

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.

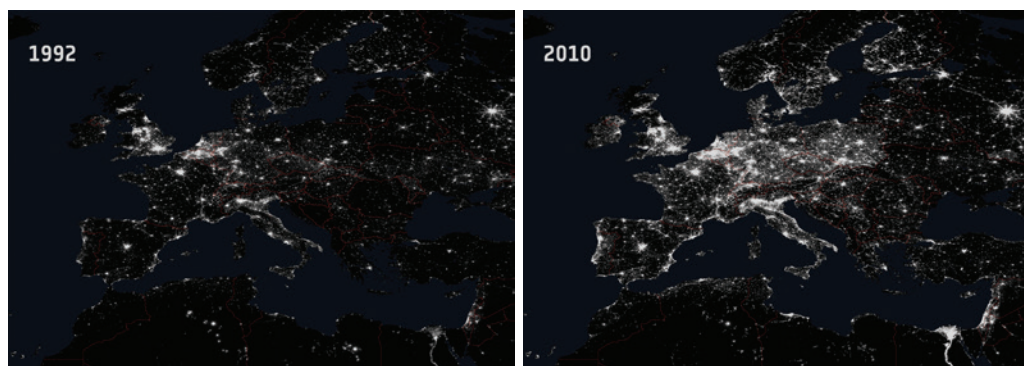
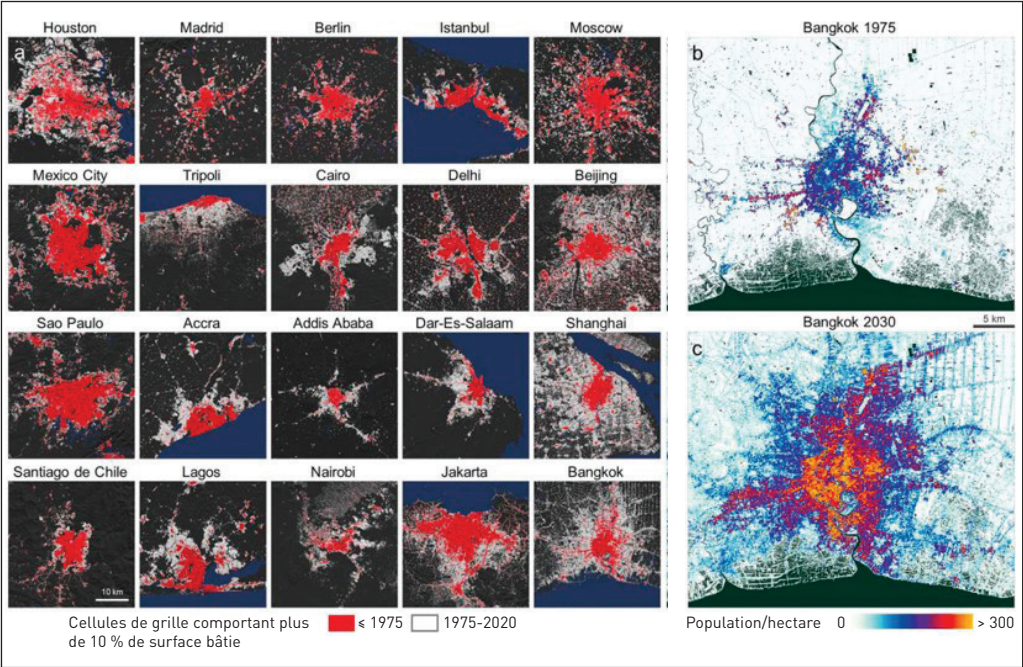


Figure 1

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...).

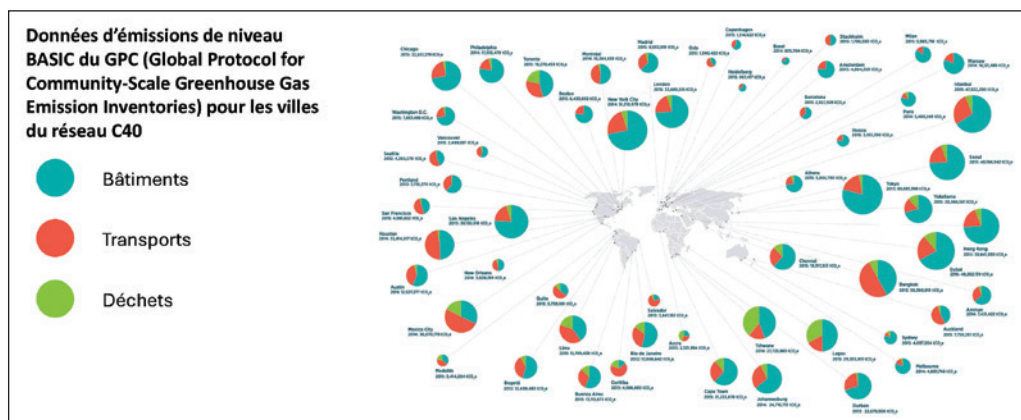


Figure 4

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

Source : GHG Emissions Explorer, C40.

