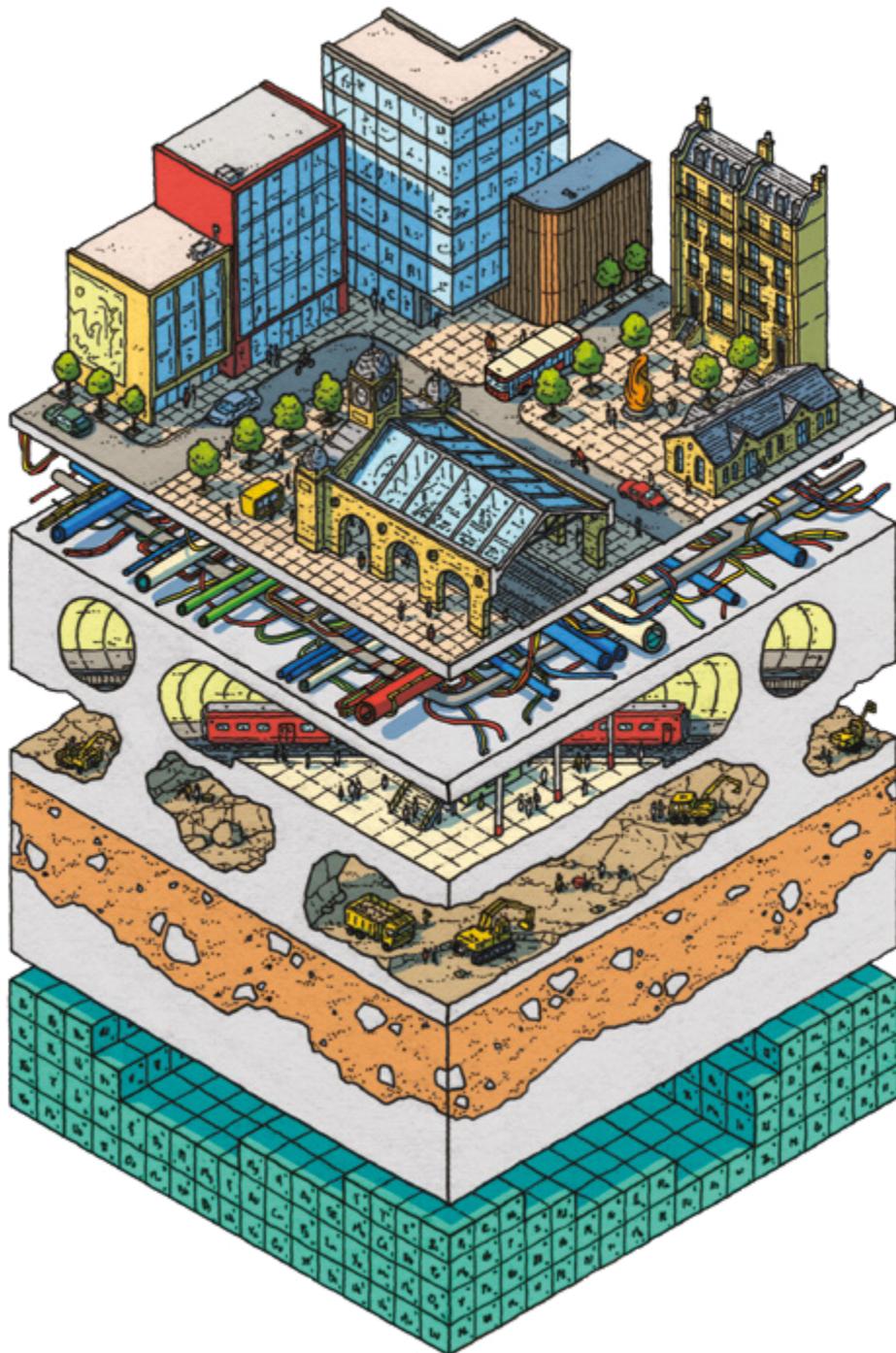


POST

n°2

Aux (res)sources de l'urbain



Matières du monde

Dix-huit mois après le lancement du premier numéro, c'est avec fierté et émotion (plus un certain soupir de soulagement et de contentement du devoir accompli) que nous vous présentons la nouvelle livraison de POST, la revue – pas tout à fait annuelle – d'AREP.

