

Le procédé employé pour déposer ces couches est la pulvérisation cathodique sous vide, illustrée sur la **figure 3**. Le verre défile sous une cible composée du matériau à déposer, le tout dans une enceinte sous vide. On y injecte de l'argon¹, puis on génère une décharge électrique. Cette décharge arrache des atomes de la cible, qui sont ensuite projetés sur le verre et s'y déposent avec une précision extrême, littéralement atome par atome.

Cette technique permet de construire des couches d'une épaisseur de l'ordre du nanomètre (soit un milliardième de mètre), en empilant des plans atomiques un à un.

La mise en œuvre industrielle de ce procédé est présentée sur la **figure 4**, où l'on distingue

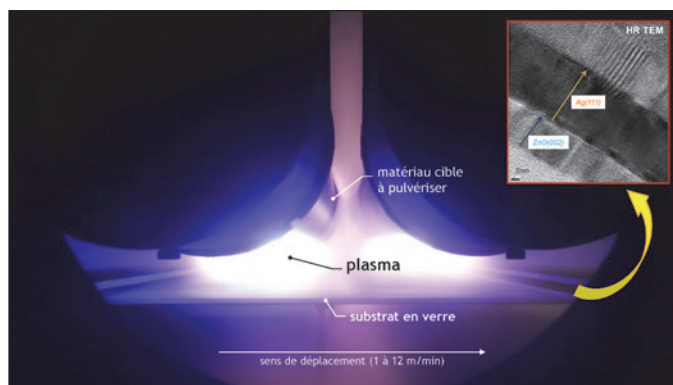


Figure 3

Procédé de dépôt des couches minces : pulvérisation cathodique sous vide.

1. Gaz inerte.

les différentes chambres de dépôt. À droite de cette figure, on retrouve également la quantité et la nature des matériaux constituant les couches superposées, afin d'obtenir des propriétés spécifiques. L'ensemble du processus est réalisé sur des plateaux de 20 mètres carrés, ce qui signifie que l'on manipule des plaques de verre de très grande taille. Pourtant, les couches déposées, bien que très fines, sont d'une épaisseur totale parfaitement maîtrisée : inférieure à 1/1000 de millimètre, car toute variation entraînerait des défauts.

Les enjeux techniques à maîtriser sont multiples : l'homogénéité des dépôts, la vitesse de dépôt, le rendement du procédé, et la stabilité des couches.

Le plus grand type de plateau utilisé dans ce processus est celui présenté sur la **figure 5**. D'une longueur de 18 mètres, il est exceptionnel et permet de produire des plaques de verre de très grande surface, avec des dépôts de couches minces d'une uniformité remarquable. Pour illustrer la précision requise, la **figure 6** montre une comparaison frappante : contrôler l'épaisseur de ces dépôts revient à ajuster l'uniformité d'une pelouse de 5 cm d'épaisseur à ± 1 mm, et ce sur une surface équivalente à celle de l'Europe. Voici le défi technologique que nous relevons et maîtrisons industriellement au quotidien.

1.2. À quoi servent les dépôts de couches minces sur le verre

Notre discussion portera principalement sur l'optimi-



Figure 4

Chambres de dépôt industriel de couches minces : jusqu'à 30 à 40 couches déposées, chambre par chambre.



Figure 5

Les dépôts sont réalisés industriellement sur de grande surface de verre.

sation des performances énergétiques des bâtiments. Cependant, ces technologies de dépôts de couches minces trouvent aussi des applications variées pour créer ou améliorer d'autres fonctionnalités ; par exemple : des verres autonettoyants ou des vitrages optimisés pour les réfrigérateurs de supermarchés, améliorant ainsi leur efficacité énergétique.

Les dépôts sur vitrages jouent également un rôle clé dans l'industrie automobile, en réduisant notamment la consommation de climatisation grâce à une limitation des apports solaires dans l'habitacle.



Figure 6

L'uniformité des dépôts sur le verre est équivalente au contrôle à ± 1 mm d'une couche de gazon de 5 cm d'épaisseur sur toute la surface de l'Europe.

Comme illustré sur la **figure 7**, les applications sont multiples et variées. Toutefois, je me concentrerai ici sur les solutions dédiées au secteur du bâtiment.

Revêtement de verre pour l'isolation thermique et le confort

Dans ce domaine, on distingue deux grandes familles de produits (**Figure 8**), conçues pour répondre à deux enjeux majeurs.

1. L'isolation thermique des bâtiments : l'objectif est de réduire les déperditions énergétiques en hiver, afin de limiter les besoins en chauffage. Ce type de produit correspond à une première gamme de solutions.
2. Le contrôle solaire : cette fonction prend une importance croissante, notamment pour des bâtiments comme celui présenté à droite sur

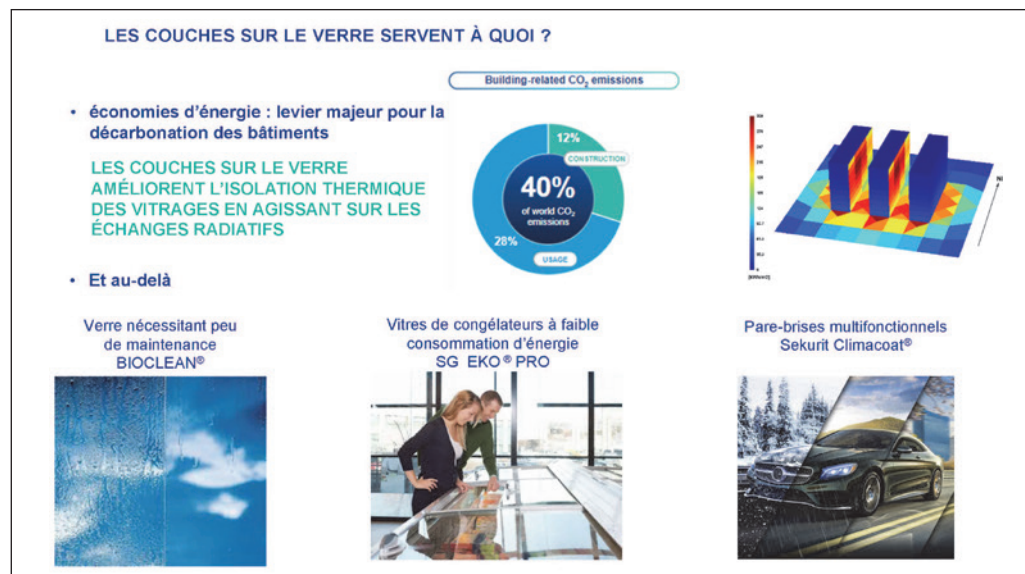


Figure 7

Applications des couches minces sur les verres.



Figure 8

Le revêtement des vitres, une grande efficacité énergétique et un confort amélioré.

la **figure 8** (la tour Saint-Gobain), où les surfaces vitrées sont très étendues. Le rayonnement solaire pénètre alors massivement à l'intérieur, ce qui peut entraîner : des surchauffes, un inconfort thermique, et une surconsommation de climatisation en été. Pour améliorer le confort estival, on utilise des couches spécifiques qui permettent de limiter la surchauffe du bâtiment en bloquant une partie du rayonnement solaire.

Nature des revêtements pour le confort et l'isolation

Les couches déposées doivent agir sur trois types de rayonnements (**Figure 9**) :

- le rayonnement thermique : il correspond au rayonnement du corps noir, situé dans la plage des 10 à 20 microns. Ce rayonnement

représente la chaleur intérieure du bâtiment en hiver, qu'il est essentiel de conserver pour limiter les pertes énergétiques ;

- le rayonnement solaire, qui se divise en deux composantes :
 - la partie visible, que l'on souhaite laisser pénétrer dans le bâtiment,
 - et la partie infrarouge, qu'il est préférable de bloquer en été pour éviter les surchauffes.

Il est important de noter que la partie invisible du spectre solaire (c'est-à-dire l'infrarouge) représente 50 % de son énergie totale, soit environ 500 watts par mètre carré sur les 1 000 watts/m² reçus. Si cette énergie pénètre dans un bâtiment, comme une tour à Dubaï, elle devra être évacuée par la climatisation, ce qui entraîne une

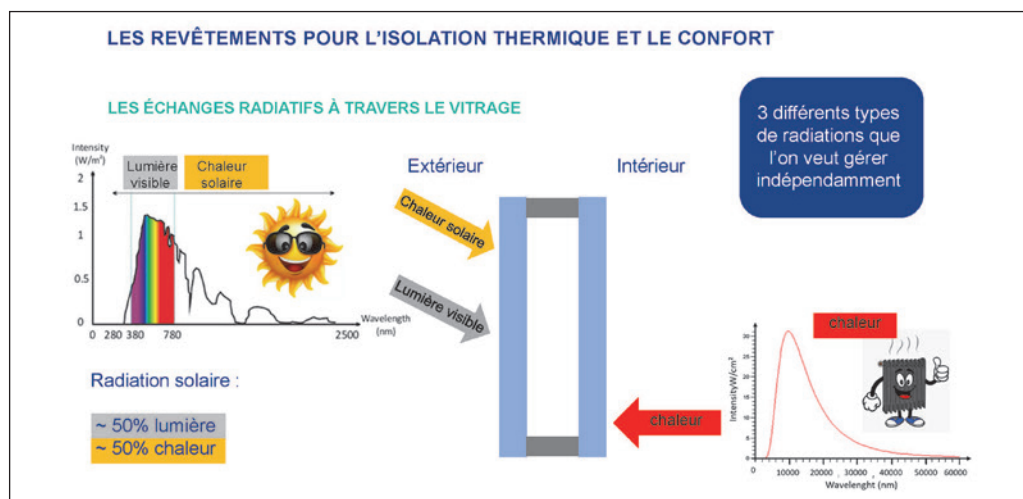


Figure 9

Le revêtement : un atout pour l'isolation thermique et le confort.

consommation énergétique accrue. En limitant cette pénétration, on peut donc améliorer significativement les performances énergétiques du bâtiment.

Performance des vitrages : un enjeu environnemental

La **figure 10** présente l'évolution des performances

thermiques des vitrages. Pour simplifier, focalisez-vous sur les valeurs numériques plutôt que sur les unités.

En remplaçant un vitrage ancien (avec un coefficient de déperdition thermique de 5,5), un double vitrage standard (sans traitement spécifique) permet de ramener ce coefficient à

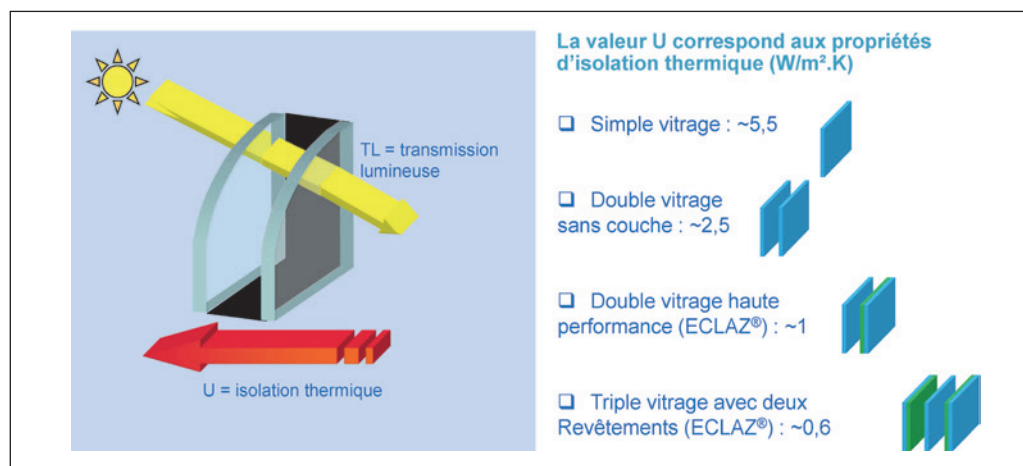


Figure 10

Les performances des vitrages.

2,5. Grâce à l'ajout de couches minces, ce coefficient peut être abaissé jusqu'à 1. Dans les régions aux hivers rigoureux, comme les pays nordiques ou certaines zones d'Allemagne, on utilise des triples vitrages, qui permettent d'atteindre un coefficient de 0,6. À titre de comparaison, un mur bien isolé affiche généralement un coefficient de 0,2 à 0,3. Ainsi, un triple vitrage offre une performance thermique comparable à celle d'un mur correctement isolé.

À l'échelle industrielle, ces performances prennent une dimension colossale. Saint-Gobain produit plusieurs dizaines de millions de mètres carrés de vitrages à couches chaque année. Les économies d'énergie générées, lorsqu'on les extrapole à cette échelle, se mesurent en équivalents de centrales nucléaires. Ainsi, chaque amélioration, même de l'ordre de 1 %, représente une réduction significative de

la consommation énergétique, équivalente à plusieurs pourcents de la production d'une centrale nucléaire.

Notre objectif principal est donc de concevoir des produits toujours plus performants. En améliorant continuellement l'efficacité des vitrages, nous contribuons directement à : réduire la consommation énergétique des bâtiments, diminuer les factures d'énergie, limiter les émissions de CO₂, et, in fine, à répondre aux enjeux environnementaux et économiques actuels.

Pour le contrôle solaire (**Figure 11**), l'objectif est d'optimiser la réponse spectrale du vitrage : laisser traverser la lumière visible, bloquer les infrarouges du spectre solaire,

2. Pulvérisation cathodique magnétron : méthode hautement contrôlée pour déposer des couches ultra-minces de matériau sur une surface.

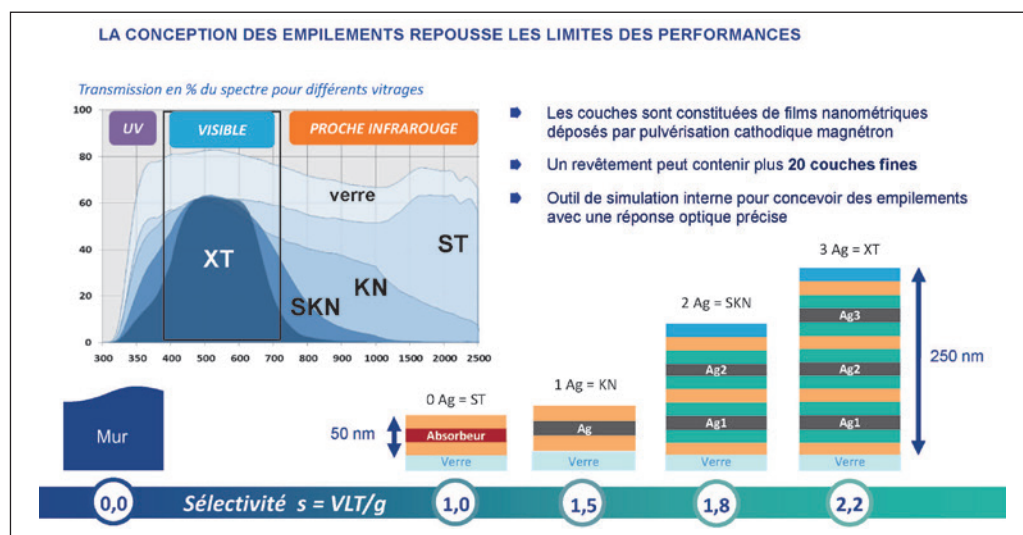


Figure 11

Le contrôle solaire : conception des empilements².

en particulier pour des applications spécifiques. Pour y parvenir, il est nécessaire de concevoir des revêtements composés d'empilements de couches complexes, afin d'obtenir une réponse optique optimale.

Comme le montre la **figure 11**, la courbe associée au produit « XT » illustre cette performance : seule la lumière visible est transmise, tous les autres rayonnements (notamment les infrarouges) sont réfléchis et ne pénètrent pas dans le bâtiment. Ainsi, ce produit évite toute surchauffe, ce qui en fait une solution parfaitement adaptée aux besoins en contrôle solaire.

Esthétique : un facteur à ne pas négliger

Bien entendu, l'esthétique des vitrages est un critère essentiel (**Figure 12**). Les utilisateurs recherchent des verres

neutres et discrets, presque invisibles. Cette exigence esthétique doit donc être intégrée dès la phase de développement de ces produits.

Pour répondre à cette attente, nous utilisons des outils de simulation numérique avancés (**Figure 13**). Ces outils, basés sur des mesures physiques réelles, permettent de modéliser le rendu visuel des vitrages dans un bâtiment donné, selon différentes conditions d'éclairage. Ainsi, un projet peut être optimisé non seulement sur le plan technique, mais aussi sur le plan esthétique.

2 Les vitrages actifs, moduler le verre selon ses envies

Les vitrages actifs (**Figure 14**) représentent un autre type de produit haut de gamme déjà fabriqué aujourd'hui. Grâce à

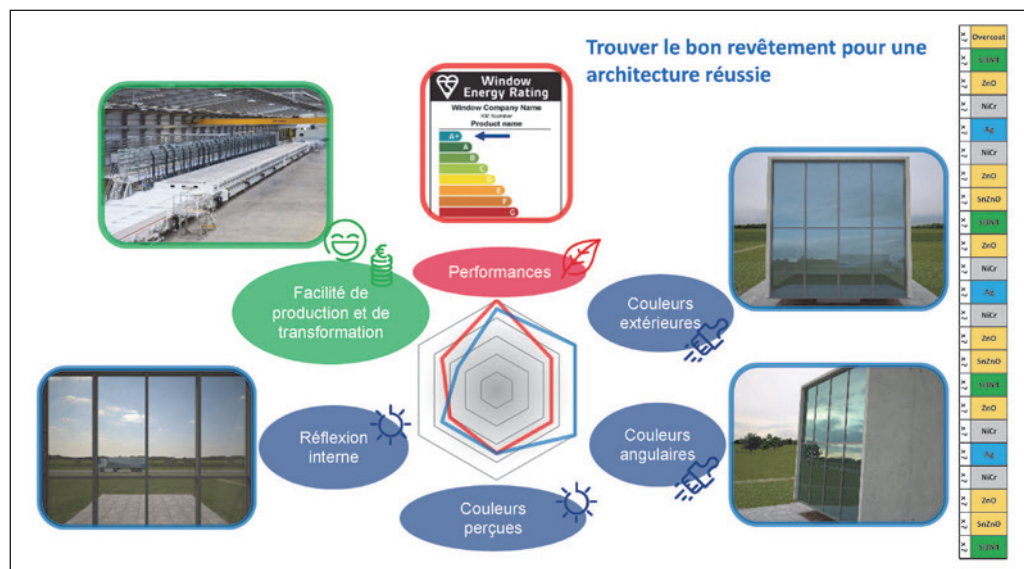


Figure 12

La conception des couches doit répondre aux besoins esthétiques des clients.

NUMÉRIQUES DE BÂTIMENTS DANS DIFFÉRENTES CONDITIONS D'ÉCLAIRAGE



Figure 13

Simulation numérique.

une stimulation électrique, ils permettent de s'adapter aux besoins spécifiques de l'utilisateur.

2.1. Le vitrage électrochrome

La **figure 15** illustre les quatre niveaux de clarté de ce vitrage. Celui-ci peut varier d'un niveau de clarté d'environ 60 % – un niveau couramment utilisé dans les bâtiments non résidentiels, comme les bureaux – à une clarté de seulement 1 % (soit une transmission lumineuse de 1 %), comparable à celle des lunettes de soleil conçues pour la haute montagne.

Cette modulation de la transmission lumineuse influence non seulement le confort des utilisateurs, mais aussi la consommation énergétique du bâtiment. De plus, ce vitrage présente l'avantage majeur de nécessiter très peu d'énergie pour passer d'un état à l'autre. Ce produit complexe, illustré en **figure 16**, est constitué de



Figure 14

Vitrage actif.

deux verres feuilletés intégrés dans une cavité. Son fonctionnement repose sur un principe simple : les deux couches ont la capacité de se teinter dès que des ions lithium transitent de l'une à l'autre.