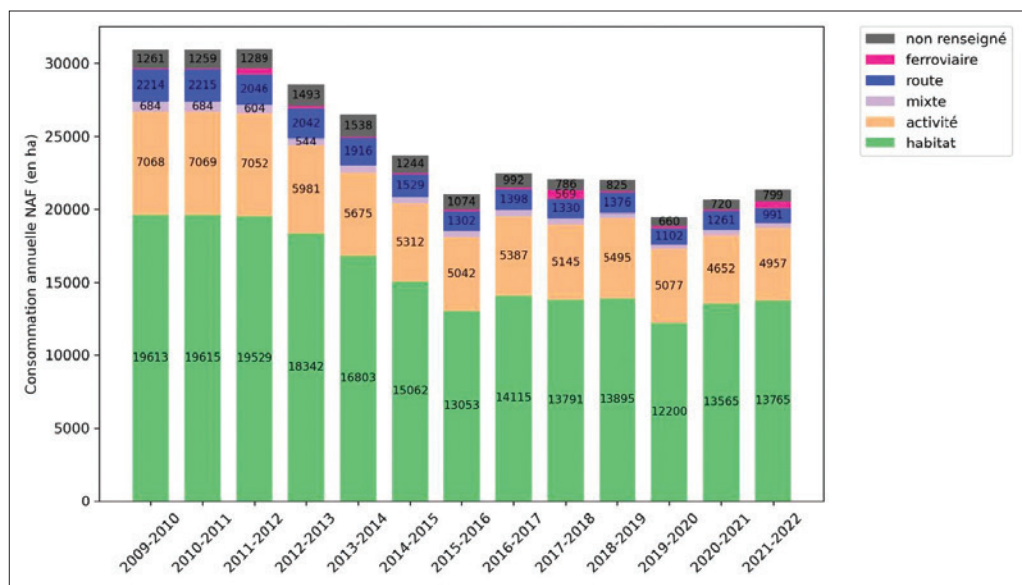


Figure 5

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.

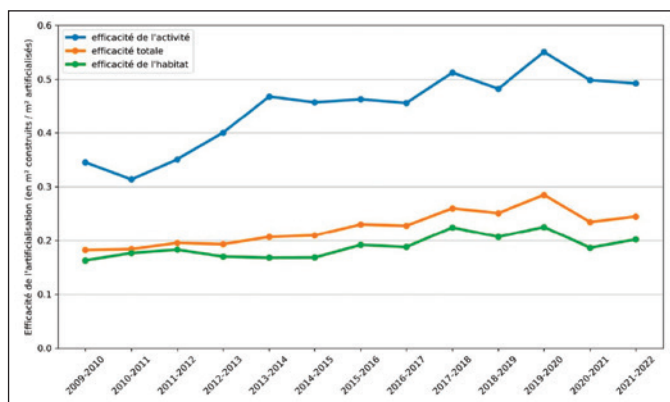


Figure 6

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

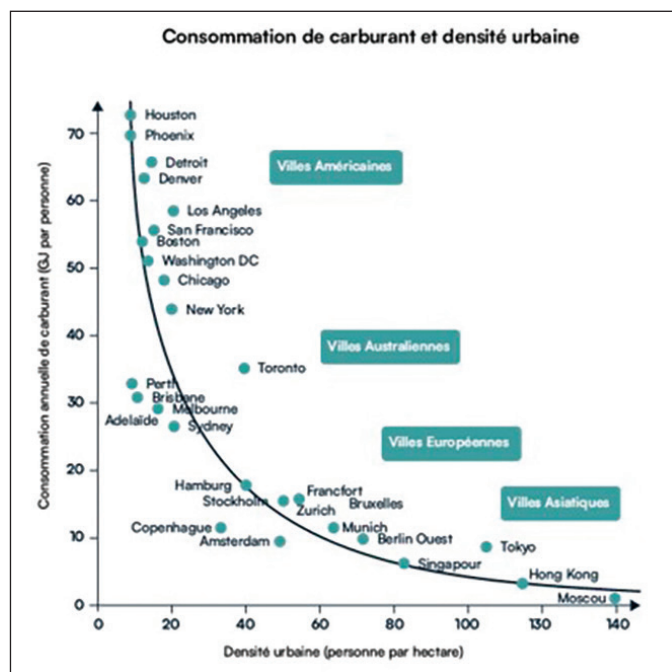


Figure 8

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.