Dix-huit mois, c'est long! Et pendant que nous avançons avec opiniâtreté dans la construction, la rédaction et la mise au point de ce numéro, nous avons vu passer, pêle-mêle, la fin de l'abondance et de l'insouciance, l'émergence de la sobriété comme levier incontournable de la transition énergétique dans le débat public, le chauffage à 19°C, les épisodes de sécheresse et les incendies, le nouveau rapport du GIEC... le tout à un rythme effréné, auquel il faudra néanmoins s'habituer.

Nous avons choisi cette fois-ci de consacrer le dossier principal aux ressources matérielles, celles que nous extrayons, transformons, mettons en œuvre, stockons, recyclons parfois – pas assez! – pour construire nos infrastructures et habiter nos villes. Celles et ceux qui font partie d'AREP, ou qui la fréquentent comme partenaires, clients, fournisseurs ou camarades de débat intellectuel, connaissent notre attachement quasi viscéral à cette problématique passionnante: la matière, c'est le «M» de notre méthodologie EMC2B, boussole qui doit nous guider dans toutes nos réflexions, nos décisions, nos façons d'aborder et de concevoir les projets et les missions d'accompagnement.

Nous espérons que vous prendrez plaisir à parcourir avec nous, entre autres et dans le désordre, les arcanes du tableau de Mendeleïev et des métaux rares dissimulés dans les constructions, la face cachée des déchets du BTP, les oscillations historiques entre pénurie et abondance, à faire le point sur les ténus espoirs de ciment «bas carbone», sur le développement des biomatériaux et les expériences de construction en terre crue, à explorer la matérialité sonnante et trébuchante d'internet, à comparer les «poids matière» de quelques architectes célèbres ou des différents véhicules et infrastructures de transport, à admirer les superbes photos d'exploitations minières d'Edward Burtynsky, à se projeter vers des horizons lointains dans le temps (peut-on concevoir un monde «sans pétrole et sans charbon»? avec le chercheur Julian Carrey) ou dans l'espace (avec l'astrophysicien Cyril Pitrou)...

Ce numéro 2 est aussi l'occasion de faire évoluer légèrement notre «maquette» et quelques rubriques. Un peu d'innovation incrémentale ne fait jamais de mal.

Nous avons notamment créé une rubrique POST Junior, car il faut aussi savoir parler aux enfants des sujets sérieux. Nous avons également ouvert les pages «fiction» aux étudiants d'écoles d'architecture, de design, d'ingénieurs et de sciences politiques, sous la forme d'un concours d'uchronie, à propos d'une bifurcation écologique qui aurait pu se produire dans le passé. Après quelques sueurs froides sur la composition du jury (merci à eux!), sur le nombre de candidats qui allaient effectivement s'inscrire, puis sur la qualité des propositions soumises... nous sommes plutôt satisfaits du résultat ! Bravo et merci à tous les participants en tout cas.

Enfin, nous avons aussi commencé à flirter avec la bande dessinée – ici autour du chantier hors norme de la gare St-Michel-Notre-Dame à Paris – un genre dont il n'aura échappé à (presque) personne qu'il peut donner de beaux succès de librairie, même lorsqu'on parle de sujets énergétiques complexes (cf. *Le monde sans fin* de Jean-Marc Jancovici et Christophe Blain).

La matière et ses enjeux énergétiques et environnementaux étant tout à fait dans notre «couloir de nage», nous avons été nombreux, chez AREP, à mettre directement la patte dans un certain nombre d'articles ou d'infographies... tout en essayant de conserver le subtil équilibre entre contributions internes et externes, entre regards d'experts et de praticiens et visions plus généralistes, qui avait fait la spécificité – et nous l'espérons la qualité – du premier numéro. Un immense merci, donc, à toutes les contributrices et tous les contributeurs, ainsi qu'à l'équipe de pilotage du projet.