Ce système fonctionne globalement comme une batterie (**Figure 17**) : en appliquant une tension, les ions lithium migrent d'une couche à l'autre. Selon leur position entre la contre-électrode et l'électrode de travail, le vitrage devient

VITRAGES CAPABLES DE MODIFIER LEUR TEINTE GRÂCE À UNE STIMULATION ÉLECTRIQUE



Figure 15

Vitrages électrochromes.

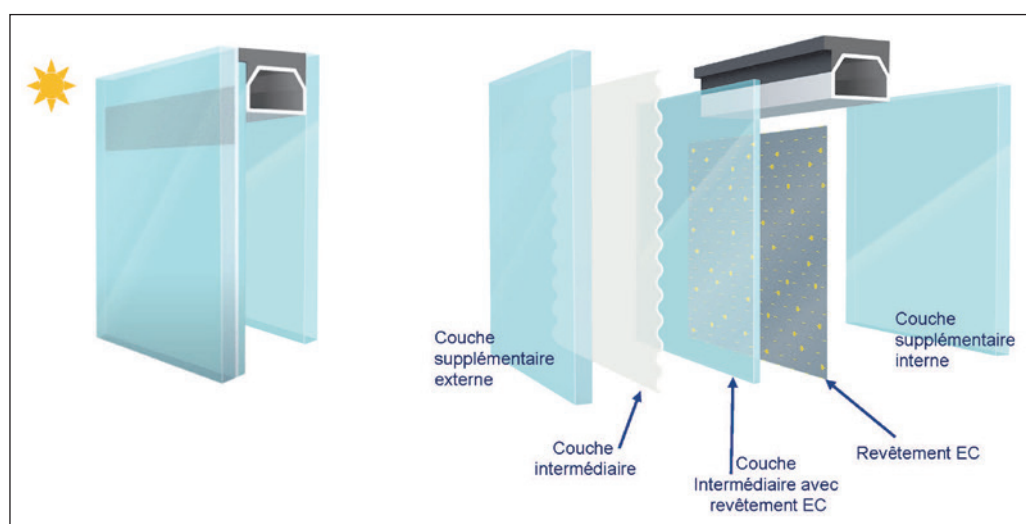


Figure 16

Principe du vitrage électrochrome (EC : Electrochromique).

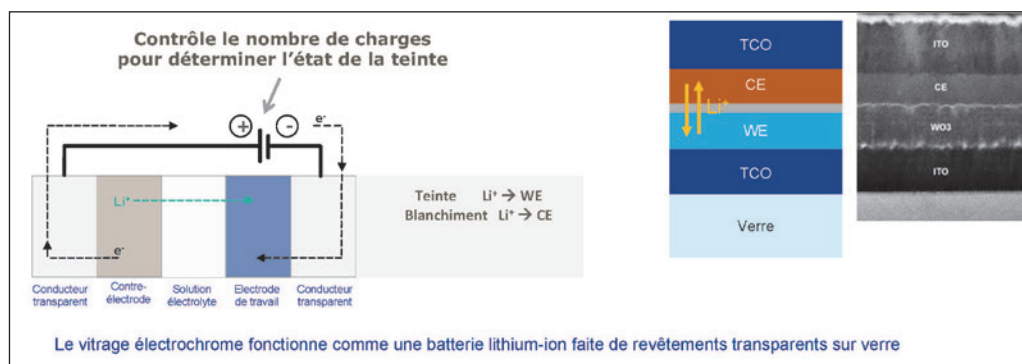


Figure 17

Fonctionnement des vitrages électrochromes.

plus ou moins sombre. Il est également possible de stabiliser des états intermédiaires de clarté, permettant ainsi d'obtenir des niveaux de transparence variés.

Ces produits, du fait de leur complexité technique, engendrent des coûts de fabrication élevés. L'un des axes de nos recherches vise précisément à réduire ces coûts pour favoriser une meilleure pénétration sur le marché. Aujourd'hui, ces vitrages sont principalement réservés à des projets architecturaux emblématiques, mais notre objectif est d'en faire des produits plus accessibles.

2.2. Vitrages actifs à cristaux liquides permettant de passer d'un état transparent à un état diffusant

Le dernier exemple de vitrage actif est le vitrage à cristaux liquides, principalement utilisé en intérieur. Cependant, nous envisageons d'étendre ce concept aux vitrages de façade (Figure 18). Le principe repose sur la capacité du vitrage à

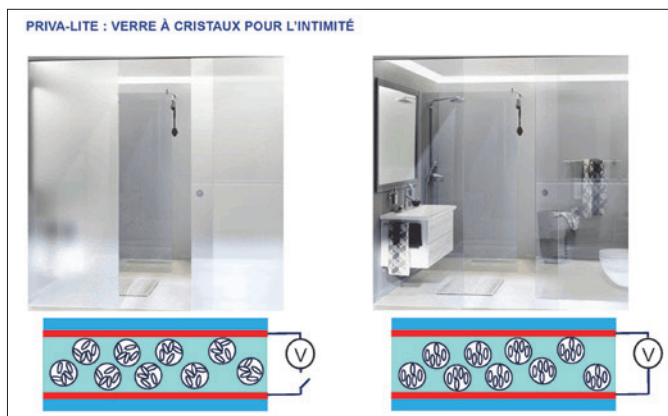


Figure 18

Cristaux liquides.

passer d'un état transparent à un état diffusant.

Pour cela, une couche spécifique contient des gouttelettes, elles-mêmes composées de cristaux liquides. Sous l'effet d'une tension électrique, ces cristaux s'alignent, rendant le vitrage clair. À l'inverse, en l'absence de tension, l'agitation thermique désoriente les cristaux, ce qui confère au vitrage un aspect diffusant.

Ce type de vitrage est déjà utilisé en intérieur, comme dans

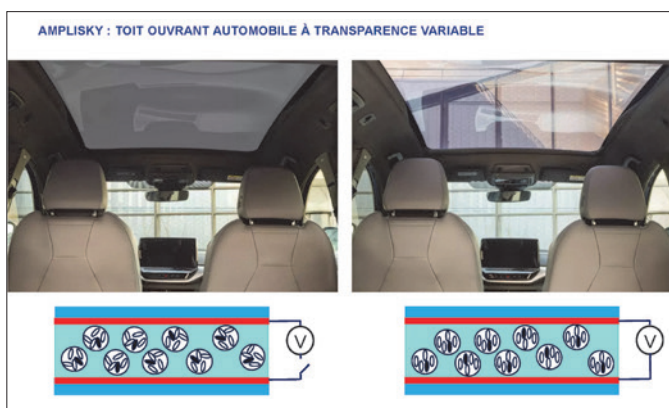


Figure 19

Application automobile.

l'exemple de la salle de bain illustré à la **figure 18**.

Ce même type de produit est également utilisé dans des applications automobiles (**Figure 19**), où l'ajout de colorants permet soit de conserver une visibilité à travers le toit, soit de l'assombrir pour le

rendre opaque. Ces produits, déjà industrialisés, sont une réalité sur le marché.

Pour des applications dans le bâtiment, il est essentiel de trouver des compromis optimaux en termes de coût, de performance et d'impact sur le bâtiment.

Conclusion : l'impact des vitrages sur les îlots de chaleur urbaine

L'une des questions majeures à l'échelle urbaine est celle des îlots de chaleur (**Figure 20**), un phénomène sur lequel nous avons travaillé. En effet, les vitrages agissent en partie comme des miroirs : ils peuvent renvoyer vers le sol une fraction du rayonnement indésirable, protégeant ainsi le bâtiment, mais contribuant en contrepartie à réchauffer la ville – un effet lié à l'albédo³.

Il serait donc idéal de concevoir des vitrages capables de renvoyer le rayonnement superflu directement vers le ciel, évitant ainsi de

3. Pouvoir réfléchissant d'une ????????????????????

surchauffer à la fois le bâtiment et son environnement urbain.

Nous explorons actuellement des concepts de ce type, tout en préservant la fonction de transparence essentielle des vitrages. Ces solutions, bien que complexes, illustrent les vitrages intelligents sur lesquels nous travaillons chez Saint-Gobain.

4. Chaleur anthropique : provenant des activités humaines.



Figure 20

Réduire les îlots de chaleur urbains.

L'impression 3D béton : un catalyseur pour l'innovation constructive

Romain Mesnil est ingénieur de l'École des Ponts ParisTech et diplômé du MIT. Il est maître de conférences à l'École Nationale des Ponts et Chaussées ou il dirige une équipe de recherche technologique sur la construction numérique et robotisée.

Introduction : présentation de l'impression 3D béton

Bien que l'impression 3D béton soit souvent présentée comme une technologie émergente, des recherches sont menées dans ce domaine depuis près de vingt ans, et un marché concret existe aujourd'hui pour cette application. L'objectif de ce chapitre n'est pas de vous persuader que tous nos bâtiments seront imprimés en béton dans les dix ou vingt prochaines années, mais plutôt d'explorer comment

développer des systèmes constructifs plus performants.

Nous travaillons activement sur cette thématique à l'École Nationale des Ponts et Chaussées. Cette école d'ingénieurs a d'ailleurs largement contribué aux innovations dans les matériaux de construction, notamment avec Vicat¹, lui-

1. Ingénieur des Ponts et Chaussées cité pour ses contributions majeures aux innovations dans les matériaux de construction. Il est historiquement reconnu pour l'invention du ciment artificiel.

même ingénieur des Ponts et Chaussées, ainsi qu'à l'innovation constructive, comme en témoignent les travaux de Freyssinet², grand concepteur d'ouvrages en béton armé et précontraint.

1 Le béton, le coupable idéal de la construction

Le béton, souvent perçu comme un matériau controversé en raison de sa contribution à 7 à 8 % des émissions de gaz à effet de serre, reste pourtant indispensable. Il incarne en quelque sorte le parfait coupable dès qu'il est question de l'impact environnemental du secteur de la

2. Grand ingénieur concepteur d'ouvrages, pionnier du béton armé et inventeur du béton précontraint. Le texte mentionne son travail sur le pont Boutiron (1913) où il a réussi à alléger considérablement les structures.

construction. Chaque année, près de treize milliards de mètres cubes en sont consommés dans le monde³ – soit, sans que nous n'en ayons forcément conscience, environ deux à trois mètres cubes par personne (Tkachenko, et al., 2023). Pourtant, ce matériau reste difficilement remplaçable pour les fonctions qu'il assure : stabilisation de sol, étanchéité, et structure. À ce jour, et à cette échelle, aucun substitut ne permet de se passer entièrement du clinker⁴ et du ciment.

Cette omniprésence du matériau tient de la simplicité de sa composition, schématisée en **figure 1**, ainsi que de la grande disponibilité à bas coût de ses constituants.

Au cœur de la chimie des bétons, on retrouve un liant hydraulique⁵ qui durcit progressivement au contact de l'eau. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un broyat de clinker obtenu en chauffant un mélange d'argile et de calcaire. La décarbonatation du calcaire



Figure 1

La composition et les constituants du béton : de gauche à droite et de haut en bas : granulats (photo : William Warby), ciment (photo : Denslenovo), eau, sable (photo : Thamizhpparithi Maari)

3. Le chiffre n'est pas mesuré directement, on l'a ici reconstruit à partir des données de production mondiale de ciment (environ 4,2 milliards de tonnes de ciment par an en 2021) et avec une teneur entre 300 et 350 kg de ciment par mètre cube de béton.

4. Constituant du ciment produit par calcination. C'est l'élément dont il est le plus difficile de se débarrasser pour réduire l'impact environnemental, car il est le principal responsable des émissions de CO₂.

5. Matière qui réagit chimiquement lorsqu'elle est mélangée avec de l'eau pour former une structure solide. Le plus courant est le clinker, mais d'autres liants existent comme les fumées de silice ou les argiles calcinées.

intervenant lors de la cuisson rejette du dioxyde de carbone dans l'atmosphère, émissions auxquelles on doit ajouter celles dues à la production de chaleur dans les cimenteries. Cependant, d'autres liants sont aujourd'hui développés, comme les fumées de silice, les laitiers de haut-fourneau ou encore les argiles calcinées. Un aspect moins connu, mais tout aussi crucial, est la chimie des adjuvants⁶. Ceux-ci permettent d'améliorer l'ouvrabilité du béton, en le maintenant liquide tout en réduisant la quantité d'eau nécessaire. En effet, plus le mélange contient d'eau, moins le béton sera résistant. Le défi pour celui qui formule le béton est donc de minimiser cette teneur en eau. Les adjuvants sont une solution efficace pour y parvenir, et nous verrons qu'ils jouent un rôle clé dans le développement de l'impression 3D béton.

2 Leviers de réduction de l'impact environnemental

Environ 90 % de l'impact environnemental du béton, du moins en termes de réchauffement climatique, provient du ciment. Pour illustrer cela, j'ai choisi de vous présenter l'empreinte carbone de la construction en béton, exprimée en kilogrammes équivalents CO₂, en la décomposant en s'inspirant de l'identité

6. Produits chimiques ajoutés au mélange pour augmenter l'ouvrabilité du béton (sa fluidité) tout en diminuant la quantité d'eau nécessaire, ce qui permet de conserver une résistance élevée.

de Kaya⁷ (Figure 2) (Kaya & Yokobori, 1993).

Même si les termes du numérateur et du dénominateur s'équilibrent dans cette équation, celle-ci permet d'identifier les différents postes, acteurs et stratégies pour réduire l'impact environnemental. Voici les principaux leviers à actionner :

- Premier levier : les émissions de CO₂ liées à la calcination, qui relèvent des cimentiers. Les solutions incluent le captage du CO₂ ou le recours aux énergies renouvelables pour les fours – un sujet déjà traité dans un autre chapitre.
- Deuxième levier : la substitution du clinker par d'autres liants, comme les argiles calcinées, sujet également traité dans un autre chapitre.

7. Outil mathématique adapté pour décomposer les différents leviers de réduction de l'impact environnemental du béton (procédé, matériau, formulation, efficacité structurelle et sobriété).

Leviers de réduction d'impact environnemental

$$kg. eq. CO_2 = \frac{kg. eq. CO_2}{kg. ciment} \cdot \frac{kg. ciment}{kg. liant} \cdot \frac{kg. liant}{kg. béton} \cdot \frac{kg. béton}{m^2} \cdot m^2$$

Calcination (cimentiers) Substitution (cimentiers) Formulation (constructeurs) Structure (ingénieurs) Sobriété

Figure 2

L'équation de Kaya appliquée au béton et les différents leviers de réduction de l'impact environnemental.

Ces approches exigent des investissements lourds, typiques de l'industrie lourde.

En se déplaçant vers la droite de la **figure 2**, les investissements nécessaires deviennent moins importants :

- Troisième levier : réduire la quantité de liant par kilogramme de béton grâce à une formulation optimisée. L'idée est d'augmenter la part de sable et de granulats, et de maximiser la réaction de chaque grain de ciment avec l'eau.

Ces réflexions aboutissent à deux derniers leviers :

- L'efficacité structurelle : quelle quantité de béton est utilisée par mètre carré construit ? L'objectif final n'est pas la quantité de matériau, mais la surface habitable obtenue.
- La sobriété : quelle surface en béton choisit-on de construire ? Cela peut passer par l'abandon de certains projets ou par l'adoption de matériaux

alternatifs, comme les matériaux bio-sourcés.

3 Un peu d'histoire : de l'économie de matière à la massification

3.1. L'ère des chefs-d'œuvre légers (Eiffel et Freyssinet)

Faisons un bref détour, à la fois dans l'espace et dans le temps (**Figure 3**).

Commençons par la France, plus précisément dans le sud du Massif central, avec le viaduc de Garabit, construit par Gustave Eiffel⁸ en 1884. Son projet avait été sélectionné en 1880 parce qu'il proposait la structure la plus légère faisable avec les moyens techniques d'alors. À cette époque, le coût d'un ouvrage métallique était directement proportionnel à son poids – il s'agissait alors de fer ou de fonte, et non encore d'acier. Le projet le moins onéreux était donc le plus léger. Ce viaduc, déjà considéré comme un chef-d'œuvre, annonçait les piles élancées de la tour Eiffel, s'affinant vers le haut.

L'approche économique des projets de construction de l'époque rejoignait nos considérations environnementales actuelles et portait sur la minimisation de la quantité de matière. Cette logique perdurerait encore en 1913, comme en témoigne le pont de Boutiron, conçu par Eugène Freyssinet, alors jeune ingénieur des



Figure 3

Photo du viaduc de Garabit dans le Massif central et construit par Gustave Eiffel et Léon Boyer (1884). [Photo : GIRAUD Patrick, distribuée sous licence Creative Commons]

8. Ingénieur célèbre qui a gagné le dialogue compétitif grâce à une structure extrêmement légère, illustrant l'époque où l'optimum économique était lié à l'économie de matière.

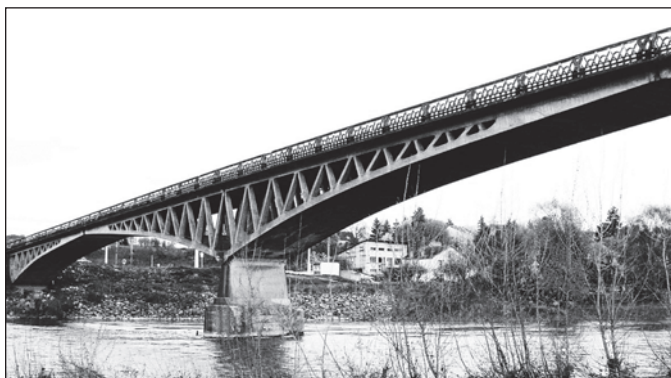


Figure 4

Photo du Pont de Boutiron construit par Eugène Freyssinet (1913). Photo : MOSSOT, distribuée sous licence Creative Commons.

Ponts et Chaussées. Chargé de la conception et de la supervision de plusieurs ponts dans son département d'affectation, il parvint à réduire leurs coûts en allégeant les structures, construisant 3 ponts pour le prix initialement affecté à un seul ouvrage (Billington, 1985). La **figure 4** illustre cette recherche d'optimisation : une solution ajourée, presque en dentelle, avec un arc aux formes innovantes, lui permettant d'alléger considérablement l'ouvrage. Aujourd'hui, un tel projet serait économiquement irréaliste en raison du coût de la main-d'œuvre. On lui préférerait une structure bien moins complexe. Mais à cette époque, l'optimum économique coïncidait presque parfaitement avec l'optimum en matière d'utilisation des matériaux.

3.2. La dérive du xx^e siècle

Cette adéquation entre efficacité structurelle et optimisation économique s'est progressivement estompée

au cours du xx^e siècle, pour plusieurs raisons.

La première tient à l'évolution du coût des matériaux de construction, notamment ceux issus de l'industrie lourde : ciment, béton et acier. Leur production s'est industrialisée, les procédés se sont optimisés, et leur prix a mécaniquement diminué. Dans le même temps, le coût de la main-d'œuvre n'a cessé d'augmenter, tandis que la productivité sur les chantiers reculait. Résultat : le prix des matériaux a considérablement diminué par rapport à celui du travail. Le prix de la main-d'œuvre a notamment grimpé en raison des exigences accrues en matière de sécurité : les ouvriers consacrent désormais une part importante de leur temps à s'équiper et à respecter des procédures qui ne génèrent pas de production directe. Ces mesures de sécurité ont porté leurs fruits puisque la mortalité sur les chantiers a baissé de façon significative, même si elle reste plus élevée que dans d'autres secteurs

industriels. Pourtant, cette augmentation des contraintes n'a pas été contrebalancée par des gains de productivité liés à une mécanisation accrue des chantiers (*Figure 5*).