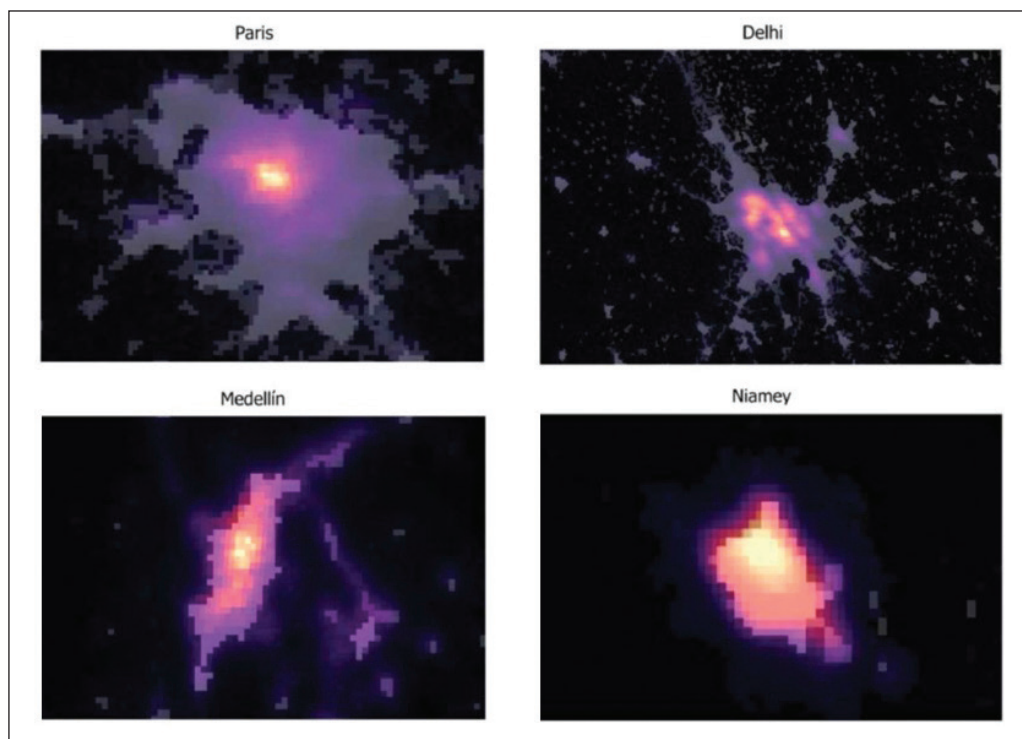


Figure 9

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

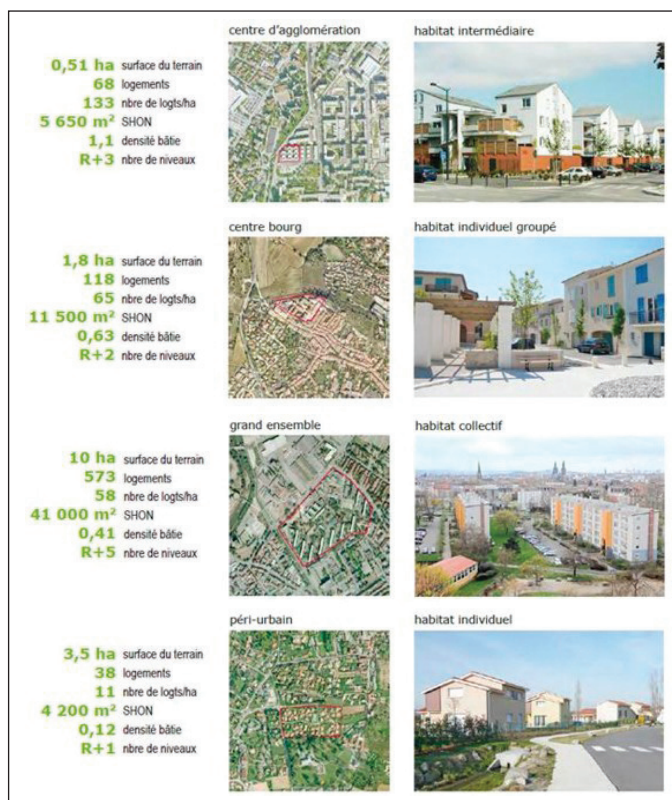


Figure 11

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 :

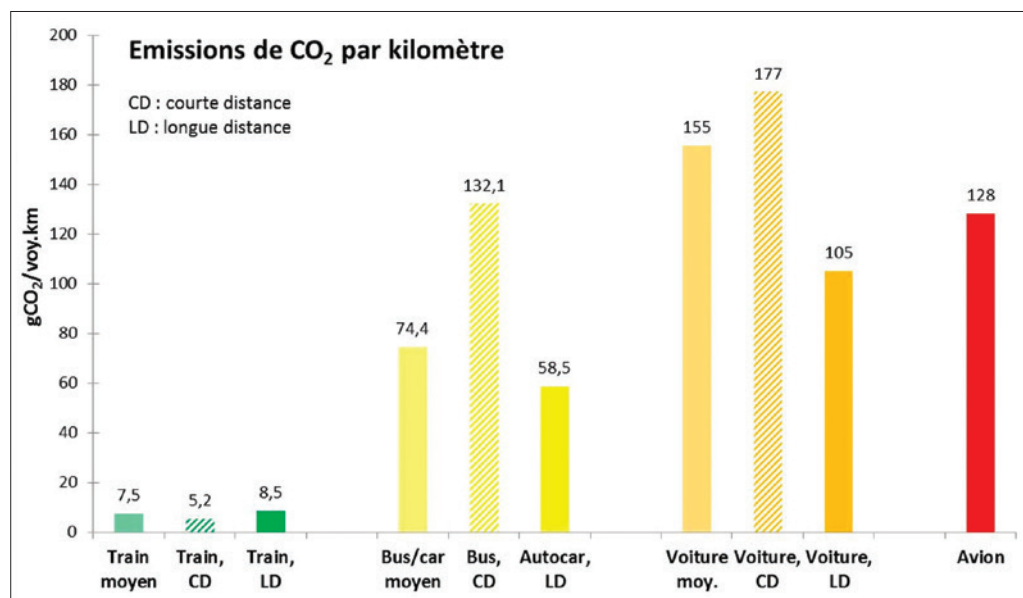


Figure 13

Émissions de CO₂ par kilomètre et par moyen de transport.

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

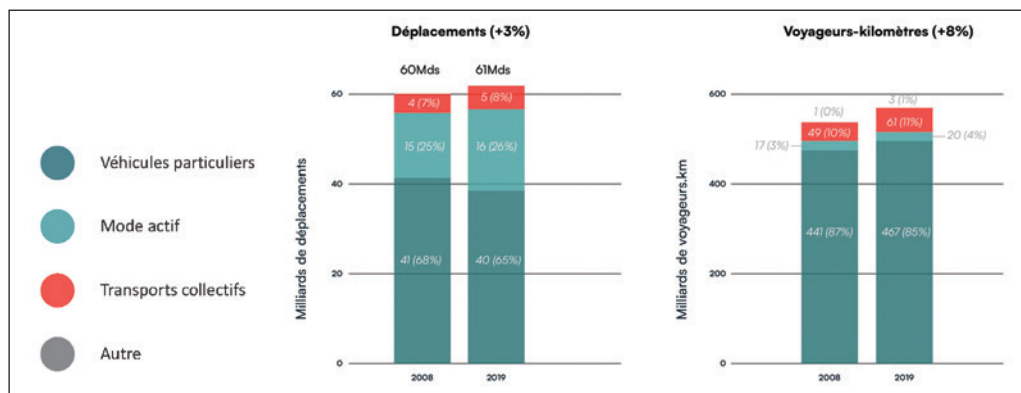


Figure 14

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.

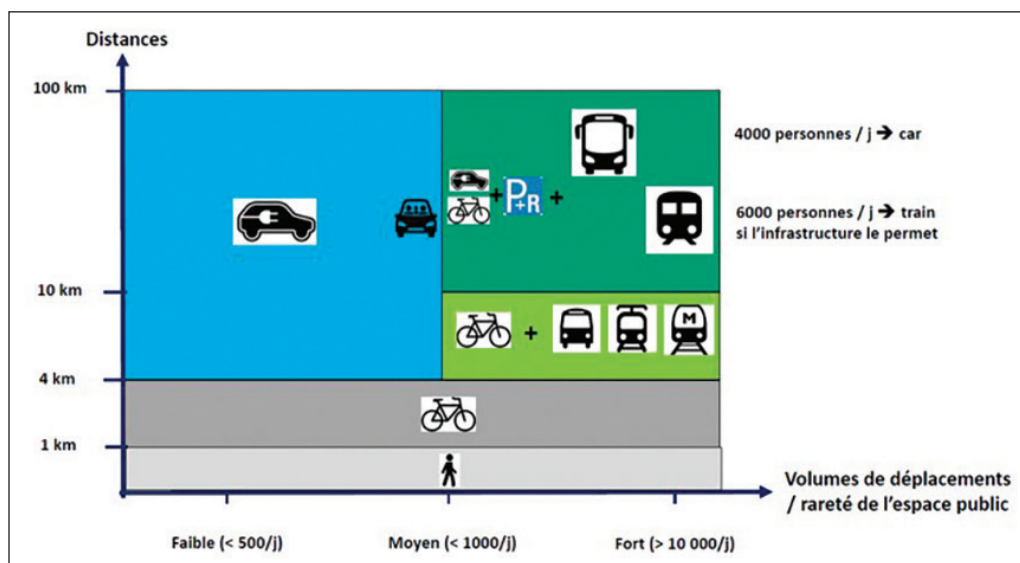


Figure 15

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.

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 16

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

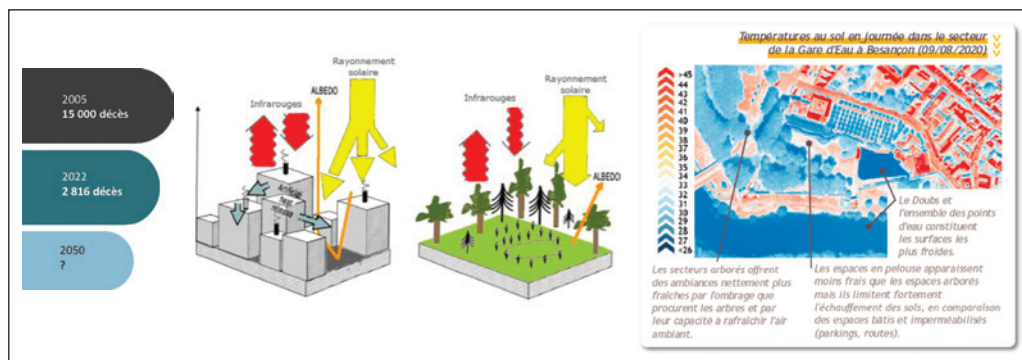


Figure 17

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.

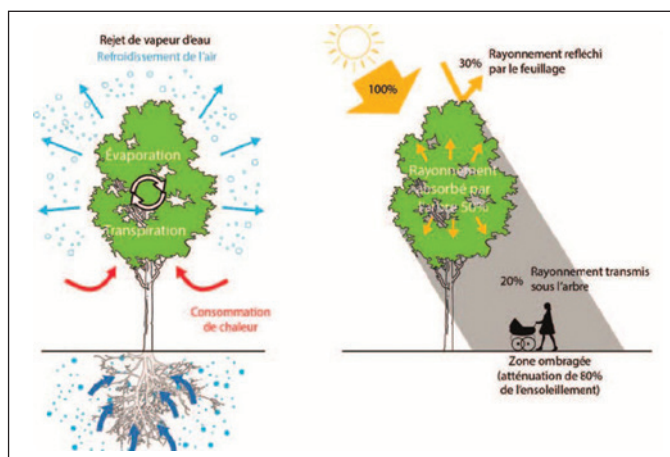
Grâce à la végétation, 80 % du rayonnement solaire incident est dissipé : d'une part, les arbres réfléchissent une partie de cette énergie vers le ciel, et d'autre part, ils génèrent de la fraîcheur par le processus d'évapotranspiration¹⁴ (**Figure 18**). Les arbres puisent

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.

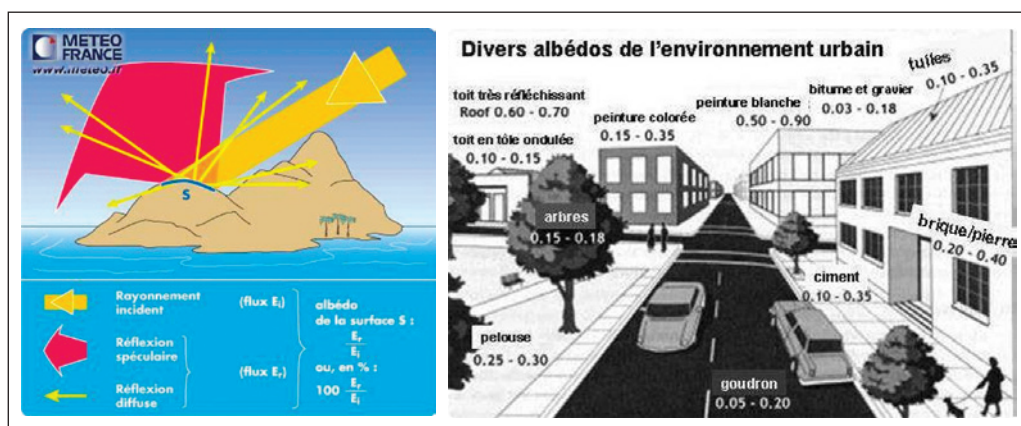


Figure 19

Rôle des matériaux : réflectance et albédo.