La *figure 6* intègre une perspective supplémentaire : l'évolution des coûts dans le domaine de la robotique. En l'espace de

vingt ans, le prix des robots industriels a été divisé par quatre environ. Aujourd'hui, ils deviennent compétitifs sur le plan économique. Pour donner une idée de l'ordre, l'acquisition d'un robot équivaut désormais à peu près au salaire d'un ouvrier qualifié sur une année. Cette donnée est désormais un paramètre à prendre en

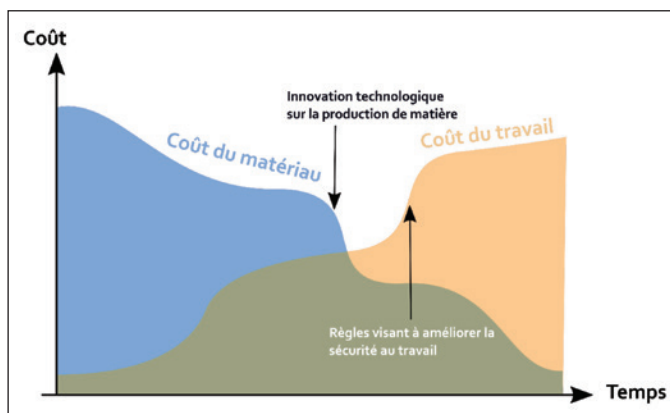


Figure 5

Évolution schématisée du coût du travail et du matériel au xx^e siècle.

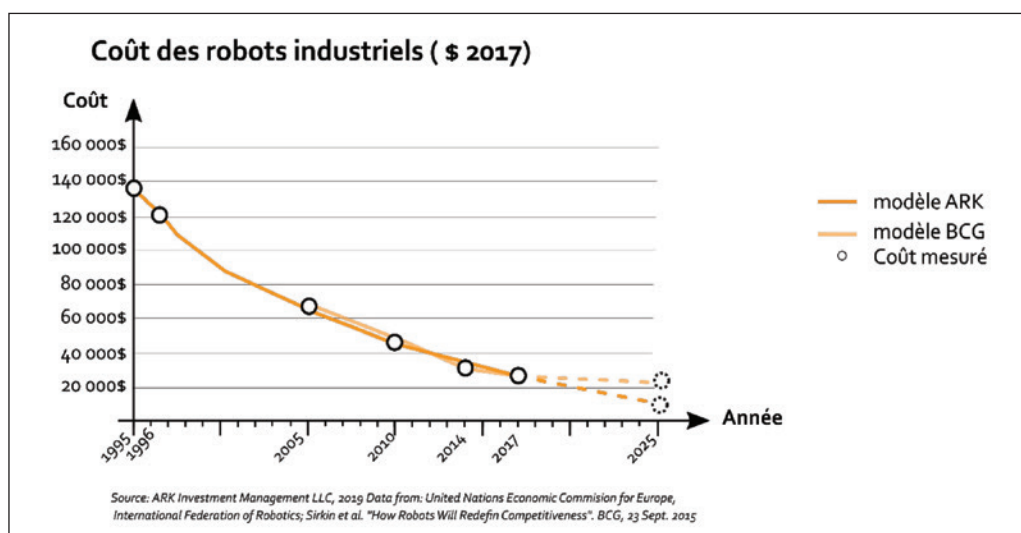


Figure 6

Évolution du prix de la robotique industrielle au cours des années.

compte dans les calculs économiques.

La question centrale que soulèvent nos recherches sur l'impression 3D est la suivante : la robotique ne pourrait-elle pas nous permettre de retrouver une certaine complexité dans les structures, et ainsi réintroduire de l'efficacité matérielle, en complément ou en substitution du travail des compagnons et des ouvriers ?

3.3. L'innovation et les technologies jusqu'au ^{xxi}^e siècle

Au ^{xxi}^e siècle, l'énergie et les matériaux deviendront plus coûteux, que ce soit en raison de leur impact environnemental ou de leur rareté croissante – comme c'est déjà le cas pour le bois au cours de la dernière décennie, par exemple. L'enjeu est donc de déterminer si nous pouvons allier économie de matière et gain de productivité. C'est précisément l'objectif que nous poursuivons à travers nos travaux sur l'impression 3D, et

la robotique en général. Pour illustrer les technologies en jeu, nous pouvons contempler une image issue d'un manuel de construction datant de 1949 (*Figure 7*).

Une telle image ne devrait pas être étrangère à ceux ayant visité ou travaillé sur un chantier récemment. Les techniques de construction n'ont guère évolué : cette photographie, prise il y a près de 80 ans, pourrait presque passer pour une scène contemporaine. Peu de choses ont changé en matière de techniques de construction.

Si l'innovation technique ne se diffuse pas encore sur tous les chantiers, les recherches sur l'automatisation et l'impression 3D se multiplient. Un chercheur irano-américain, Behrokh Khoshnevis⁹, a été l'un des premiers à proposer l'idée d'imprimer du béton par

9. Chercheur irano-américain qui a initié l'enthousiasme pour l'impression 3D béton par extrusion. Il a imaginé des systèmes pour construire des maisons ou des bases lunaires.

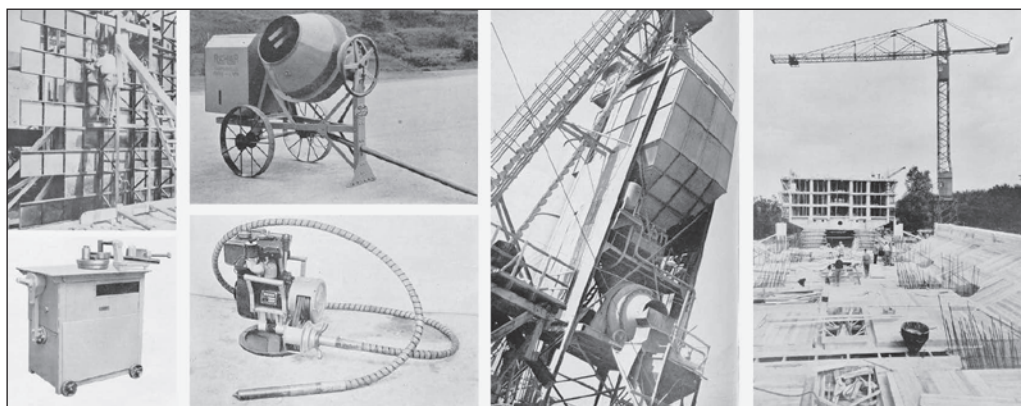


Figure 7

Images des technologies présentes sur les chantiers de construction en 1949 tirées d'un manuel de construction de 1949 [Genouville, 1949].

extrusion avec le concept de *Contour Crafting*. Ses visuels futuristes ont suscité un vif intérêt au sein de la communauté scientifique et inspiré de nombreuses start-ups, dont certaines sont aujourd'hui des entreprises bien établies (*Figure 8*).

L'objectif affiché est de concevoir des imprimantes géantes capables de construire des maisons, voire des bases lunaires. Ce modèle a séduit

quelques architectes et constructeurs, mais il présente aussi des limites évidentes : si l'imprimante doit être plus grande que la maison elle-même, comment envisager la construction d'un immeuble sans se heurter à un problème d'échelle ? De plus, comment s'assurer que cette technologie est bien compatible avec les objectifs de réduction de consommation de béton ?

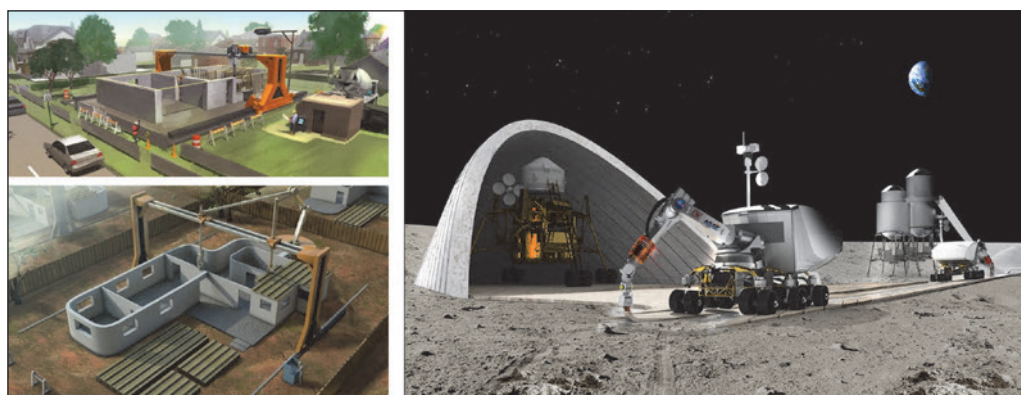


Figure 8

Représentation 3D de l'impression 3D béton : à gauche, construction de maisons monolithique [source : <http://contourcrafting.com/>], à droite : coque pour une base lunaire (Khoshnevis, Carlson, Leach, & Thangavelu, 2012)

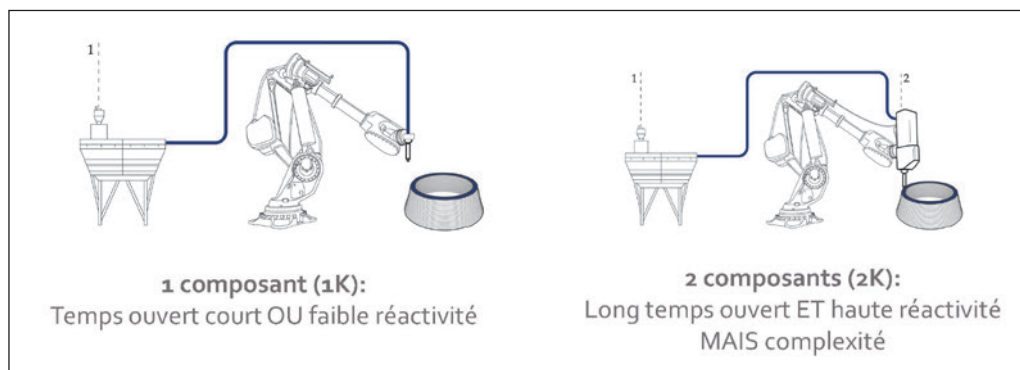


Figure 9

Les deux principes de fonctionnement de l'impression 3D béton (1 ou 2 composants) avec leurs avantages et leurs inconvénients.

4 La technologie de l'impression 3D béton

4.1. Le principe de fonctionnement

Le principe de l'impression 3D par extrusion¹⁰ n'a, au fond, pas fondamentalement évolué depuis les propositions initiales de Khoshnevis (*Figure 9*).

Le système repose sur un mélange de mortier ou de béton, qui est ensuite pompé puis acheminé vers une buse d'extrusion. Celle-ci est pilotée par un dispositif robotisé – qu'il s'agisse d'un robot industriel ou d'un portique – suivant une trajectoire programmée. Cette méthode permet de réaliser des formes d'une complexité quasi illimitée.

4.2. Les méthodes de durcissement du béton

Sur le plan de la chimie, deux approches se dégagent :

- la première consiste à utiliser des mélanges très réactifs, à base de ciments à prise rapide, qui durcissent en une dizaine de minutes (généralement vingt minutes) dès leur contact avec l'eau. Le béton est alors malaxé et pompé en continu en petites quantités vers la machine ;
- la seconde, celle que nous privilégions dans notre laboratoire, repose sur un béton formulé avec des additifs prolongeant le

temps ouvert¹¹ : le matériau reste stable et peu réactif pendant une à deux heures. Un second additif, ajouté en fin d'extrusion, déclenche alors une prise accélérée. Cette méthode présente l'avantage de dissocier les contraintes de pompage et de réactivité. En cas de problème, le délai disponible pour purger et nettoyer les tuyaux est bien plus confortable. En revanche, elle introduit une complexité chimique accrue, car les interactions entre les adjuvants varient selon les types de ciment. Peu d'acteurs maîtrisent cette technique, ce qui la rend plus exigeante (*Figure 10*).

Grâce à cette technologie, il est possible d'imprimer une colonne d'environ 1,80 m en seulement 20 minutes, et d'atteindre des hauteurs importantes. À titre de comparaison, un béton traditionnel ne peut être décoffré qu'après une dizaine d'heures dans des cas favorables. En revanche, comme mentionné précédemment, la formulation doit être extrêmement précise, car le béton risque de se reliquéfier si la structuration du matériau est insuffisante. Les divers adjuvants (plastifiants, retardeurs et accélérateurs de prise) jouent donc un rôle capital dans le développement et la fiabilisation du procédé d'impression 3D de béton.

11. Période durant laquelle le béton reste utilisable et liquide avant de durcir. L'utilisation d'additifs permet de garder ce temps long pour faciliter le pompage, avant d'ajouter un accélérateur en fin de buse.



Figure 10

Impression 3D béton à 2 composantes. Vitesse d'impression verticale avec une stratégie 2K : plusieurs mètres par heure !

10. Technologie consistant à pomper un mortier ou un béton à travers un nez d'extrusion manipulé par un robot pour créer des formes complexes par couches successives.

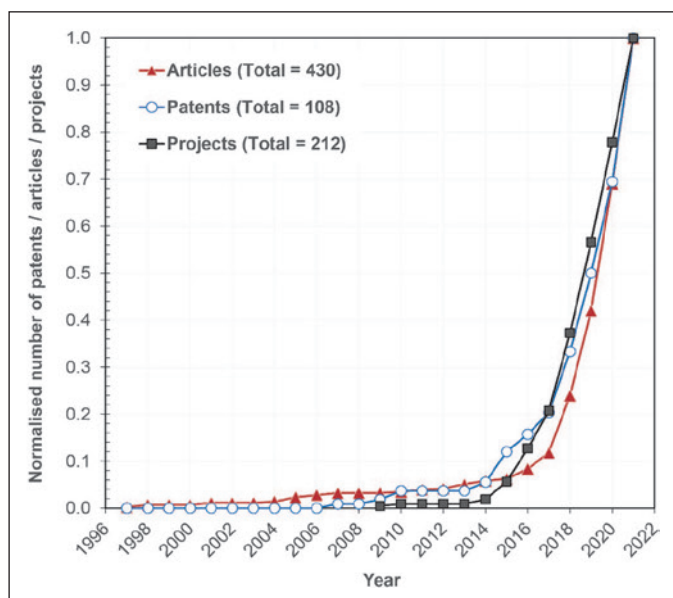


Figure 11

Évolution du nombre d'articles et de brevets de 1996 à 2022.

Source : Ma et al. (2022).



Figure 12

Mur obtenu par impression 3D.

5 Applications et utilisation de l'impression 3D béton

L'adoption de cette technologie se généralise, comme le confirme l'essor du nombre

de publications et de brevets (Figure 11).

On observe une progression quasi exponentielle : entre 100 et 200 laboratoires dans le monde savent désormais imprimer du béton en 3D. Ce marché pèse aujourd'hui un peu plus d'un milliard d'euros annuellement. Bien que modeste comparé à l'ensemble du secteur de la construction, ce domaine s'affirme comme un secteur dynamique et en plein essor.

Dans le domaine de l'habitat, l'application la plus directe de l'impression 3D béton est la construction de murs. Il convient donc de se doter de quelques ordres de grandeur. À titre de comparaison, un mur en parpaings nécessite environ 180 kg de béton par mètre carré de mortier – un chiffre à retenir.

Des solutions bien plus optimisées existent, comme le montre l'exemple de la figure 12, issu d'une thèse menée en partenariat avec Lafarge par Romain Duballet (Duballet, 2019). Ses travaux explorent les marchés potentiels de cette technologie. Il a réussi, par extrusion, à créer des blocs en matériaux isolants – ici du polystyrène, mais le principe pourrait s'appliquer à d'autres matériaux.

Avec cette approche, on parvient à assurer les mêmes fonctions qu'un mur en parpaings, mais avec seulement 50 kg de matière par mètre carré. La figure 13 montre l'image d'un mur que nous avons imprimé dès 2019 : une époque déjà lointaine au regard de l'évolution rapide de ces technologies.

Dans cet exemple, on observe que les éléments isolants sont positionnés en amont, puis que le robot dépose précisément le matériau aux endroits stratégiques, déterminés par des modèles de mécanique des structures aux éléments finis. Le fait d'intégrer la structure dans l'isolant améliore également la performance thermique du mur, même si ce prototype présentait encore des imperfections.

Cette technologie recèle un potentiel considérable, mais l'efficacité des structures varie encore énormément selon les applications. Ainsi, le poids des murs imprimés par *Contour Crafting* atteint 350 kg par mètre carré, environ deux fois plus qu'un mur en parpaings. Les acteurs qui développent cette technologie n'ont pas forcément pour priorité le développement durable, mais plutôt la mécanisation et la réduction des coûts de main-d'œuvre.

Pourtant, il est essentiel, lorsqu'on développe une nouvelle technologie, de clarifier ses objectifs et ses applications. À mon sens, nous en sommes encore à cette étape : définir comment exploiter au mieux le béton en impression 3D et pour quelles finalités.

Le béton comme « coffrage perdu »¹²

Nous nous trouvons à un carrefour, avec deux scénarios principaux pour l'utilisation

12. Technique consistant à utiliser l'impression 3D pour créer une « coque » ou un moule en béton qui ne sera pas retiré, mais qui recevra du béton coulé et participera parfois à la résistance finale de la pièce.



Figure 13

Image de l'impression d'un mur.

Source : R. Duballet et al. "Free deposition printing for space truss structures." RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Cham: Springer International Publishing, 2020.

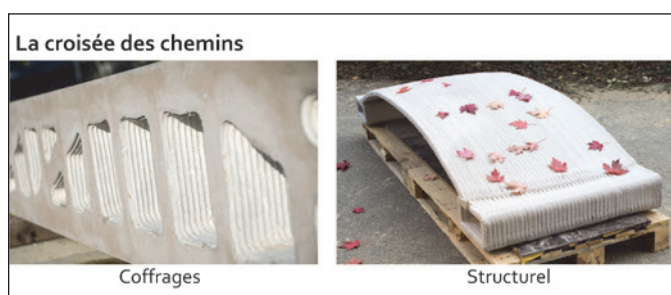


Figure 14

Les deux scénarios d'utilisation de l'impression 3D : un coffrage permettant de construire avec des vides (photo : Stefano Borghi/ENPC), ou un objet pleinement structurel (photo : Léo Demont).

de l'impression 3D béton (**Figure 14**). Le premier consiste à employer le béton imprimé pour réaliser des coffrages, afin d'optimiser la fabrication de structures en béton armé. La seconde option, plus ambitieuse, vise à imprimer directement des éléments structurels.

Pour illustrer la première approche, examinons un projet mené avec un doctorant, Sébastien Maitenaz (Maitenaz, 2022) (**Figure 15**).

- Optimisation de la méthode des bielles et tirants
- Méthode paramétrique, compatible avec l'Eurocode2 et autres codes de calcul
- Economie de béton entre 20% et 60%
- Des moules très complexes

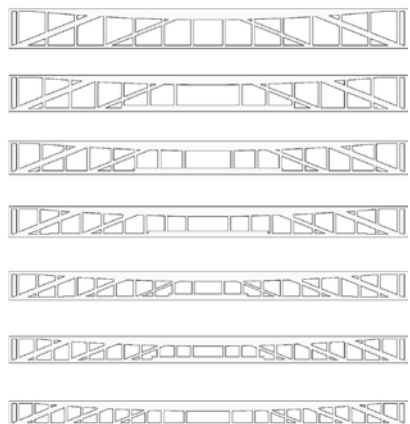


Figure 15

Projet de coffrage.

Source : Sébastien Maitenaz (2024).

Optimiser les structures

L'idée était d'analyser les charges supportées par le bâtiment et d'identifier les zones où la matière n'apportait aucune contribution à la résistance

de la structure. Grâce à cette méthode, il devient possible de percer des ouvertures à de nombreux endroits, ce qui permet d'économiser entre 20 et 60 % de matière, selon les

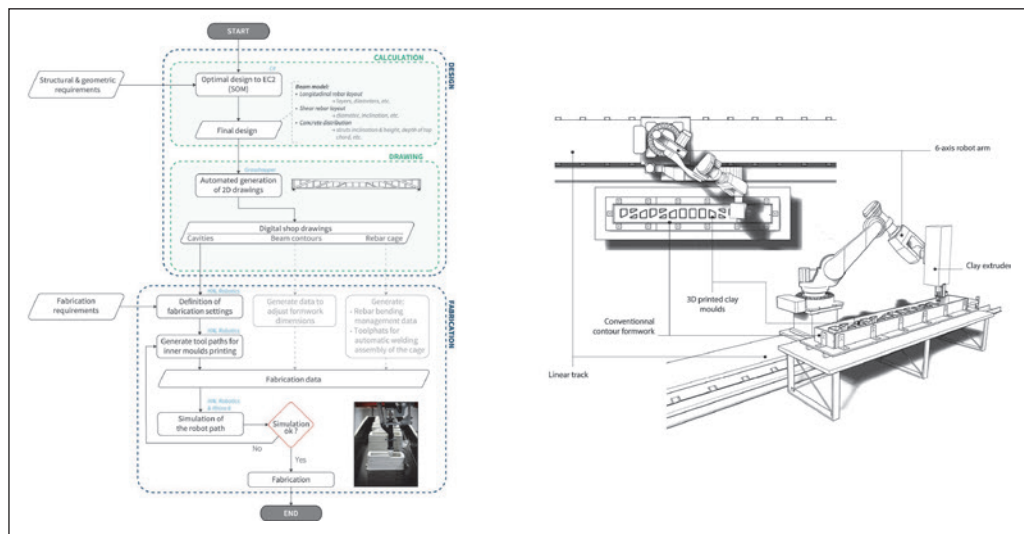


Figure 16

Programme d'automatisation du robot.

Source : Sébastien Maitenaz (2024).

portées et les charges appliquées. En moyenne, le gain se situe autour de 30 % : un potentiel de réduction non négligeable.

Le défi réside dans le fait que la fabrication de ces coffrages par des méthodes traditionnelles n'est pas économiquement viable. Il est donc nécessaire d'automatiser les calculs mécaniques pour convertir ces données géométriques en instructions exploitables par le robot, afin de générer les trajectoires d'impression (Figure 16).

Nous avons conçu des moules légèrement différents les uns des autres. Les premières versions étaient imprimées en terre – ici, il s'agit de kaolinite, ce qui explique la couleur blanche, mais ce choix de matériau n'est pas lié au projet en lui-même (Figure 17).



Figure 17

Photo de l'impression de kaolinite.

Ensuite, il est indispensable de procéder à des essais mécaniques pour valider les performances (Figure 18). Les courbes de couleur représentent la relation entre force appliquée et déplacement pour les poutres évidées tandis que la courbe grise correspond à la mesure effectuée sur une

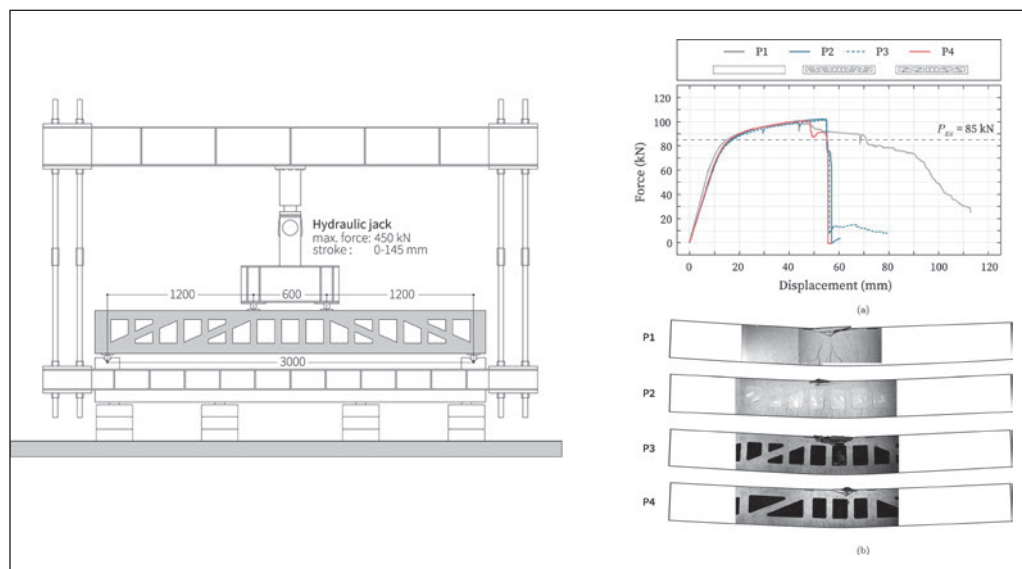


Figure 18

Essais mécaniques sur les poutres creuses imprimées en kaolinite.



Figure 19

Vidéo d'un projet européen.

Source : LIAISON, fondé par l'Union européenne, projet n° 101103698.

poutre pleine. On constate que toutes les poutres supportent les mêmes charges : il n'y a aucune perte de fonctionnalité, mais une réduction de 30 % de la quantité de matière utilisée.

Nous avons poursuivi ce projet en remplaçant les moules en argile par des moules en béton. Pourquoi ? Parce que la séparation des moules en argile est longue et délicate, et que leur fragilité pose problème. Le béton offre une bien meilleure robustesse. Cependant, en passant au béton, la compréhension de la chimie de la prise retrouve toute son importance : il s'agit de garantir la durabilité et de qualifier les interfaces entre le béton imprimé et le béton

coulé, afin d'intégrer pleinement ce matériau dans la résistance et la durabilité de la pièce. Ce projet, mené dans le cadre d'un programme européen, est en cours de finalisation (**Figure 19**).

Vers un béton imprimé structurel

Lorsque l'on évoque le béton, on pense généralement au béton armé, c'est-à-dire un matériau renforcé par des armatures en acier qui en assurent la ductilité. En effet, le béton non-armé est une céramique, il est fragile et bien moins résistant en traction qu'en compression. Le couplage du béton et d'un matériau de renfort permet de créer un matériau composite à la fois ductile et résistant en traction. La **figure 20** montre une éprouvette en béton sans fibre d'acier, photographiée juste avant sa rupture lors d'un essai mécanique.

Sans armature, le béton forme une structure fragile : dès qu'une fissure apparaît, elle se propage jusqu'à la rupture brutale. Une telle situation est inacceptable pour un bâtiment, où l'on préfère des signes avant-coureurs (déformations ou bruits) permettant aux occupants d'évacuer avant un éventuel effondrement. Pour remédier à cela, on utilise généralement de l'acier, mais on peut aussi incorporer des fibres. Plus la quantité de fibres est importante, plus la capacité de déformation du matériau augmente : la **figure 21** montre un essai sur une éprouvette imprimée avec 1.5% de fibres de carbone. On observe plusieurs fissures qui illustrent la capacité du

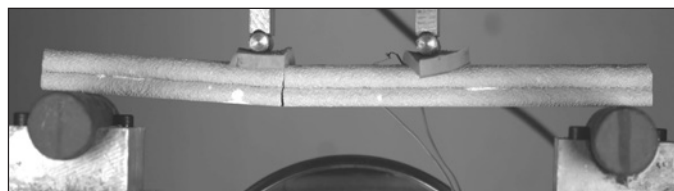


Figure 20

Photo d'une éprouvette en béton avant la rupture. Photo : de Bono (2025).

matériau à redistribuer les efforts. Le comportement de ces nouveaux matériaux composites dépend de la qualité de l'interface entre la fibre et le béton : une interface très faible conduit à une faible résistance de la structure, tandis qu'une interface trop résistante peut compromettre la ductilité du matériau. La maîtrise de la chimie des interfaces, et des éventuels traitements de surface des fibres (enzymage, imprégnation) est donc essentielle pour obtenir des matériaux aussi performants que possibles. De même, la durabilité des fibres dans le béton, où l'eau libre a un pH supérieur à 12, est un défi qui amène les contrôleurs à être très prudents quant à l'adoption de ces matériaux.

Nous avons développé et breveté un procédé permettant d'intégrer des fibres en continu, compatible avec tous types de fibres : carbone, verre alcali-résistant, basalte, acier. Des démonstrateurs ont déjà été réalisés, comme le montre Victor de Bono avec qui, nous avons étudié comment optimiser des structures en coque mince. Ce nouveau matériau, couplé avec la liberté formelle de l'impression 3D permet de réaliser des éléments de six mètres de portée avec seulement trois centimètres d'épaisseur. Elle s'avère donc extrêmement efficace et environ cinq fois plus légère que

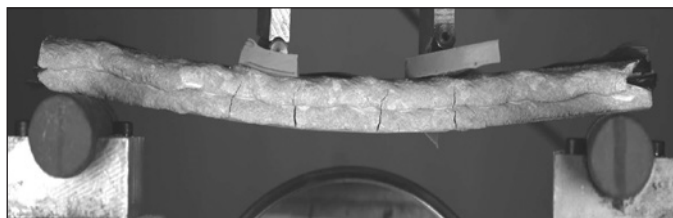


Figure 21

Photo d'une éprouvette en béton avec des fibres avant la rupture.
Photo : de Bono (2025).



Figure 22

Essai mécanique : résultat d'une charge de 1,3 tonnes sur une coque de 100 kg. Photo : Victor de Bono/ENPC.

les structures en béton armé traditionnelles.

Nous avons mené des essais d'impression à grande échelle ainsi que des tests mécaniques, mettant en évidence cette multi-fissuration recherchée pour dissiper l'énergie. Sur la [figure 22](#), vous pouvez observer le résultat : la coque, pesant environ 130 kg, supporte une charge de 1,3 tonne et présente une capacité de déformation importante.

Conclusion

Ce panorama de recherches en cours montre la richesse du procédé d'impression 3D béton. La chimie joue un rôle de premier plan dans le développement de cette technologie : le développement de nouveaux adjuvants permet au matériau de durcir en quelques minutes. Le procédé de fibrage qui a été brièvement présenté amène son lot de questions ouvertes quant à la chimie des interfaces entre fibres et béton. Une recherche de fondamentale doit encore être menée pour donner des gages de durabilité et de qualité aux constructeurs.

Nous venons de discuter de quelques exemples qui montrent que cette technologie peut être au service de la réduction de matière, mais que si elle est utilisée dans le seul but d'augmenter la productivité du travail, elle peut être largement contre-productive d'un point de vue environnemental. Comme le titre de cette présentation le suggère, l'impression 3D doit être une opportunité de catalyser l'innovation constructive, avec pour objectif la réduction de l'empreinte environnementale des matériaux de construction. En revenant à l'équation rappelée dans la **figure 23**, les exemples discutés ici suggèrent qu'en intégrant l'industrialisation et

$$kg.eq.CO_2 = \frac{kg.eq.CO_2}{kg.ciment} \cdot \frac{kg.ciment}{kg.liant} \cdot \frac{kg.liant}{kg.béton} \cdot \frac{kg.béton}{m^2} \cdot m^2$$

-15%
(préfabrication)

-40%

~ -50%

Figure 23

Potentiel de réduction d'impact par la structure et la préfabrication.

la préfabrication, on peut économiser entre 30 et 40 % de matière. En maîtrisant les conditions de mise en œuvre et en optimisant les formulations, on peut également réaliser des gains significatifs. Ainsi, une économie substantielle peut être réalisée en aval de la construction, grâce à une conception bien pensée. Ce levier d'efficacité est au moins aussi important que les leviers disponibles au niveau de l'industrie cimentière, mais il est encore trop largement ignoré.

TRAVAUX CITÉS

- Billington, D. (1985). *The Tower and the Bridge*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- de Bono, V. (2025). *Étude des procédés d'impression 3D de bétons fibrés pour la construction. Formulation, renforcement et application*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Duballet, R. (2019). *Systèmes constructifs en fabrication additive de matériaux cimentaires*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Genouville, P. (1949). *1849-1949 : Cent Ans de Béton Armé. Le Béton Armé, Son Outillage*. Travaux.
- Kaya, Y., & Yokobori, K. (1993). *Environment, energy, and economy : strategies for sustainability : Tokyo conference on Global Environment, Energy and Economic Development*. Tokyo: United Nations Univ. Press.
- Khoshnevis, B., Carlson, A., Leach, N., & Thangavelu, M. (2012). *Contour crafting simulation plan for lunar settlement infrastructure build-up*. NIAC Phase-I Final Project Report .
- Ma, G., Buswell, R., Leal da Silva, W., Wang, L., Xu, J., & Jones, S. Z. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research*, 156, 106774.
- Maitenaz, S. (2022). *Optimisation and digital fabrication of concrete structures*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Tkachenko, N., Tang, K., McCarten, M., Reece, S., Kampmann, D., Hickey, C., . . . Caldecott, B. (2023). Global database of cement production assets and upstream suppliers. *Scientific Data*, 1-9.

Éclairage LED : la chimie au service de la qualité de la lumière

D'après la conférence de Gautier Renoux, co-président du groupe Renoux et dirigeant de plusieurs d'entreprises liées à la production de diodes électroluminescentes (LED).

1 Historique de l'éclairage

L'éclairage au fil du temps

Depuis cinquante ans, le secteur de l'éclairage a connu trois révolutions technologiques majeures. On est passé de l'ampoule Edison, apparue

à la fin du xix^e et au début du xx^e siècle, qui était une ampoule à incandescence¹, à

1. Une ampoule incandescente utilise la lumière créée par le passage d'un courant électrique dans un filament métallique fin. Cette émission de lumière est d'origine thermique.

Contexte : évolution des sources

- Incandescente → Fluocompacte → LED
 - Mutation profonde de l'éclairage
 - 3 ruptures technologique en 50 ans.

Figure 1

L'évolution technologique de la lumière.



Figure 2

Rappel sur l'origine de la perception de la couleur.

Les promesses de la LED

- Efficacité et faible consommation
- Longue durée de vie et robustesse
- Compacité et flexibilité
- Facilité de fabrication

Figure 3

Les avantages de l'éclairage LED par rapport aux autres technologies.

l'ampoule fluorescente², bien connue sous le nom d'ampoule à économie d'énergie, puis à la technologie LED (**Figure 1**). Ces transformations ont profondément bouleversé les producteurs d'ampoules : on est passé d'une ère où l'ampoule était indispensable pour s'éclairer à celle de la LED, qui inaugure l'ère du luminaire, rendant l'ampoule elle-même facultative.

La **figure 2** est une illustration volontairement simplifiée pour rappeler ce qu'est la lumière. Les objets ne produisent pas de lumière. Ce que nous percevons, c'est la lumière réfléchie par un objet, ce qui nous permet d'en apprécier la couleur, la texture et la forme. C'est la lumière blanche qui révèle la nature de l'objet : avec une lumière de mauvaise qualité, comme illustré ici, la perception que nous en avons sera elle aussi de mauvaise qualité.

L'arrivée de l'éclairage LED

La LED a apporté de nombreuses promesses (**Figure 3**), dont la première est celle d'une efficacité énergétique et d'une faible consommation, une promesse qui a été tenue. Son efficacité dépasse largement celle des anciennes ampoules : on est passé d'une ampoule à filament de 100 W à une fluocompacte d'environ 25 W, et aujourd'hui, pour obtenir un flux lumineux équivalent, une source de seulement 6 W suffit. La longue durée de vie et la robustesse sont également

2. L'ampoule fluorescente est un enroulement de tube, dans lequel un gaz est excité par des électrons, produisant ainsi de la lumière.

une réalité, car le semi-conducteur qui produit cette lumière blanche, la LED, offre une durée de vie très élevée lorsqu'il est bien utilisé.

La compacité est un autre atout, car on parvient désormais à produire des photons³ dans un espace très réduit, avec des capacités de production lumineuse très élevées.

Enfin, la facilité de fabrication est évidente si l'on compare la production de tubes sous vide ou de tubes fluocompacts contenant de la vapeur de mercure à la fabrication d'un semi-conducteur.

Quelques limites sont toutefois illustrées par les deux spectres présentés sur la **figure 4**. Le premier correspond à celui d'une LED classique, et le second à celui du spectre solaire. On constate que certaines couleurs manquent dans le spectre de la LED, et qu'un pic de lumière bleue est présent.

Nous avons tous entendu parler des problèmes liés à la lumière bleue⁴, que ce soit avec les écrans ou avec l'éclairage à LED. On observe notamment une vallée spectrale dans les bleus turquoise, ainsi qu'une montée dans les teintes chaudes. Ainsi, contrairement à l'incandescence, qui reproduisait le spectre parfait du Soleil, le spectre de la LED ne le respecte pas parfaitement.

3. Les photons sont des « particules de lumière ». Nous pouvons ici considérer qu'il s'agit d'unité de lumière.

4. La lumière bleue cause des problèmes de vue. Principalement connue pour être émise par les écrans, elle est aussi émise par d'autres sources de lumière.

2 Les besoins de la chimie pour le futur de l'éclairage

Le mode de fonctionnement d'une LED

Un objectif majeur pour notre entreprise est de corriger cette anomalie spectrale, marquée par la présence de lumière bleue, qui n'est pas acceptable pour un éclairagiste soucieux de concevoir des éclairages plus respectueux de l'Homme et de son confort (**Figure 5**).

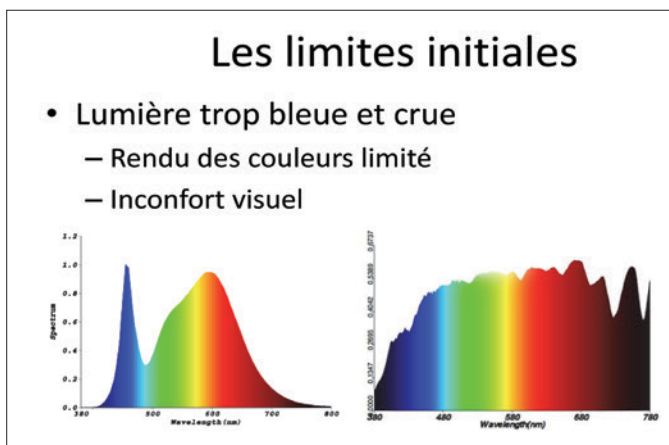


Figure 4

Comparaisons des spectres lumineux d'une LED classique (à gauche) et de la lumière naturelle (à droite).

Performance & efficacité Notre défi actuel

- Réduire la consommation → réduire l'impact environnemental
 - Allier qualité de lumière et efficacité énergétique
 - Substrats et phosphores jouent un rôle clé

Figure 5

Les perspectives d'évolutions de la technologie LED.

Pour y parvenir, nous intervenons sur le substrat et le phosphore en traitant le composé semi-conducteur.

Examinons de plus près ce qu'est un semi-conducteur. Schématiquement, on pourrait le comparer à un burger : un empilement de couches de matériaux. On y trouve un corps de lampe « dopé P », riche en électrons libres, une couche active où sont générés les photons, et un semi-conducteur « dopé N » contenant des trous (*Figure 6*). Les électrons, attirés par ces trous, produisent des photons de manière très efficace. L'ensemble repose sur un réflecteur.