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

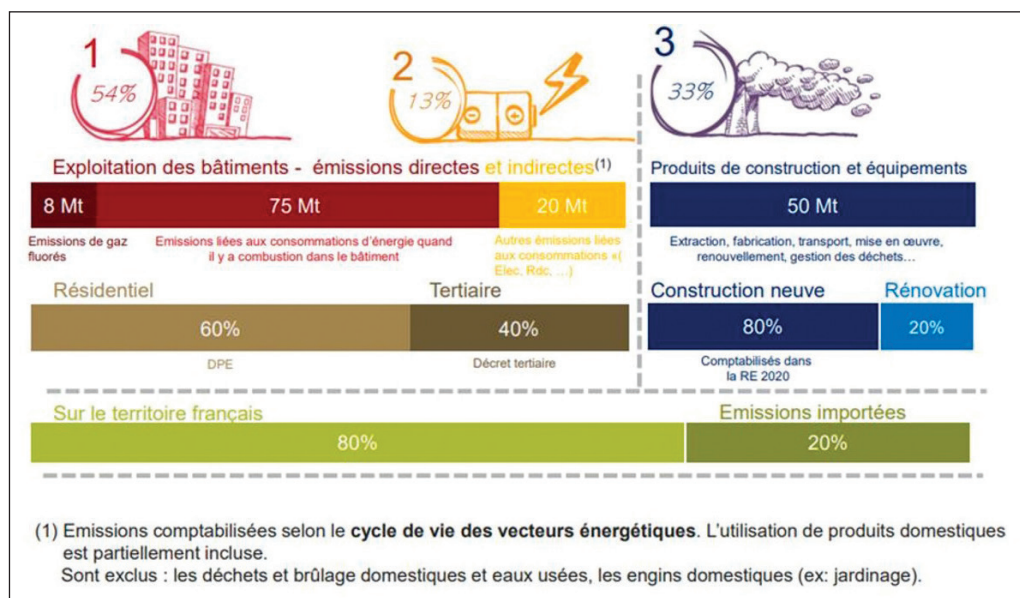


Figure 20

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,

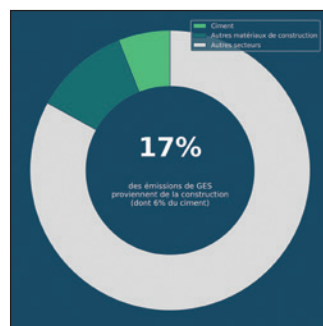


Figure 21

Émission de GES dans l'industrie de la construction.

Source : Cembureau.

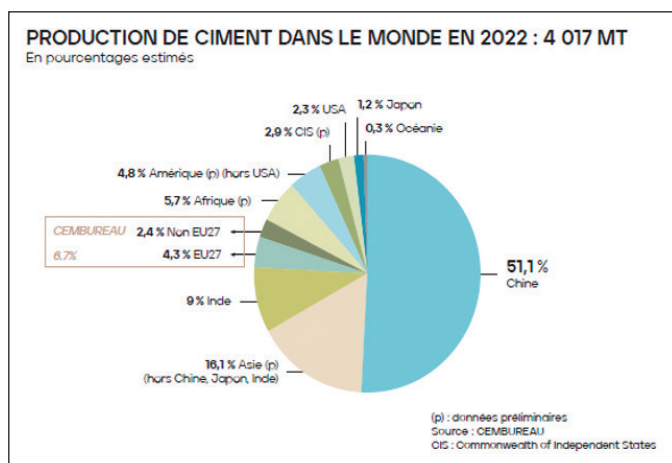


Figure 22

Production de ciment dans le monde en 2022.

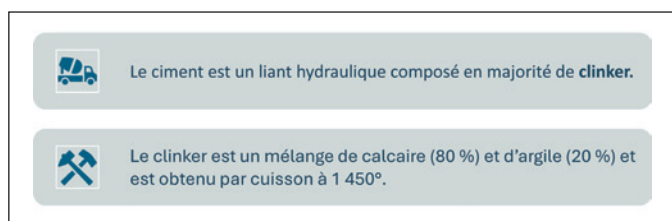


Figure 23

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.

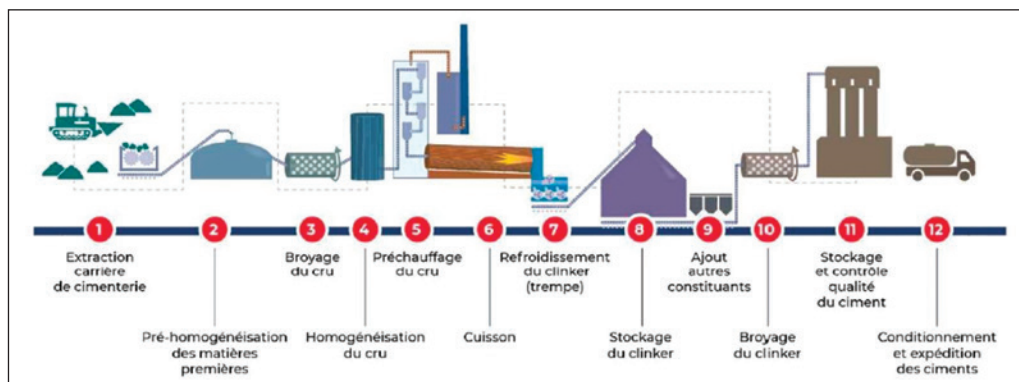


Figure 24

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.