La *figure 7* illustre ces couches en place, avec le substrat qui joue à la fois un rôle mécanique et de réflecteur, tout

en mettant en évidence les électrons qui s'échappent du processus.

La composition chimique d'une LED

Le substrat, qui sert de support à la LED, joue un rôle crucial dans la dissipation thermique (*Figure 8*). En effet, l'échange d'électrons génère de la chaleur, qu'il est indispensable d'évacuer pour éviter un vieillissement prématuré de la LED. Sans cette dissipation, les composants de la LED se dégradent, et une surchauffe altère ses performances. Le montage du substrat assure à la fois la stabilité et la fiabilité mécanique du dispositif, en maintenant en place les

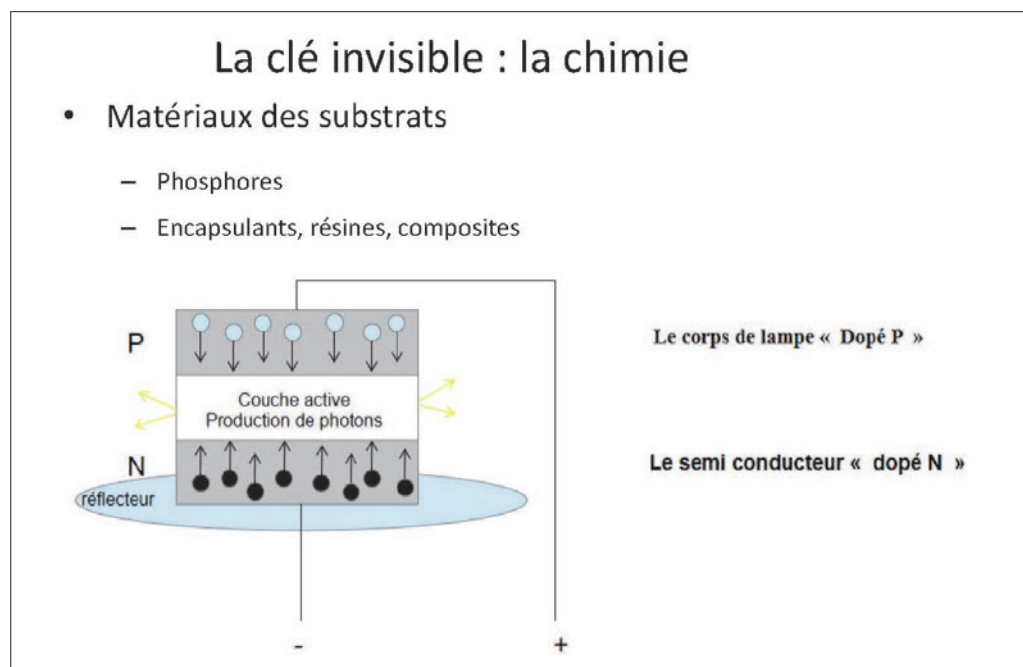


Figure 6

Les composants chimiques d'une LED.

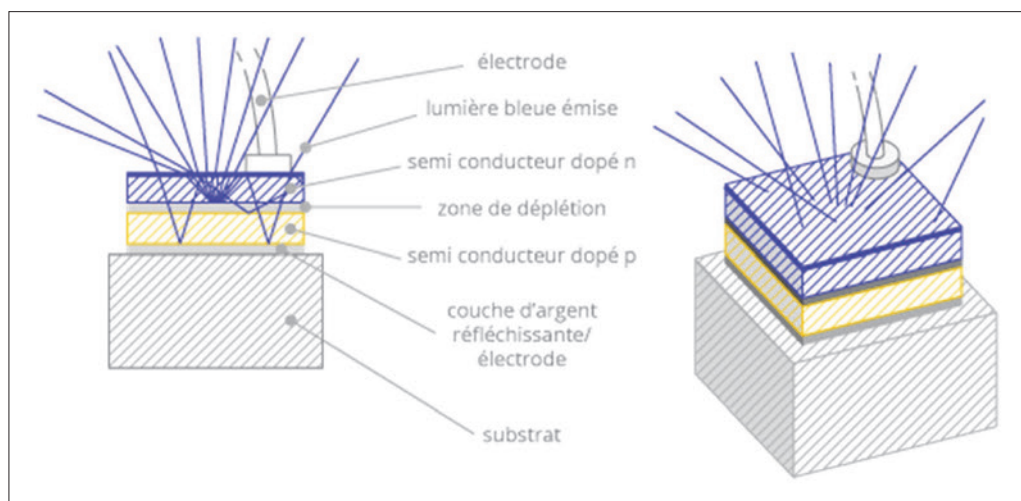


Figure 7

Représentation schématique de l'émission de lumière par une LED.

différents éléments. Enfin, l'efficacité et la performance – c'est-à-dire la manière dont les photons sont dirigés vers le flux lumineux utile – dépendent directement de la conception mécanique de ce substrat.

Grâce à l'utilisation de phosphores, M. Nakamura (lauréat du prix Nobel en 2014 avec I. Akasaki et H. Amano) a réussi à développer des LED aux longueurs d'onde et

aux puissances variées. Un phosphore est un ensemble de matériaux qui permet de contrôler précisément les longueurs d'onde et l'intensité des émissions lumineuses. Cela a permis de concevoir des LED blanches adaptées à l'éclairage, offrant une stabilité suffisante. Il est désormais possible de maîtriser ce qu'on appelle la « température de couleur » (qu'il s'agisse d'un blanc chaud, d'un blanc froid,

Le substrat

- Support de la LED, rôle fondamental
 - Dissipation thermique = lutte contre vieillissement du semiconducteur
 - Stabilité et fiabilité mécanique
 - Performance et efficacité, diriger les photons vers le flux utile.

Figure 8

Illustration du rôle clé d'un composant : le substrat.

etc.), et donc d'obtenir l'ambiance lumineuse souhaitée.

Parlons des phosphores. Leur histoire est fascinante, puisqu'elle a même valu un prix Nobel de physique. Monsieur Nakamura a mis au point une LED bleue à haute puissance. En y ajoutant un phosphore – un composé capable de produire une phosphorescence sous l'effet de

la lumière bleue –, on obtient finalement de la lumière blanche (**Figure 9**). En combinant le bleu avec une phosphorescence jaune, grâce à un phosphore jaune, on parvient à créer du blanc. Enfin, à partir de 1984, on a réussi à produire une LED blanche performante, utilisable pour l'éclairage.

Cette technologie offre une qualité de rendu des couleurs satisfaisante, mais surtout une stabilité chromatique : les propriétés du phosphore permettent de contrôler et d'ajuster la température de couleur, qu'il s'agisse d'un blanc chaud, neutre ou froid. C'est un point crucial, car nous avons tous été confrontés à des ampoules LED bas de gamme, où l'excès de lumière bleue donne un éclairage froid et désagréable.

Les phosphores

• Transformateurs de lumière bleue en blanc

Les travaux sur le nitrure de gallium ont permis de surmonter les difficultés techniques pour obtenir des jonctions p-n et créer des LED bleues de forte intensité. Shuji Nakamura en plus de cette invention a créé un revêtement de phosphore jaune sur une puce de LED émettant de la lumière bleue.

2014 Prix Nobel de physique avec Isamu Akasaki et Hiroshi Amano pour l'invention des diodes électroluminescentes bleues.

- Qualité de rendu des couleurs
- Stabilité chromatique

Figure 9

Explications sur le rôle d'un composant majeur : les phosphores.

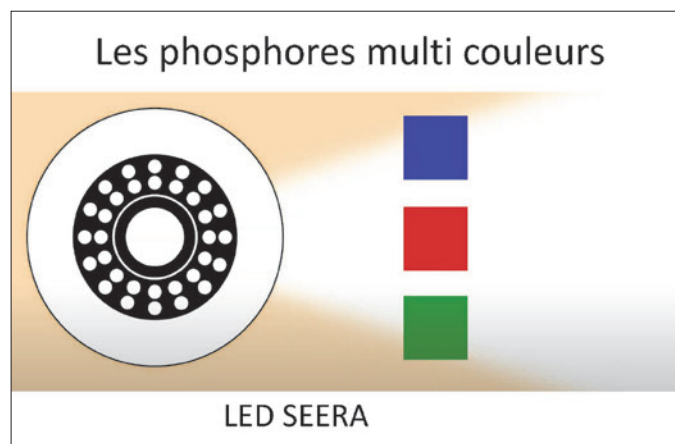


Figure 10

Présentation des phosphores multi-couleurs, une innovation du groupe Renoux.

3 La contribution du groupe Renoux

L'invention des phosphores multi-couleurs

Au sein du groupe Renoux, pour concevoir les LED adaptées à nos besoins en éclairage, nous n'avons pas opté pour la lumière bleue classique, difficile à concilier avec les exigences de qualité lumineuse. Nous sommes partis d'un spectre ultraviolet non visible, que nous filtrons et traitons à l'aide de phosphores tricolores pour reconstituer un blanc parfait (**Figure 10**).

La **figure 11** illustre les résultats obtenus et compare une LED classique à notre LED SEERA. Les anomalies liées au spectre bleu ont disparu, et le spectre obtenu est bien plus homogène. Il offre en

particulier une richesse en nuances, permettant de choisir entre un blanc chaud ou un blanc froid selon les besoins.

L'avancée que représente cette invention : évaluation des résultats

Pour mieux appréhender cette transformation, nous utilisons des phosphores plus épais et plus complexes, ce qui, malheureusement, réduit l'efficacité de la LED. Afin de compenser cette perte, nous employons des substrats plus élaborés, composés de matériaux variés, pour limiter les pertes thermiques (**Figure 12**). Les phosphores, de plus en plus sélectionnés et perfectionnés, sont développés en collaboration avec des entreprises spécialisées en chimie. L'objectif est de les qualifier au mieux et de minimiser les pertes de lumière. Enfin, comme je l'ai mentionné, l'extraction des lumens par watt⁵ reste un critère essentiel, car elle détermine l'efficacité globale du produit final.

Soulignons la qualité de l'outil que représente la LED SEERA. Elle offre aux éclairagistes un moyen précieux pour comparer les qualités de lumière. Par exemple, l'indice de rendu des couleurs (IRC) permet d'évaluer les performances chromatiques d'une LED par rapport à une autre. La **figure 13** présente des diagrammes synthétisant, à

5. Le lumen par watt est une unité de mesure qui permet de quantifier la quantité de lumière émise par unité de puissance électrique fournie.

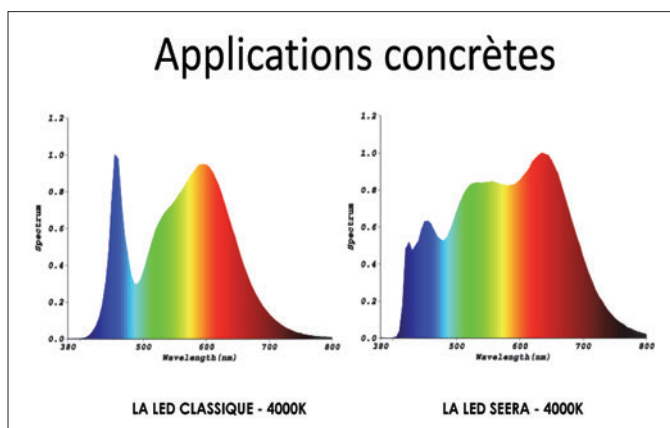


Figure 11

Spectre d'émission lumineuse obtenu avec une LED SEERA utilisant des phosphores multi couleurs.

Efficiency énergétique et qualité lumineuse

- Substrats = moins de pertes thermiques
 - Phosphores = conversion plus efficace
 - Plus de lumens par watt, moins d'énergie consommée

Figure 12

Analyse énergétique des LED SEERA.

La qualité perçue

- IRC, température de couleur, TM-30
 - Confort visuel et bien-être
 - Expérience vécue au-delà des chiffres

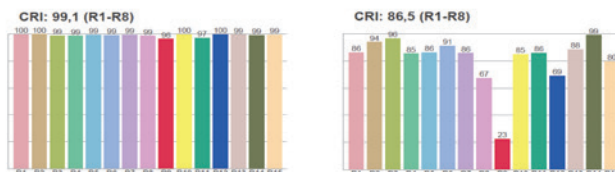


Figure 13

Évaluation de la qualité de l'éclairage à travers l'analyse de plusieurs teintes.

partir des réponses à quinze longueurs d'onde spécifiques, les scores obtenus par la LED testée.

4 Perspective

Les perspectives liées au développement dans le domaine de la chimie sont, bien entendu, les suivantes :

- optimiser au maximum les phosphores pour en améliorer les performances,
- réduire la dépendance aux terres rares,
- privilégier des matériaux plus nobles (*Figure 14*).

L'objectif reste de garantir des performances chromatiques supérieures, tout en explorant des fonctions spécifiques, comme les LED circadiennes. Ces dernières permettent, par exemple, d'adapter la température de couleur au fil de la journée : des blancs chauds le matin, des blancs plus froids en journée et des blancs plus chauds le soir.

Enfin, il est essentiel de se concentrer sur la durabilité et

l'éco-conception, des enjeux majeurs pour notre industrie, comme pour les autres secteurs.

Quelques pistes de réflexion pour les chercheurs, chimistes et électroniciens sur les axes de progrès :

- miser sur la durabilité et la qualité de la lumière plutôt que sur la quantité produite (*Figure 15*). Une question mérite d'être posée : avons-nous réellement besoin d'une telle abondance de lumière ? Si sa qualité est optimale, comme le démontrent les indices de rendu des couleurs (IRC) très élevés, il est possible que nous puissions réduire nos besoins lumineux, et par conséquent, notre consommation énergétique ;
- équilibrer efficacité énergétique et impacts environnementaux liés à l'extraction et à la production. La recherche en chimie, notamment sur les phosphores et les substrats, est cruciale pour renforcer la durabilité des solutions. Cependant, il convient de ne pas se laisser aveugler par la quête exclusive d'efficacité énergétique, qui domine actuellement les priorités de recherche. Un peu de modération s'impose.

Un exemple concret à considérer : aujourd'hui, l'éclairage représente 3,1 % de la consommation énergétique totale d'un foyer français bien équipé en LED, soit environ 25 euros par an. Bien que ce coût ne soit pas négligeable, il reste modeste. Dans ce contexte, est-il vraiment judicieux de privilégier un

Perspectives

- Phosphores moins dépendants des terres rares
- Performance chromatique grandissante
 - LED circadiennes pour le bien-être
 - Durabilité et écoconception
 - Efficience des phosphores et substrat

Figure 14

Les défis chimiques à relever pour l'avenir.

éclairage offrant 5 à 10 lumens par watt supplémentaires, si cela se fait au détriment de la durabilité et de la qualité ? Le jeu en vaut-il vraiment la chandelle ?

Perspective : les vrais progrès !

- Efficience VS Durabilité
- Qualité de la Lumière VS Quantité de lumière
- Efficacité énergétique VS Extraction et pollution de la production.

*Selon RTE, un ménage consomme en moyenne 4792 kWh/an. **3,1 % de cette consommation est dédiée à l'éclairage soit environs 25€.***

Figure 15

Les progrès réalisés par l'invention de la LED SEERA et ses effets concrets.

Conclusion : une ligne de conduite

L'objectif reste d'améliorer sans cesse les performances de nos éclairages, qu'il s'agisse de leur efficacité énergétique ou de leur qualité : optimisation de l'efficacité lumineuse, confort visuel accru, et une chimie innovante au service de la planète et du bien-être humain.

Cela passe notamment par la recherche de nouveaux matériaux, toujours plus respectueux de l'environnement (**Figure 16**).

Conclusion

- Sans la chimie, pas de qualité de lumière
 - Performance + efficience + confort visuel
 - La chimie au service de la planète et de l'humain

Figure 16

L'importance de la chimie dans l'éclairage.

Construire en terre : les possibles apports de la chimie

David Gandreau, archéologue et Docteur en architecture, il est Directeur de l'unité de recherche AE&CC, ENSAG-UGA, membre de l'équipe CRAterre. Il est responsable d'une chaire UNESCO autour des développements de bâtiments à base de terre dans différentes régions du monde. Quant à Thierry Joffroy, architecte et chercheur HDR, il est le précédent directeur scientifique de l'équipe CRAterre et de l'Unité de recherche AE&CC, ENSAG-UGA, il est également expert sur les architectures de terre pour l'UNESCO.

1 Introduction

Ce chapitre aborde un matériau ancestral, qui suscite aujourd'hui un intérêt croissant de la part des architectes, des ingénieurs, des urbanistes

et, plus largement, de tous les acteurs impliqués dans l'aménagement des territoires. L'usage de ce matériau est actuellement en expansion, mais il paraît souhaitable que cette progression s'intensifie dans la perspective d'une meilleure contribution aux enjeux globaux d'amélioration des conditions de vie et de développement durable.

1. Organisation des Nations-Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture.

Quelles pourraient être les contributions de la recherche pour favoriser le développement de cette architecture de terre, et plus particulièrement celles de la chimie ? Cette présentation vise à exposer des pistes de réflexion et de nouvelles recherches, mais vous découvrirez tout de même des exemples de ce qui paraît possible à travers ce que je vais partager sur l'architecture traditionnelle.

2 Recherche

La recherche sur l'architecture de terre n'a pas emprunté

les mêmes voies que celle consacrée aux autres matériaux plus couramment étudiés. Pourtant, des avancées remarquables ont vu le jour, portées par des architectes pionniers qui ont relancé cette discipline. Leurs travaux, à la fois scientifiques, systématiques et expérimentaux, se sont souvent appuyés sur des prototypes. Parmi ces figures emblématiques, l'architecte égyptien Hassan Fathy (*Figure 1*) fait figure de précurseur. Après les deux guerres mondiales, il a joué un rôle clé dans le renouveau de l'architecture de terre, notamment à

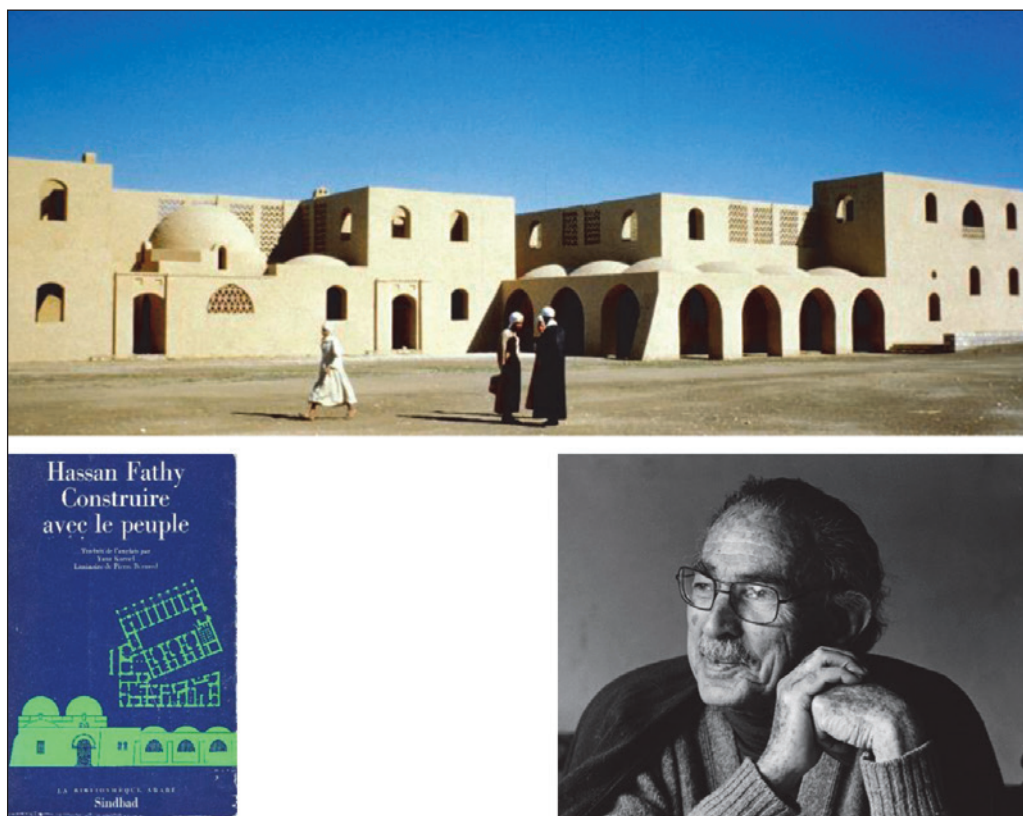


Figure 1

Construction du village de New Gurna, à Louxor (1946-1953). © Aga Khan Trust for Culture / Christopher Little. Ouvrage et photo d'Hassan Fathy (1900-1989).

travers son ouvrage fondateur « *Construire avec le peuple* », où il montre comment il a réutilisé dans sa pratique professionnelle les enseignements tirés de l'architecture traditionnelle égyptienne.