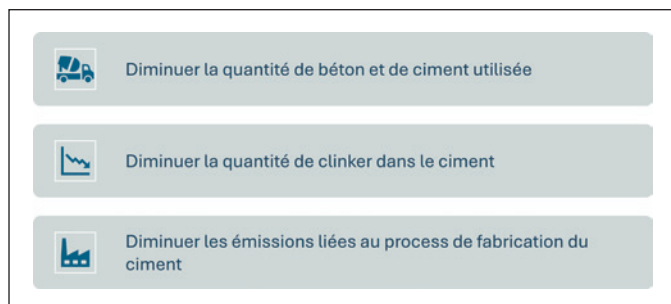


Figure 26

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

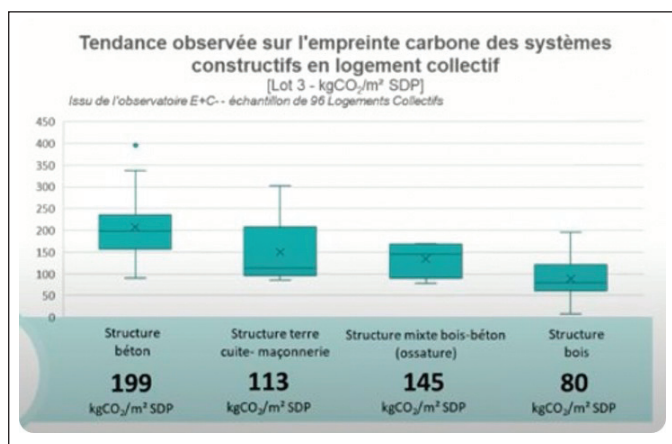


Figure 27

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

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

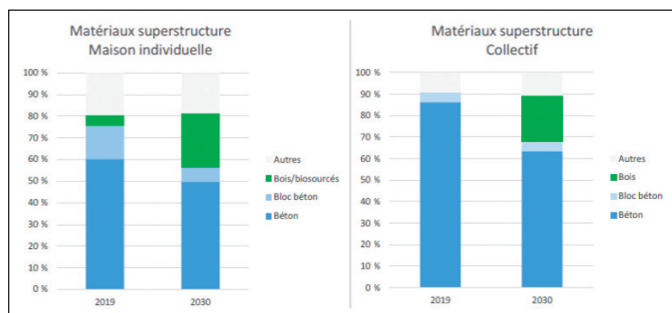


Figure 28

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

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

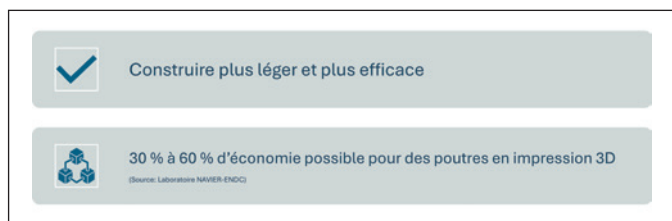


Figure 29

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.

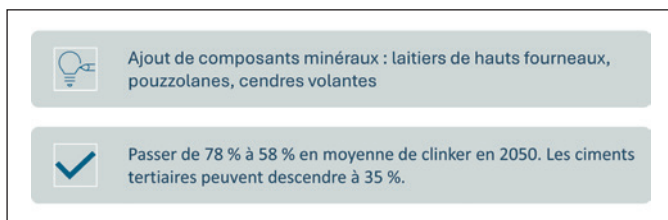


Figure 30

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

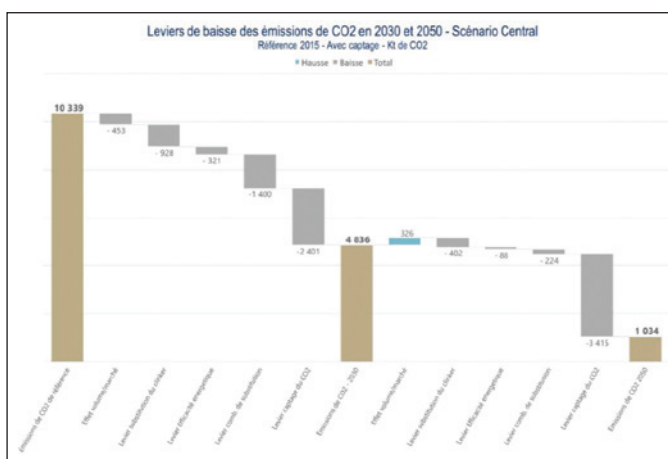


Figure 31

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

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

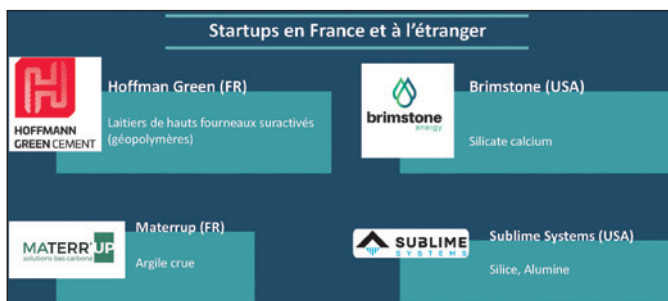


Figure 32

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 CO₂ 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 CO₂. *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.

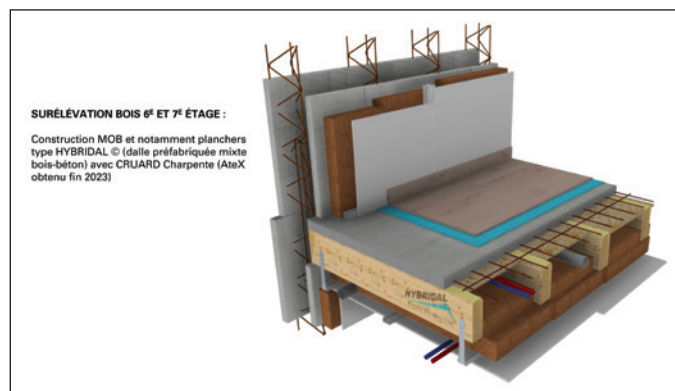


Figure 38

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 Bertièrre, 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

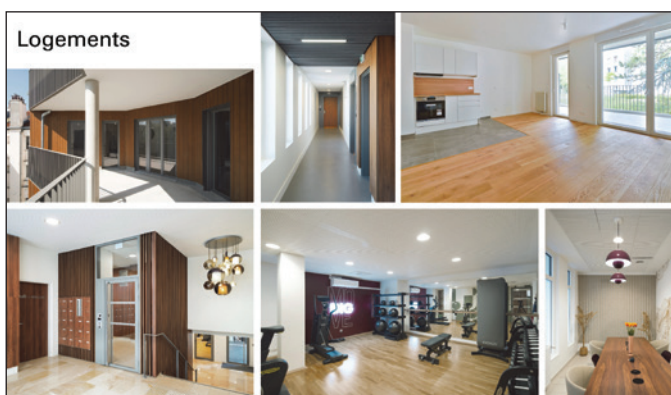


Figure 39

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.