Son objectif était de proposer une alternative au modèle dominant issu de la globalisation et donc de la standardisation de l'architecture, en promouvant des architectures réellement ancrées dans leur contexte, et en réhabilitant l'idée du *génie du lieu*². Hassan Fathy incarnait pleinement cette vision.

Il est important de souligner l'existence du village de New Gourna, près de Louxor³, qui a joué un rôle majeur dans l'histoire de l'architecture de terre. Il a été déterminant pour le laboratoire CRAterre.

La rencontre de ses fondateurs avec Hassan Fathy en Égypte a marqué un tournant. Ces jeunes architectes, devenus ensuite enseignants à Grenoble, ont saisi cette idée pour développer des recherches plus systématiques et pluridisciplinaires. Rapidement, des ingénieurs et des sociologues les ont rejoints. En 1979, un premier ouvrage, « *Construire en terre* », a été publié et a depuis été traduit dans plusieurs langues (*Figure 2*). Partant d'une poignée de fondateurs, CRAterre, initialement une association, est devenu un laboratoire de recherche en 1986, les deux

structures cohabitant toujours, permettant des aller-retours nombreux et fructueux entre recherche et pratique de terrain. Aujourd'hui, il rassemble environ 80 chercheurs et chercheurs associés dont une bonne partie est amenée à travailler à l'international, un peu partout dans le monde.

Au cours du temps, la recherche s'est intensifiée, et heureusement pas seulement à Grenoble : c'est désormais un peu partout dans le monde que de plus en plus de laboratoires et d'équipes de recherche, y compris d'écoles d'ingénieurs qui s'intéressent à ce matériau aux multiples qualités, naturel, écoresponsable et durable. Aujourd'hui, les avancées sont significatives, et j'espère qu'elles nous permettront, d'ici le prochain congrès *Chimie et Habitat* dans une dizaine d'années, de vous présenter de nouveaux résultats concrets issus de nouvelles collaborations à venir.

Je peux notamment évoquer la mise en réseau de ces acteurs grâce à une chaire UNESCO (*Figure 3*), portée par l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble (Université de Grenoble-Alpes- UGA) dont je suis le responsable scientifique. Créée en 1998 – donc d'une durée exceptionnelle pour une chaire UNESCO –, elle favorise, sur le long terme, les échanges entre chercheurs et facilite une variété d'approches et leur mise en complémentarité. Son objectif est de diffuser les savoirs et les pratiques, non plus à une échelle locale ou régionale, mais bien mondiale. Elle fédère aujourd'hui 34 institutions partenaires dans 25 pays.

2. Esprit ou identité particulière d'un lieu, liée à son histoire, son environnement, sa culture et à la façon dont les humains y vivent.

3. Ville d'Égypte située sur la berge ouest du Nil en face de Louqsor

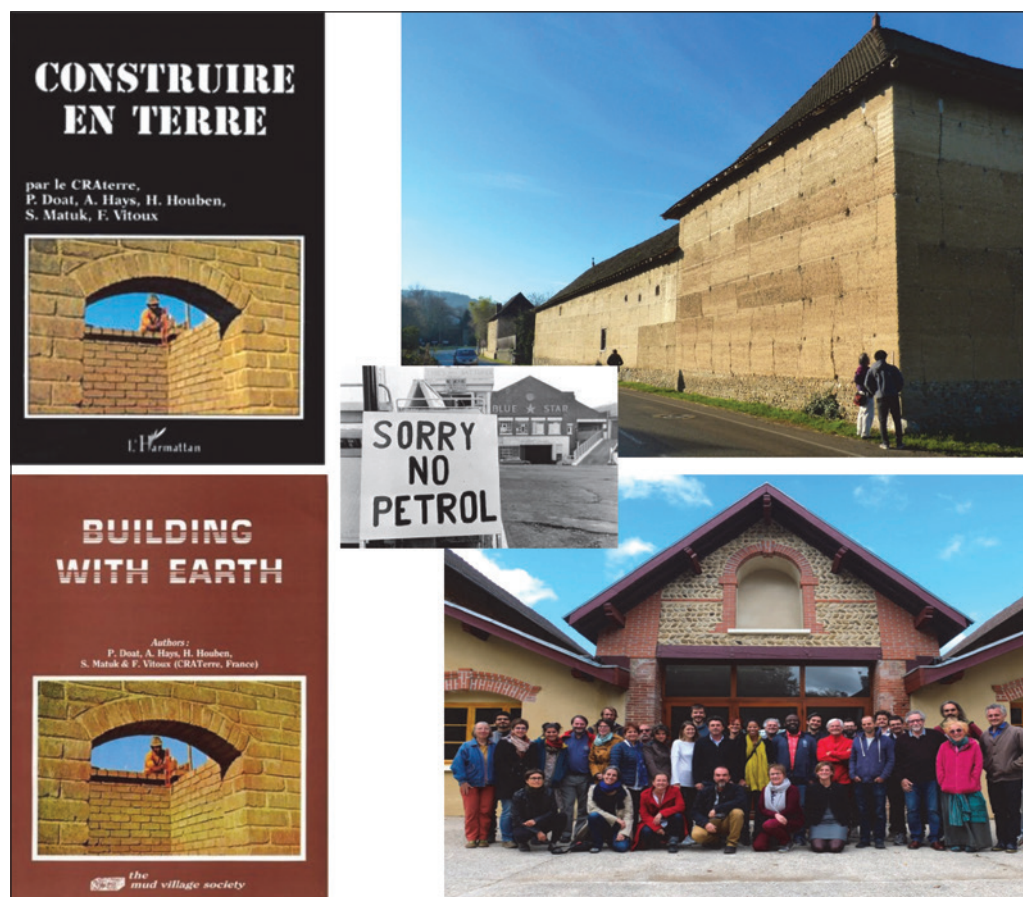


Figure 2

Ouvrage « Construire en terre », dont la traduction anglaise est « Building in earth ». © Sébastien Moriset. Centre international de la construction en terre, CRATerre (1979 / 1986).

3 Enseignements

Pour bien comprendre, revenons aux années 1980. À cette époque, la terre comme matériau était totalement dévalorisée, injustement méprisée, alors que le béton – que l'on a qualifié plus tôt de « pierre magique » – s'imposait comme la solution moderne, reléguant les matériaux locaux, souvent associés à l'habitat rural et à des zones en déclin. Pourtant, cette perception était

erronée. Un inventaire a été réalisé, comme en témoigne cette carte mondiale des architectures en terre. Quand « Construire en terre » a été publié en 1979, on estimait qu'un tiers de la population mondiale vivait dans des habitats en terre. Aujourd'hui, je ne pense pas que cette proportion soit la même (Figure 4), mais la terre reste un matériau de construction majeur qui mérite une attention particulière, notamment au vu des grands enjeux globaux actuels.

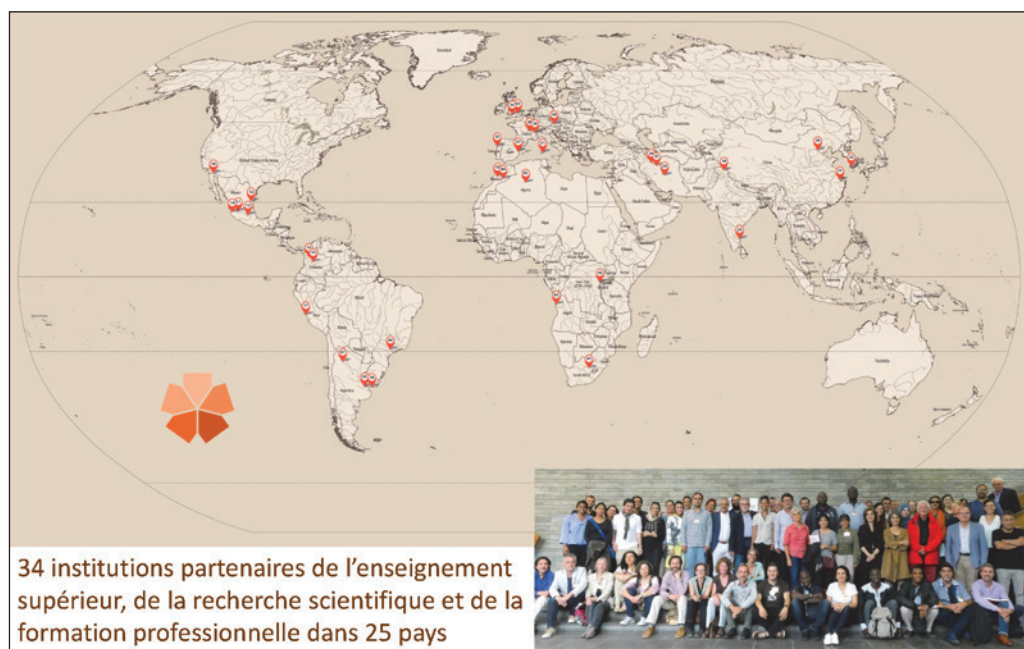


Figure 3

Carte représentant les différentes institutions de la chaire de l'UNESCO « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable ».

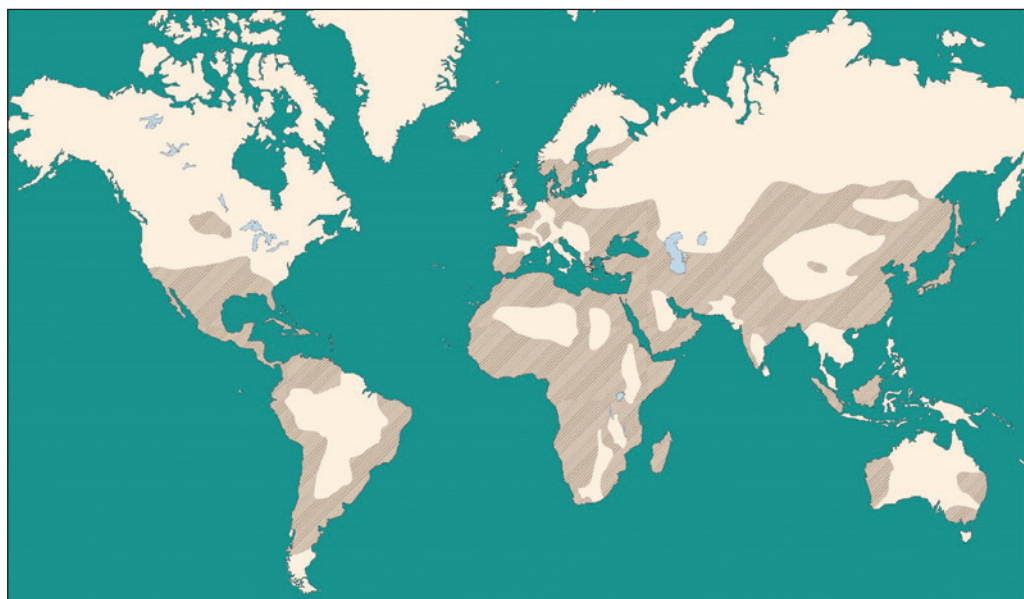


Figure 4

Répartition des architectures en terre crue dans le monde.

3.1. Importance dans l'histoire de l'architecture en terre

Les mentalités ont profondément évolué ces cinquante dernières années, mais les architectures en terre restent bien plus présentes qu'on ne l'imagine. On redécouvre même des constructions en terre dans des endroits inattendus. Prenons l'exemple de Lyon : un inventaire récent a révélé l'existence de quartiers entiers, notamment à Croix-Rousse, ainsi que sur la rive droite du Rhône et la rive gauche de la Saône, où des immeubles, certains allant jusqu'à sept étages, sont en partie construits en pisé, témoignant de l'usage persistant de ce matériau. Nous reviendrons plus tard sur la technique du pisé, qui est celle principale de l'architecture de la Région Auvergne Rhône Alpes.

Deux constats s'imposent : d'abord, cette architecture

est toujours largement répandue ; ensuite, elle remonte aux débuts de la sédentarisation, dès le Néolithique, il y a plus de 11 000 ans. Les archéologues, qui l'avaient longtemps négligée, plus intéressés par les vestiges en pierre ou en briques cuites, lui accordent aujourd'hui une meilleure attention et reconnaissent son rôle fondamental dans le développement des sociétés anciennes.

La **figure 5** illustre les vestiges d'un mur à El Mughara, en Syrie, où l'on observe des architectures en terre déjà ornées et peintes il y a plus de 11 000 ans.

On constate que la maîtrise de la terre comme matériau de construction a été progressive et ce depuis très longtemps. En fait, dès l'âge du Bronze⁴, les connaissances en construction en terre étaient déjà remarquablement avancées.

Aujourd'hui, il serait même assez difficile de reproduire ces briques de terre crue avec la même précision et le même savoir-faire que ceux observés sur les vestiges conservés (**Figure 6**). En tant que spécialiste de la conservation de ces vestiges, je peux affirmer que leur fabrication faisait appel à un processus déjà complexe et amenant à une qualité remarquable, difficile à restituer.

Au-delà, c'est bien ce matériau terre, et notamment la brique de terre (adobe) qui a permis le développement de l'habitat à grande échelle et les premières formes d'urbanisation, il y a plusieurs milliers d'années, comme en attestent



Figure 5

Vestige d'un mur décoré à El Mughara, en Syrie. © Mission Archéologique de Djā'De, MAEDI/E. Coqueugniot.

4. Entre -3 000 à -1 200 av. J.-C.

de nombreux exemples d'établissements humains déjà très denses à ces époques (*Figure 7*).

La durabilité de ces constructions est frappante : certaines, comme le site archéologique de Çatalhöyük, datent de 7 000 ans et, au-delà d'une technique élaborée de construction et de savoirs d'organisation et de planification, illustrent déjà des principes de bioconception⁵ remarquables.

Le long du Tigre et de l'Euphrate, de nombreuses villes



Figure 6

Mur en briques de terre de l'âge du Bronze, témoin d'un savoir-faire exceptionnel. © Mission Mishrifeh-Qatna (Syrie centrale)/G. Mouamar.



Figure 7

Site archéologique de Çatalhöyük, Fondation VIII Mill. B.C. (Turquie), © Çatalhöyük Research Project (<https://www.catalhoyuk.com/>).

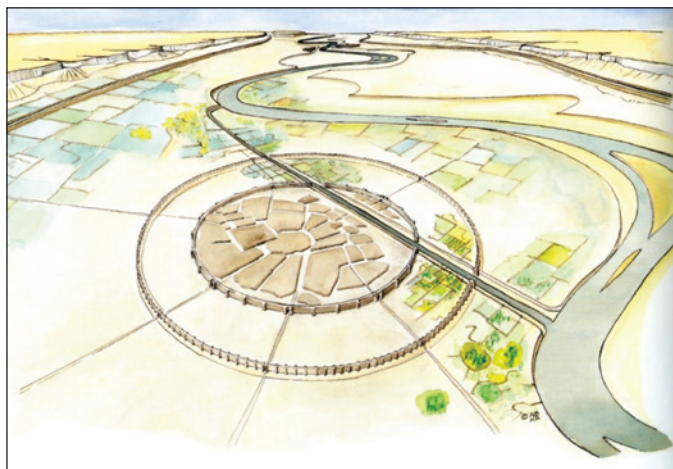


Figure 8

La cité antique de Mari, exemple de ville construite en terre.
Fondation III-II Mill. B.C. (Syrie), © J.C. Margueron, N. Bresch
(<https://archeologie.culture.gouv.fr/mari/fr/ville-ii-0>).

ont été édifiées presque exclusivement en terre. Leurs concepteurs avaient développé des savoir-faire ingénieux pour exploiter l'eau des fleuves – essentielle à la préparation des mélanges de terre – tout en évitant les remontées

capillaires et les dégradations liées à l'humidité au pied des murs.

Ces solutions, aujourd'hui réétudiées, inspirent une architecture de terre contemporaine qui s'appuie sur ce patrimoine de connaissances. La **figure 9** résume cette évolution à travers une frise chronologique simplifiée.

L'enjeu est clair : après 11 000 ans d'architecture de terre, marquée par des transmissions de savoirs sophistiqués, la période d'après-guerre (39-45) a introduit une rupture, privilégiant des matériaux jugés plus performants, issus d'un monde industriel largement favorisé lors de la période de conflit.

3.2. Diversité des architectures

Mais quelques années plus tard, un tournant majeur a été marqué par l'attention portée par l'UNESCO à ce patrimoine



Figure 9

Frise chronologique de l'évolution des constructions en terre à travers les âges. Source : Exposition archéoTERRA, Musée Gallo-Romain de Lyon, 2016.

en terre. Dans le cadre de la convention de 1972, et grâce aux efforts de nombreux États parties à cette convention, le *Comité du patrimoine mondial* a régulièrement inscrit sur la liste du patrimoine mondial de l'humanité de nombreux sites exceptionnels construits en terre (**Figure 10**).

Actuellement, sur les plus de 1200 sites classés au patrimoine mondial plus de 200 sont entièrement ou partiellement construits en terre (**Figure 11**).

Face à cette réalité, l'UNESCO a mis en place un programme spécifique, le *World Heritage Earthen Architecture Programme*⁶ (WHEAP). Son

objectif est d'assurer une conservation et une gestion adaptées de ces sites, en tenant compte des particularités mêmes du matériau terre.

L'observation de la nature de cette liste nous révèle une grande leçon : l'architecture de terre se distingue par une diversité remarquable. Là où l'architecture moderne tend à s'uniformiser au niveau global, la terre incarne au contraire le *génie du lieu*, offrant une richesse de formes et de techniques uniques à chaque contexte : un hymne à la diversité culturelle.

Prenons quelques exemples marquants.

Commençons par le Yémen, dans la vallée de l'Hadramaout, où se dresse la ville de Shibam.

6. Programme du patrimoine mondial pour l'architecture en terre.

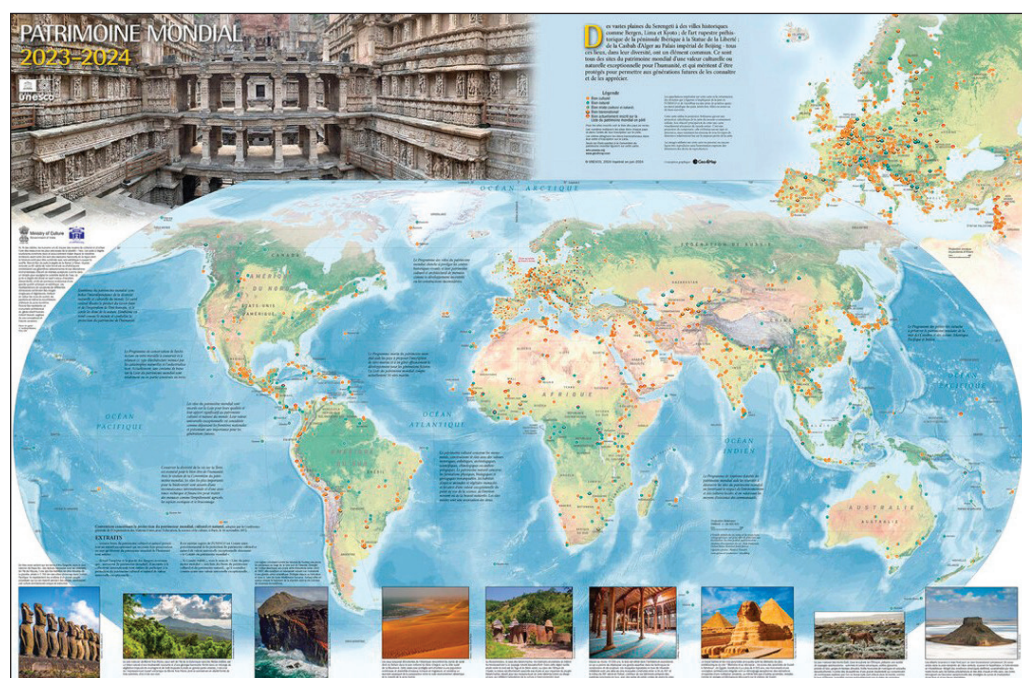


Figure 10

Carte mondiale des sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO en 2023-2024.

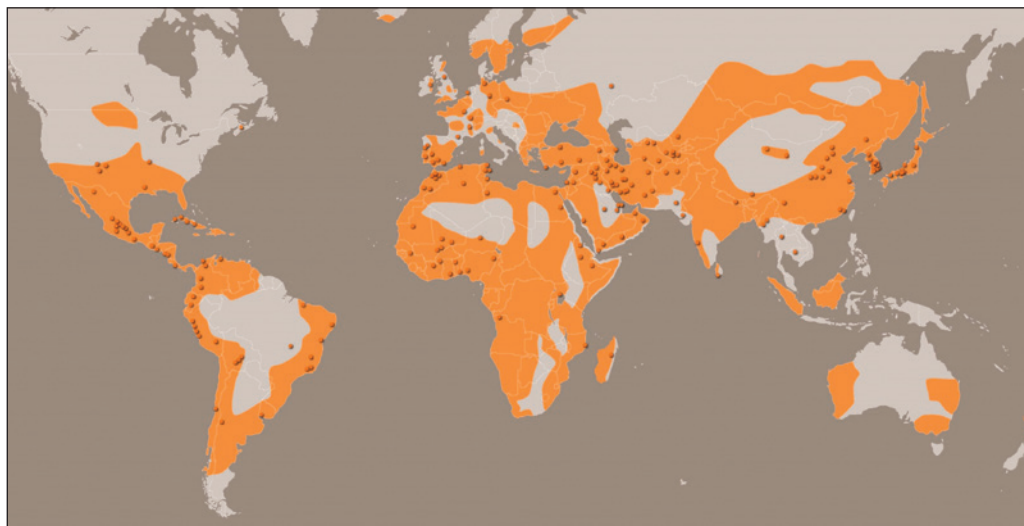


Figure 11

Sites du patrimoine mondial de l'UNESCO construits entièrement ou partiellement en terre. Juillet 2021 : 203 biens en terre.



Figure 12

Illustration de la diversité des architectures de terre.

Son tissu urbain, datant des xv^e – xvi^e siècles (voire plus tôt), est toujours habité grâce à une transmission ininterrompue des savoir-faire et à un entretien constant des bâtiments. Cette cité, extrêmement dense, compte des immeubles de 8 à 10 étages, ce qui lui vaut le surnom de *Manhattan du désert* (**Figure 13**).

Autre exemple : la ville-oasis de Ghadamès, en Libye (**Figure 14**), chef-d'œuvre d'architecture et d'urbanisme bioclimatique. Elle offre un confort toute l'année, malgré des températures dépassant souvent 45 °C aux portes du désert. Ce site regorge de précieuses connaissances architecturales. La terre, matériau souple, y révèle aussi une esthétique unique, inspirant aujourd'hui les architectes par ses formes et ses lignes originales.

On peut aussi citer la Grande Mosquée de Djenné au Mali, symbole de créativité architecturale et de symbiose entre l'architecture et la population locale qui participe régulièrement à son entretien (**Figure 15**).

La Grande Muraille de Chine, souvent imaginée en pierre, est en réalité partiellement construite en terre, là où la présence de ce matériau le permettait voire l'imposait. Des tronçons entiers en témoignent (**Figures 16 et 17**).

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas réservée à l'architecture rurale. Elle a aussi permis la construction de pyramides, comme celle de Tchoga-Zanbil en Iran (**Figure 18**), de 100 mètres de côté, édifiée en briques de terre crue et



Figure 13

Vue générale de Shibam, Hadramaut (Yémen). © R. Crassard.



Figure 14

La ville de Ghadamès en Libye est composée de 1300 maisons de deux à trois étages étonnamment imbriquées les unes dans les autres.

recouverte de briques cuites. Une conception architecturale d'une grande ingéniosité.

Ces constructions pyramidales en terre sont nombreuses. Celle-ci, appelée ziggourat⁷,

7. Grand temple en forme de pyramide à étages, construit dans la Mésopotamie antique pour des rites religieux.



Figure 15

La grande mosquée de Djenné (Mali) © CRAterre/T. Joffroy.

n'est qu'un exemple parmi d'autres : on en trouve aussi le long de la vallée du Nil, où des pyramides en terre, moins connues, sont pourtant bien présentes. La pyramide noire, à Dahchour, qui, haute de 75 mètres est même fort probablement l'édifice en terre jamais construit à travers le monde.

Le matériau se prête même à la sculpture de bas-reliefs, comme en témoigne l'exemple de la **figure 19**, le site de Chan Chan au Pérou (Amérique latine) En de nombreux endroits du monde, la terre,



Figures 16 et 17

Portions de la Grande muraille de Chine construites en terre.



Figure 18

Ziggourat de Tchoga-Zanbil (Iran). © CRAterre/H. Guillaud.

de par sa plasticité, permet de modeler des récits visuels qui immortalisent l'histoire des sociétés qui l'ont utilisée.

3.3. Techniques

Ces exemples illustrent la diversité des constructions en terre, mais il est tout aussi important de connaître la variété des techniques de construction associées. Je vais vous présenter brièvement les quatre principales, schématisées ici.

La première est la bauge (**Figure 20**) : on prépare un mélange de terre que l'on façonne en boules, puis on les assemble directement sur le mur, comme on modèlerait un vase en argile. Cette technique, l'une des plus anciennes, remonte aux débuts de la sédentarisation. Elle permet de réaliser des murs porteurs, parfois avec plusieurs étages, offrant ainsi une grande hauteur.

La deuxième technique, bien connue, est le torchis (**Figure 21**). Très répandue dans le nord-ouest et l'est de la France, elle consiste à ériger une ossature porteuse en bois, que l'on remplit ensuite



Figure 19

Bas-relief en terre sur le site archéologique de Chan Chan (Pérou).
© CRAterre/H. Guillaud.

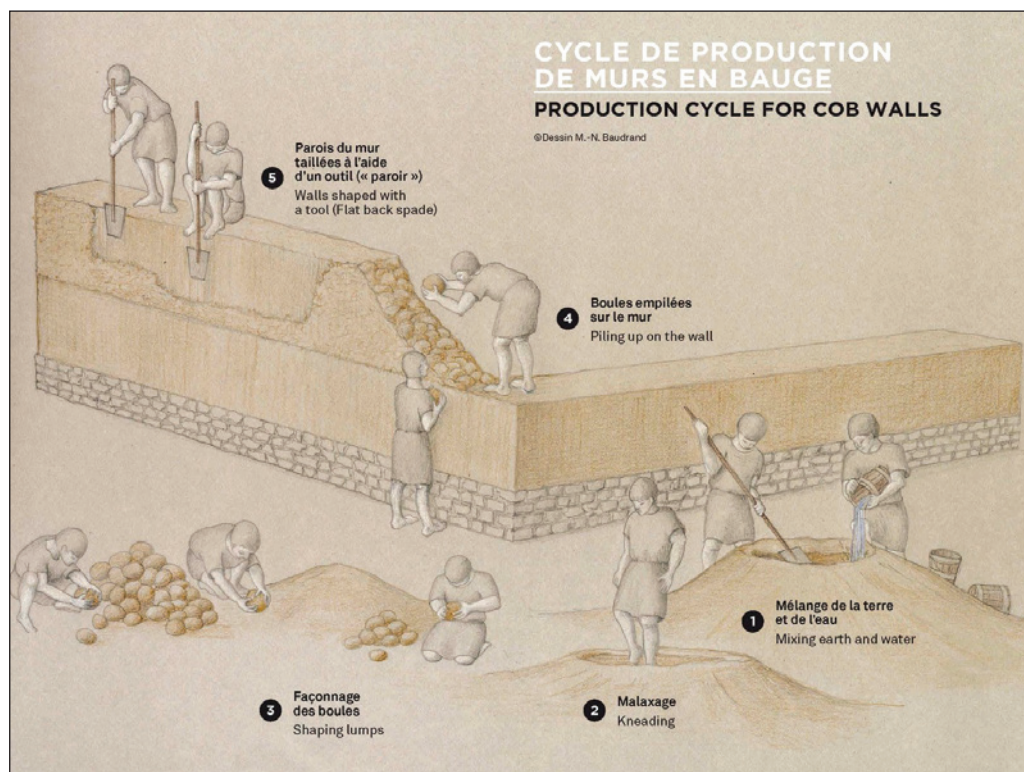


Figure 20

Cycle de production de murs en bauge.

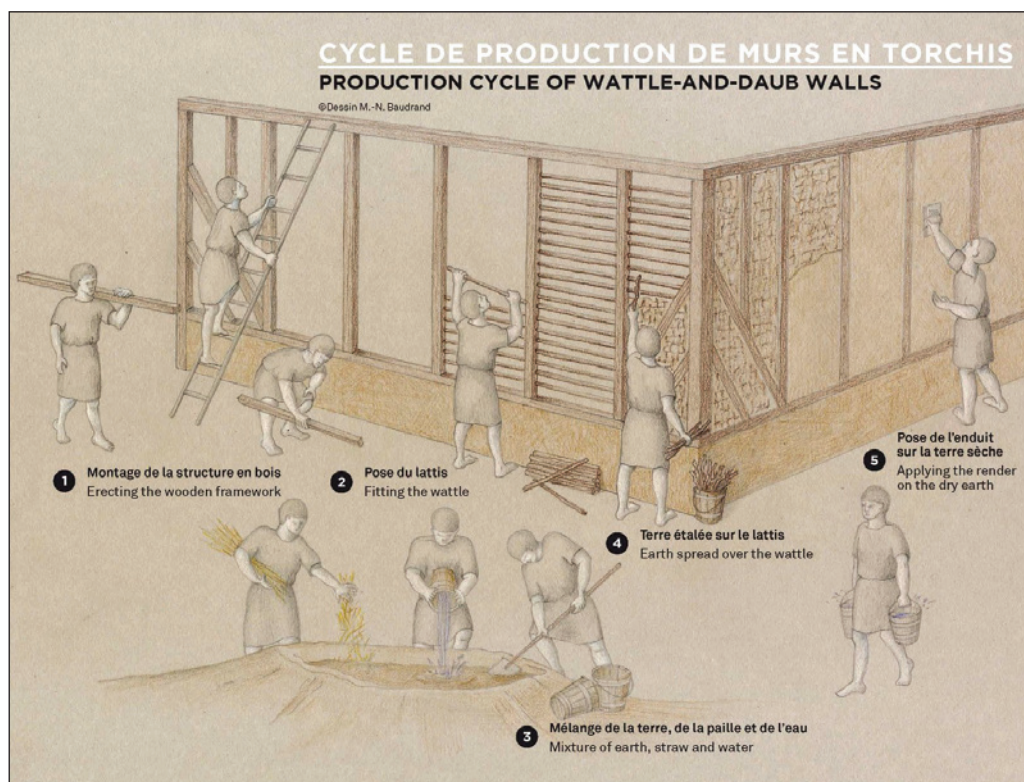


Figure 21

Cycle de production de murs en torchis.

avec un mélange de terre préparé sur place.

Ensuite, il y a la technique de la brique de terre crue (**Figure 22**). Son originalité réside dans le fait qu'elle permet de produire un matériau préfabriqué, modulaire et prêt à l'emploi, comme le montre cette représentation où aucun édifice n'apparaît.

Cette méthode sépare la production du matériau de sa mise en œuvre architecturale. C'est une approche à caractère d'industrie qui a favorisé le développement à grande échelle de l'architecture de terre, notamment lors des premières révolutions urbaines, comme celles du *Croissant fertile*, le

long du Tigre et de l'Euphrate, ou encore autour de l'Indus et au Pakistan. Il est essentiel de retenir que la brique de terre crue représente le premier matériau ayant un caractère industriel, et dont le développement de l'usage aura un impact considérable sur le développement de villes à travers le monde, et ce autant sinon encore plus important que celui de la brique cuite, plus connue.

Enfin, une technique très connue en France et qui d'ailleurs est à l'origine de la création de CRAterre : le pisé. Apparue près de 6 000 ans après les premières méthodes déjà citées, cette technique

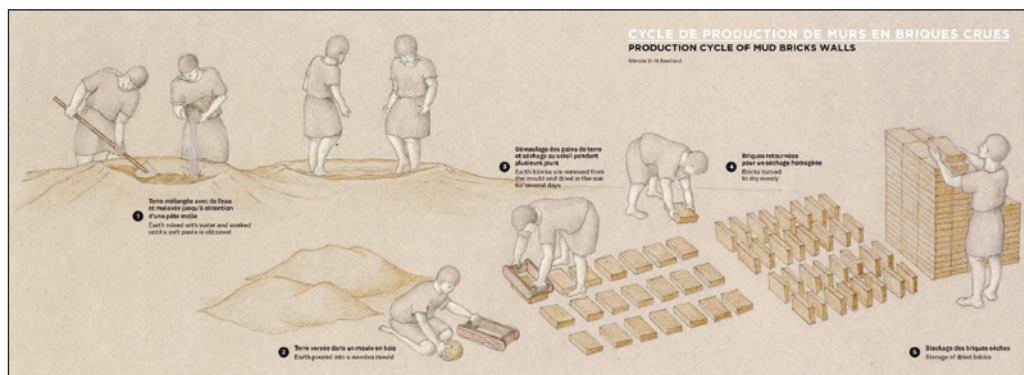


Figure 22

Cycle de production de murs en brique crue.

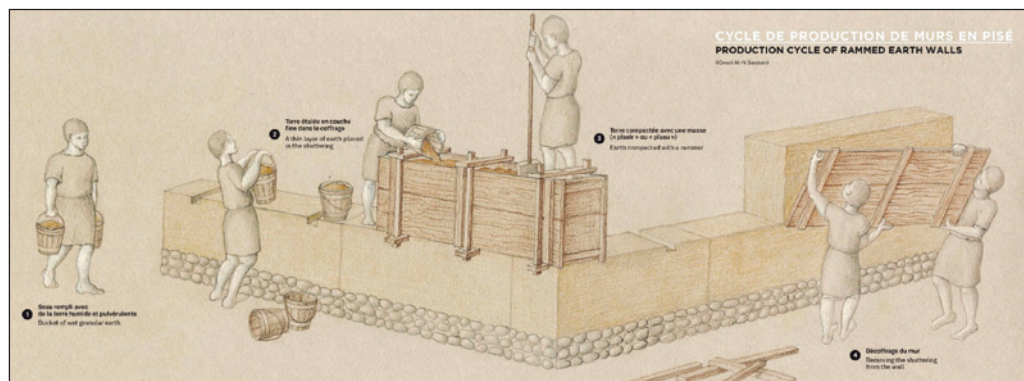


Figure 23

Cycle de production de murs en pisé.

s'apparente au béton. La terre est compactée dans des banches, avec un minimum d'eau, afin d'éviter un phénomène redouté : le retrait lors de l'évaporation (**Figure 23**). C'est cette technique évoquée plus tôt à propos de Lyon, qui a été en grande partie construite selon cette technique, notamment au cours des 18 et 19^e siècles.

La diversité des techniques est donc immense. Au-delà des quatre présentées, la recherche en identifie aujourd'hui au moins douze,

comme le montre cette « roue » des techniques, toujours en évolution (**Figure 24**). Travailler sur la construction en terre, c'est d'emblée intégrer cette diversité des mises en œuvre dans ses approches, ses questionnements et ses méthodologies.

4 La matière en grains : propriétés physiques

Tout comme le ciment se compose de granulats et de liant, les méthodes de construction en terre reposent sur une variété

Figure 24

Roue des techniques de construction en terre.
©CRAterre. (Fontaine et Anger 2011 : 22, sur la base de Houben et Guillaud 1989 : 15).

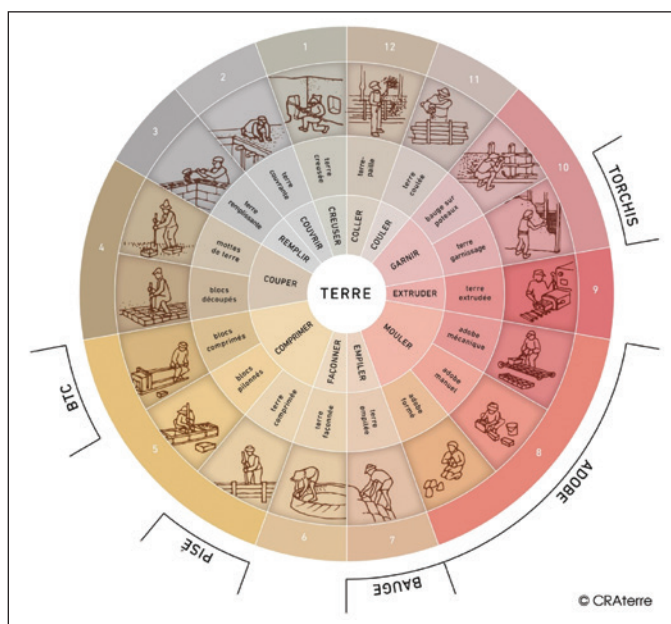


Figure 25

Illustration de la variété de taille des grains potentiellement présents dans une terre.

de grains bien plus étendue que celle du béton, pour lequel on cherche généralement à uniformiser les tailles.

Ici, cette diversité devient une force. On l'évalue grâce à des courbes granulométriques (**Figure 26**), obtenues en tamisant les grains – du caillou au gravier, en passant par le sable, les silts⁸, et jusqu'aux argiles, dont on analyse les propriétés par sédimentation et examens complémentaires.

La granulométrie est la caractéristique la plus étudiée à ce jour. Elle permet de (re) formuler des terres sur mesure, en ajustant la composition par tamisage ou ajout de sable, par exemple. En compactant, comme pour le pisé, on obtient une construction en terre optimisée, aux propriétés physiques maîtrisées.