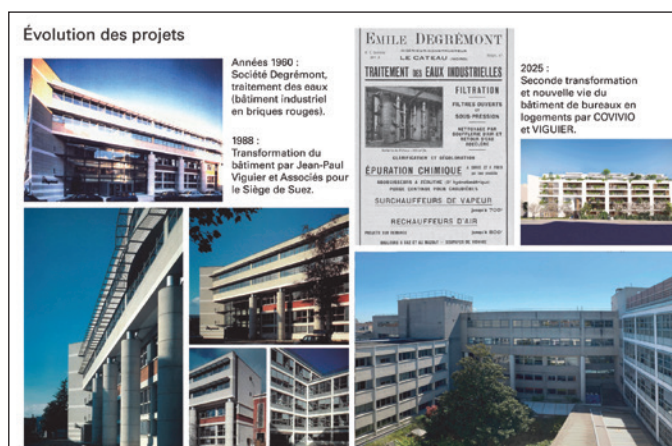


Figure 45

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

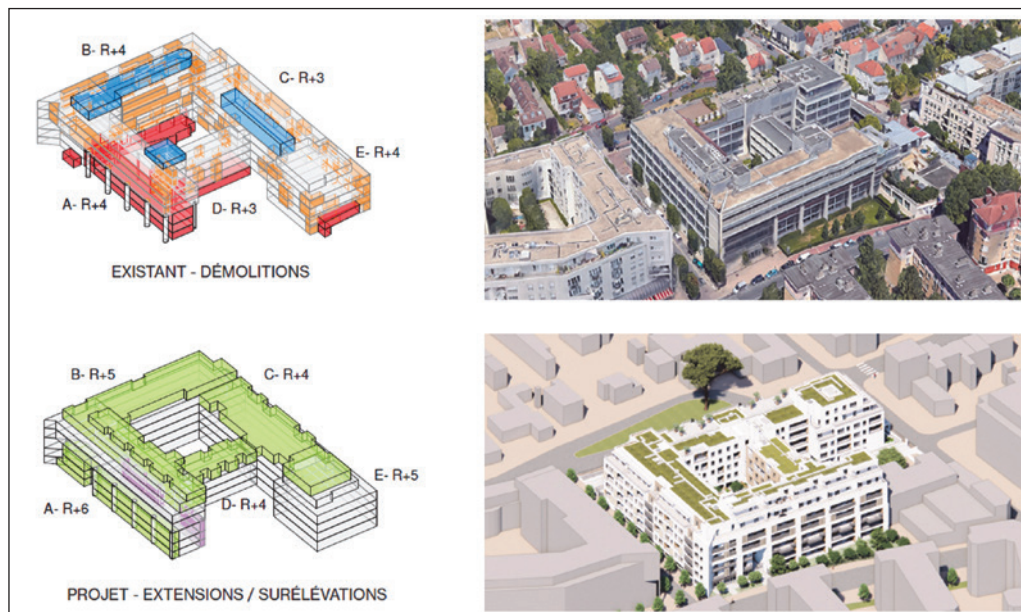


Figure 46

Démolitions et extensions/surélévations.

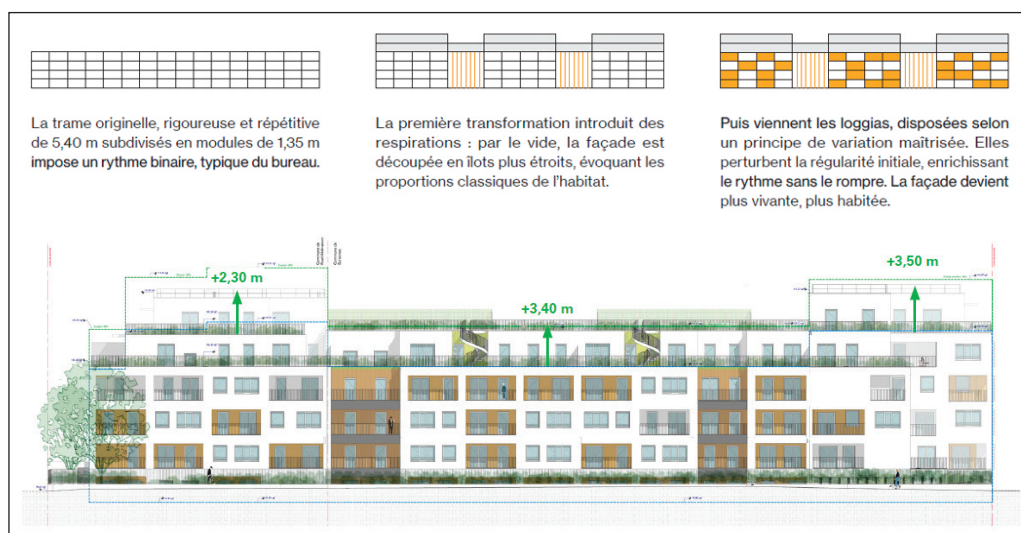


Figure 47

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.