Cette approche a connu un essor remarquable, notamment dans le Nord-Isère, où le

8. Limons : particules de terre très fines, plus grosses que l'argile mais plus petites que le sable.

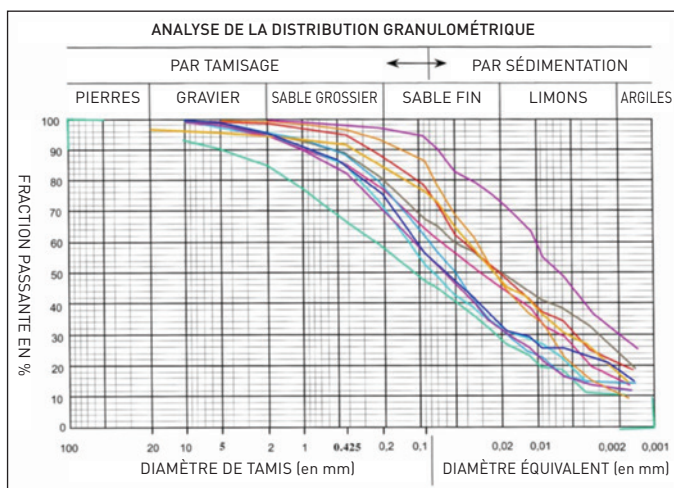


Figure 26

Exemple de courbes granulométriques.

pisé est désormais utilisé pour des réalisations audacieuses. À Lyon, un projet récent pousse l'innovation jusqu'au pisé préfabriqué, avec des formes architecturales marquées par de grandes arches (**Figure 29**).

L'habitat individuel n'est pas en reste : cette maison en Espagne, primée lors d'un concours international



Figure 27 et 28

Photos de la construction d'un bâtiment communal à Four, en France, construit avec une formulation de terre de granulométrie précise.



Figure 29

L'orangerie, immeuble de bureaux de 9 000 m² bâti en pisé préfabriqué à Lyon (presqu'île) en 2020-2021.

d'architecture de terre, en est un exemple (Figure 30).

Enfin, les travaux de l'architecte chinois Jun Mu illustrent le renouveau du pisé à très grande échelle, notamment dans les provinces chinoises, comme en témoigne ce bâtiment emblématique (Figure 31).

Cette technique se redéveloppe aujourd'hui à un rythme soutenu.



Figure 30

Maison en pisé en Espagne.

5 Les stabilisants naturels : propriétés chimiques

Un domaine reste étrangement peu exploré dans la recherche sur l'architecture de terre : l'étude des stabilisants naturels. Pourtant, leur utilisation est ancestrale, comme le montrent les méthodes traditionnelles de préparation des mélanges. Pourquoi un malaxage aussi prolongé ? Pourquoi laisser la terre reposer, macérer – certains diront même fermenter – pendant des périodes si longues ?

Ces questions reviennent souvent : ici, on incorpore des fibres ; là, on ajoute de la paille. Pendant des années, on a pensé que ces ajouts servaient uniquement à renforcer les propriétés mécaniques – limiter le retrait en retenant la terre, par exemple.

Aujourd'hui, on découvre que ces mélanges avec des adjuvants naturels⁹ ne se limitent pas à des avantages mécaniques. Ils visent surtout à produire un matériau prometteur, en plein essor : la brique de terre crue, aussi appelée *adobe*.

Sur le terrain, ceux qui perpétuent ces savoir-faire accordent une attention particulière à la préparation du mélange et à son temps de macération. Cette tradition s'inscrit souvent dans un processus socialement très structuré. La mosquée de Djenné (Figure 36) en est un exemple emblématique : son

9. Substances d'origine naturelle ajoutées à un matériau pour améliorer ses propriétés, comme la solidité ou la résistance à l'eau.

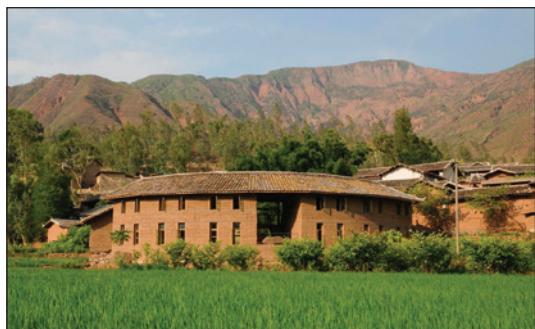


Figure 31

Ministère du logement et du développement rural de Chine, par l'architecte Jun Mu.

Figure 32

Malaxage de la terre par des animaux. Courtesy : LafargeHolcim Foundation & Roswag Architekten.



Figure 33

Personne piétinant de la terre et de la paille pour créer de la terre à bâtir. © B. Clément.

Figure 34

Reconstruction d'une cloison en torchis.
© B. Clément.





Figure 35

Fabrication de briques de terre crue en Iran. © CRAterre/D. Gandreau.



Figure 36

Enduits sur la mosquée de Djenné au Mali. © CRAterre

ré-enduisage¹⁰ régulier, tous les deux à trois ans, est réalisé de manière collective et participative, en utilisant des terres enrichies d'adjuvants naturels, avec en particulier la balle de

10. Recouvrir une surface, comme un mur, avec un matériau (plâtre, argile, mortier) pour la protéger ou la décorer.

riz, mais aussi de la poudre de baobab pour les parties les plus exposées.

A plus petite échelle, sur l'île de Saï, au Soudan, ce sont les femmes qui assurent entièrement la maintenance des habitations, ré-enduisant murs et sols avec des mélanges traditionnels bien plus élaborés qu'il pourrait paraître au premier regard (Figures 37 et 38).

Ce qui frappe, c'est ces gobelets entourant la femme en train de refaire un sol en terre. Leur contenu est d'une richesse insoupçonnée : gomme arabique, pailles fermentées, bouse de vache, et bien d'autres ingrédients encore. Ces recettes, dont tous les secrets ne nous ont pas été dévoilés, contribuent sans doute à ce qu'on appelle le *génie du lieu*.

Une première étude a toutefois été entreprise visant à regrouper des informations récoltées çà et là dans la perspective d'élaborer un inventaire de ces recettes traditionnelles et de classifier les différents adjuvants naturels utilisés. Cela a de fait conduit à s'intéresser aux caractéristiques chimiques des biopolymères¹¹, et plus particulièrement à une question clé : comment les argiles interagissent-elles avec ces composés ?

Cette étude a fait l'objet d'une publication (figure 39), disponible en ligne.

11. Polymères (molécule formée de longues chaînes répétitives d'unités plus petites) issus de la biomasse et donc produits par des êtres vivants comme les végétaux, les algues, les animaux ou les moisissures.

Ce premier effort de synthèse a permis de distinguer quatre grandes familles de biopolymères (**Figure 40**) : les polysaccharides¹² (les plus répandus et les plus prometteurs), les lipides¹³, les protéines¹⁴, et une catégorie « autre », qui inclut notamment les tanins¹⁵, bien moins fréquents.

6 Perspectives

Cet ouvrage l'usage des biopolymères dans le domaine de la construction en terre ne se limite pas à une simple présentation de données. Il illustre aussi comment appliquer concrètement les résultats de cette recherche. Nous partageons ici une expérience vécue, celle de la conservation préventive des sites archéologiques en terre, nombreux et particulièrement fragiles. L'enjeu est crucial : stabiliser les effets du temps et enrayer le processus de dégradation qui s'accélère dès que les lieux sont abandonnés.

12. Sucres complexes formés de nombreuses unités de sucre simples, comme l'amidon ou la cellulose, utilisés par les plantes et les animaux pour stocker de l'énergie ou former des structures.

13. Substances grasses présentes dans les organismes vivants, utilisées pour stocker de l'énergie, protéger les organes et constituer les membranes des cellules.

14. Molécules constituées d'acides aminés, essentielles pour construire les tissus du corps, catalyser les réactions chimiques et assurer de nombreuses fonctions dans les organismes vivants.

15. Substances naturelles présentes dans certaines plantes, utilisées pour tanner le cuir ou comme protection contre les insectes et les microbes.



Figure 37

Femme devant un sol ré-enduit sur l'île de Saï au Soudan. © CRAterre/D. Gandreau.



Figure 38

Femme enduisant un sol sur l'île de Saï au Soudan. © CRAterre/D. Gandreau.

Pour relever ce défi, nous avons collaboré avec des collègues tadjiks en nous inspirant des savoir-faire locaux. L'architecture présente dans le village voisin de Pendjikent, presque entièrement construit en terre,

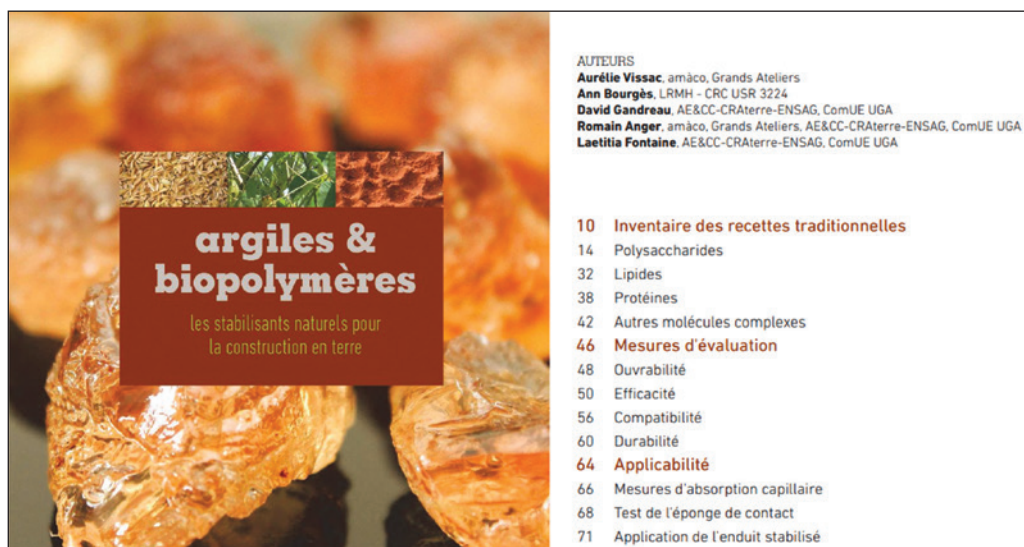


Figure 39

Ouvrage « Argiles et biopolymères ».

résiste remarquablement bien, notamment grâce à la qualité des enduits traditionnels. Ceux-ci intègrent des

mélanges de paille et de balle de riz, des matériaux largement disponibles localement, parfaitement maîtrisés par les artisans.

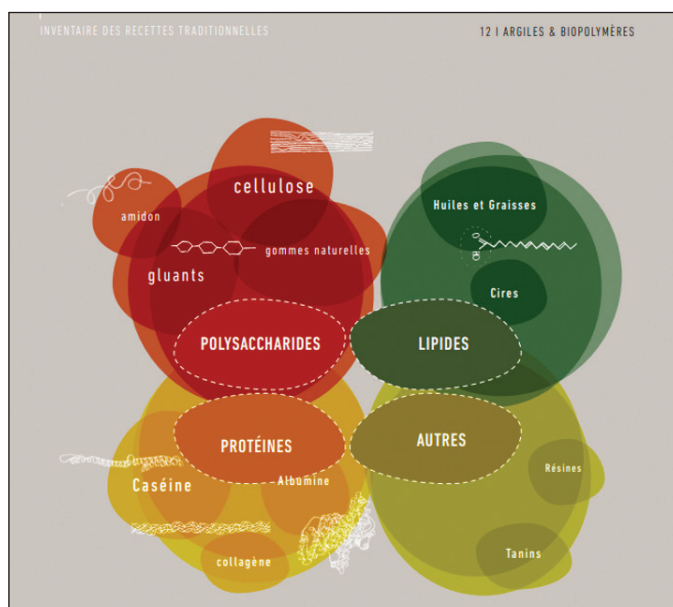


Figure 40

Les familles de polymères.

Nous avons sollicité ces artisans pour réaliser des enduits stabilisés à base de paille et de balle de riz. Des essais réalisés ont permis de mettre en évidence que l'apport de ces matériaux dans le mélange permet de réduire de moitié le taux d'absorption d'eau et d'humidité dans les murs, tout en préservant une bonne perméabilité – une protection totale contre l'eau étant impossible. Après ces quelques essais qui ont pu être réalisés sur le terrain, les résultats ont été rapides et concluants et il a donc été décidé de ré-utiliser ces recettes pour répondre aux problèmes d'érosion des vestiges archéologiques, sous forme d'enduits sacrificiels.

Aujourd'hui, ces enduits protègent donc de façon quasi

Tests d'enduits en terre stabilisés pour le site archéologique de Sarazm au Tadjikistan



Quelques éléments de contexte

Le site proto-urbain de Sarazm se situe au Tadjikistan, à l'ouest de la ville de Pendjikent, proche de la frontière avec l'Ouzbékistan et de la ville de Samarkand. Découvert en 1976, il s'étend sur une surface connue de 50 ha dans la vallée du Zeravchan, à 910 mètres d'altitude. Les seize secteurs fouillés, dont cinq sont aujourd'hui protégés par des couvertures métalliques ont révélé des installations appartenant à la civilisation proto-urbaine eurasiennne qui s'est développée aux périodes du chalcolithique et du bronze moyen (IV-III mill. BC).

Les vestiges d'architectures comprennent des logements, des ateliers, des espaces de stockage et des édifices monumentaux. À l'exception de quelques soubassements en galets, ils sont entièrement construits en terre, selon deux techniques principales : la brique de terre et une forme de bauge, localement appelée pakhsa. Ces techniques persistent dans l'architecture traditionnelle de la région de Pendjikent même si plus de 90 % du territoire est montagneux.



Vestiges d'architectures en terre à Sarazm, secteur 11

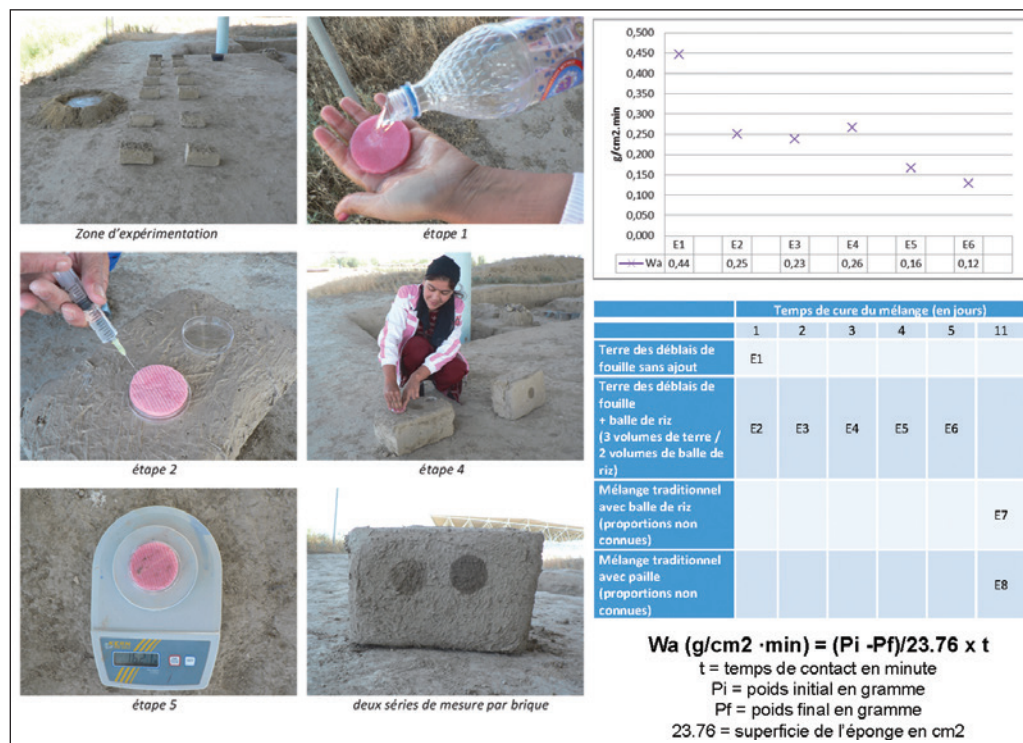
Figure 41

Présentation du site archéologique de Sarazm au Tadjikistan proche du village de Pendjikent.



Figure 42

Enduit du village de Pendjikent
et gros plan sur la balle de riz.
© CRATERRE/D. Gandreau.



Figures 43, 44, 45

Exercices de terrain pour site archéologique de Sarazm au Tadjikistan. © CRAterre/D. Gandreau.

systématique les murs mis au jour lors des fouilles, stabilisant les ruines en attendant leur potentielle valorisation. Cette méthode, qui s'appuie sur des stabilisants naturels, se diffuse rapidement dans le

domaine de la conservation du patrimoine.

Au-delà d'apporter des réponses à la préservation de tels sites du patrimoine archéologique, nous sommes convaincus – notamment au

sein de CRAterre et de la chaire UNESCO – que ces matériaux offrent un potentiel immense pour les éléments de second œuvre dans l'habitat : enduits de finition, décors, ou encore claustras acoustiques.

Nombre de ces applications en second œuvre pourraient rapidement bénéficier des avancées issues des recherches menées, notamment dans le cadre du projet Tercel, réalisé au sein de la formation de niveau Master Design de l'ENSAG-UGA (**Figure 47**), sous la direction d'Arnaud Misse et de Milena Stéfanova.

Ce projet explore l'utilisation de terres de lavage, résidus issus du lavage des granulats (graviers, sables) pour l'industrie cimentière, qui génèrent d'énormes quantités de déchets. Pour nous, ces argiles représentent une ressource précieuse. Comment les valoriser ? En les combinant avec d'autres rebuts industriels, comme ceux de l'industrie papetière. Les premiers résultats sont extrêmement prometteurs et pourraient ouvrir des perspectives pour l'habitat contemporain, tout en recyclant ce que l'on considère aujourd'hui comme des déchets de production. Reste à le démontrer de manière plus approfondie avec de premières applications d'ampleur dans des projets réels.

Pour aller plus loin que le simple renouveau du pisé – qui, lui, ne recourt pas à des stabilisants naturels –, il est probable que ce type de



Figure 46

Exemples d'utilisation d'enduits en tant que matériaux de second œuvre.
© CRAterre/D. Gandreau.



Figure 47

Une des propositions résultat du projet TerCel mené dans le cadre
du Master Design de l'ENSAG-UGA © CRAterre/D. Gandreau.

recherches nous permette de développer des matériaux plus sains et durables pour la construction de demain.

Conclusion

Quelle que soit la période ou l'angle privilégié – architecture, ingénierie, durabilité, esthétique, histoire, etc. –, la recherche sur les matériaux de construction à base de ressources bio et géo-sourcées se révèle riche et surprenante. Cette diversité exceptionnelle en fait un domaine captivant, offrant un terrain d'études original pour les ingénieurs et les scientifiques, restant encore largement à explorer.

Cela nous invite à découvrir une autre dimension, plus profonde : à côté de la fierté d'innover, il faut aussi célébrer la modestie. Reconnaître que nos ancêtres, eux aussi, observaient, inventaient et faisaient évoluer leurs pratiques. Qui aurait imaginé, il y a encore peu, que l'habitat en terre deviendrait une source d'inspiration pour les générations présentes et futures ? Masi que de potentiel pour des solutions innovantes que, nous l'espérons, déclenchera notre présentation et cette retranscription qui en a été faite.

Notre ambition, à travers ces pages, est de transmettre au lecteur cette double satisfaction : celle de l'invention, et celle de la cohérence avec l'héritage des civilisations. C'est là, à nos yeux, l'apport fondamental de ce travail – une vision du progrès dans ce qu'il a de plus essentiel mais surtout qui réponde véritablement aux grands enjeux globaux actuels de développement durable et d'amélioration des conditions de vies des populations de notre planète, en respect de leur diversité culturelle.

Gageons que ce message, porté par tous ceux qui partagent cette conviction, saura susciter des vocations dont il est fortement probable qu'elles pourront largement s'épanouir et rayonner.