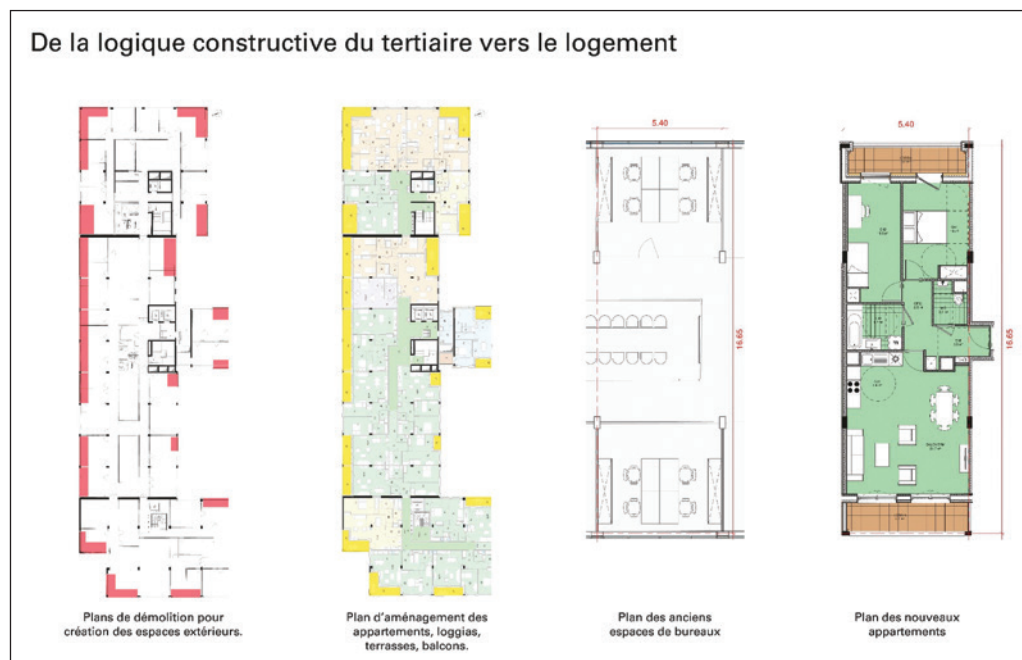


Figure 49

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 BBCA, (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

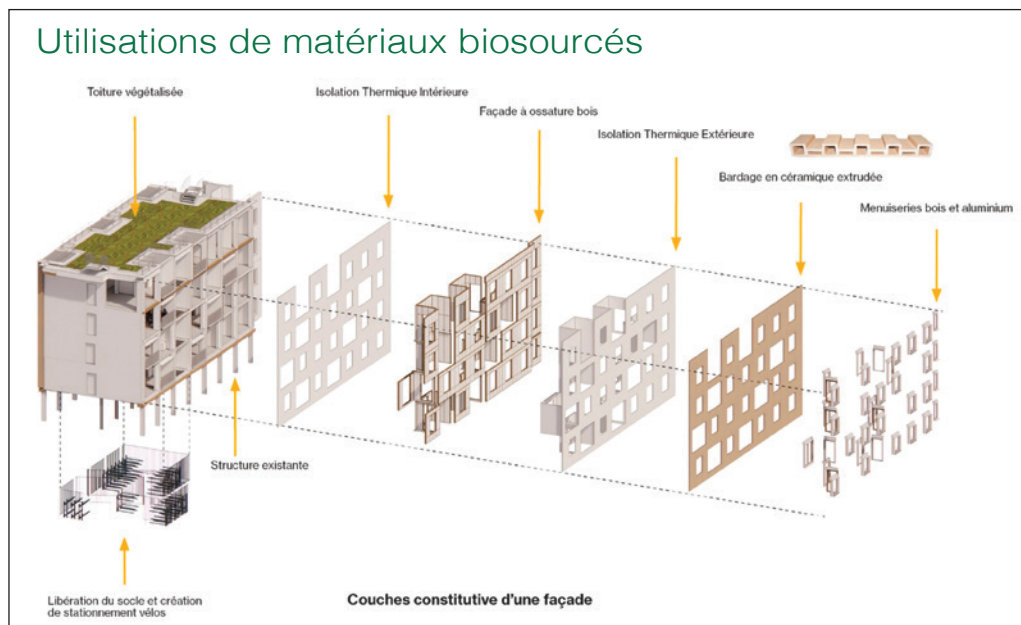


Figure 50

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.

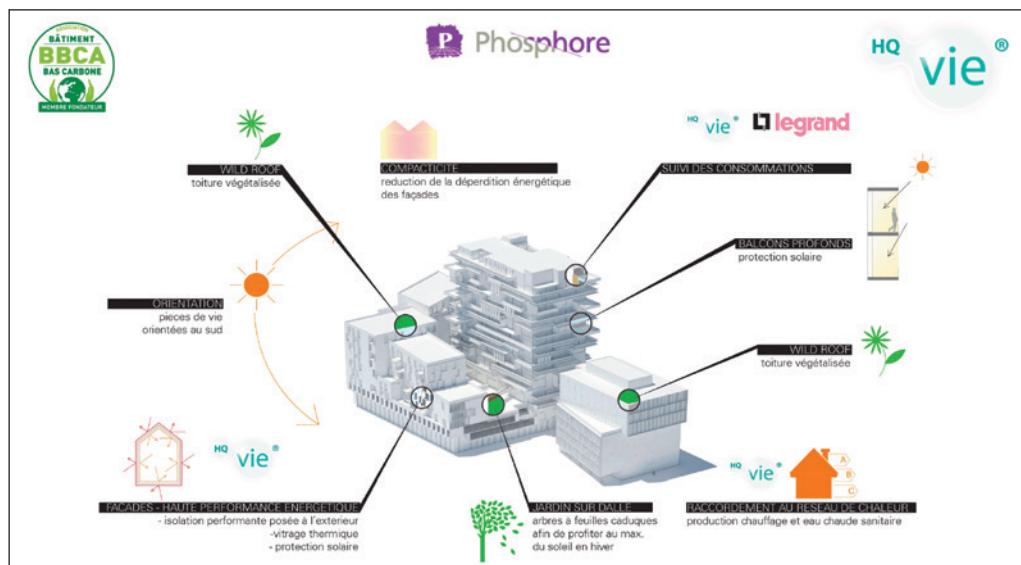


Figure 54

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.

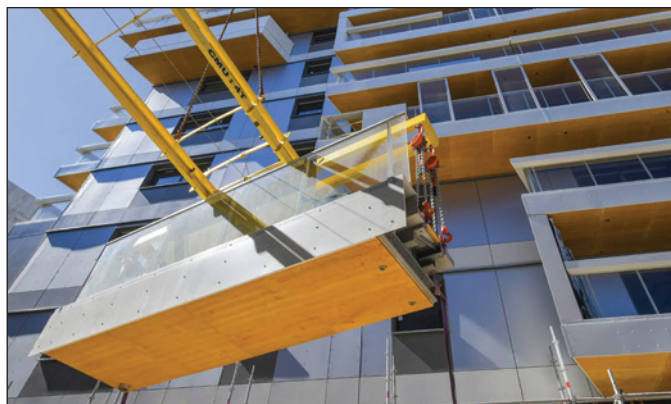


Figure 55

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.