Nous vous laissons maintenant plonger dans les matières du monde, bien loin des univers prétendument virtuels, à l'impact pourtant désespérément réel. Courage d'ailleurs! Il n'y a pas que des mauvaises nouvelles du front, puisqu'il semble que Meta soit en train de lever le pied sur les investissements dans son métavers maison; depuis l'automne, cet immense projet de transformation de la société donne des signes de faiblesse et pourrait bien tourner à la pantalonnade. Mais c'est pour mieux plonger dans l'IA qui connaît un coup de boost médiatique depuis le succès planétaire du robot conversationnel d'OpenAI. Nous-mêmes n'avons pas résisté à la curiosité de jouer un peu avec ChatGPT, comme vous le découvrirez...

Bonne lecture!

Raphaël Ménard
président du directoire d'AREP

Philippe Bihoux
directeur général d'AREP

À propos d'AREP

Fondée en 1997, AREP regroupe de multiples compétences en conception, urbanisme, design, ingénierie, programmation, flux, conseil et management de projet.

Dirigée par Raphaël Ménard depuis 2018, l'agence apporte des réponses concrètes aux enjeux majeurs de l'urgence écologique par sa démarche EMC2B et contribue à la recherche, au débat public et à l'évolution des pratiques par ses publications, notamment à travers sa revue POST. Implantée en France et à l'international, AREP compte près de 1 000 collaborateurs avec 30 nationalités différentes.

DIRECTION DE LA PUBLICATION
Raphaël Ménard
et Philippe Bihoux

DIRECTION ÉDITORIALE
Elise Dageons
et Philippe Bihoux

CONSEIL ÉDITORIAL
Olivier Cohen de Timary
(Socialter)

RÉDACTION EN CHEF
Lila Meghraoua (Socialter)

RESPONSABLES ÉDITORIALES
Morgane Delarc
et Sarah Moretti (AREP)

GESTION DE PROJET

Gaëlle Bon-Simonetti (Socialter)

DIRECTION ARTISTIQUE

Marine Benz (Socialter)

SECRETARIAT DE RÉDACTION

François de Monès (Socialter)

JOURNALISTES ET AUTEURS POUR CE NUMÉRO

Philippe Bihoux, Nora Bouazzouni, Youness Bousenna, Laurent Castagnède, Nicolas Celnik, Donatien Frobert, Vincent Gautier, Christelle Gilabert, Louise Jammot, Sophie Kloetzli, Blandine Laplace, Annabelle Laurent, Mathilde Lépine, Bastien Marchand, Lila Meghraoua, Raphaël Ménard, Romane Mugnier, Victoire Radenne, Sabine Thomas

RUBRIQUE COUP D'ŒIL (INFOGRAPHIES)

Atelier de cartographie de Sciences Po
Patrice Mitrano, Thomas Ansart, Benoit Martin, Antoine Rio

ILLUSTRATION DE COUVERTURE
Owen Pomery

ILLUSTRATEURS

Jeanne Detallante, Kévin Deneufchatel, Chester Holme, Raphaëlle Macaron, Miriam Persand, Emma Roulette, Katie Scarlett

PORTFOLIO

Edward Burtynsky

BD

B959

AVEC LA CONTRIBUTION DE

Sandrine Carré, Amandine Croutsche, Rémi Guers, Louise Jammot, Pascaline Joigny, Blandine Laplace, Nils Le Bot, Mathilde Lépine, Grégoire Robida, Xavier Verne, et l'ensemble des relecteurs et autres contributeurs AREP cités en fin de numéro.

RELATIONS PRESSE

comarep@arep.fr

DIFFUSION LIBRAIRIES

Pollen-Difpop

IMPRESSION

Imprimé en France
par Média Graphic (Rennes)

Papiers intérieur et couverture: Fedrigoni Freelifte Cento
Papier composé de 100 % de fibres recyclées, certifié FSC recyclé, entièrement biodégradable et recyclable. Imprimé avec des encres Led UV, sans vernis.



POST a été créé et conçu avec l'aide de Socialter, média indépendant.

POST, édité par AREP
Siège social:
16 avenue d'Ivry, 75013 Paris

ISBN: 978-2-494447-02-8
DÉPÔT LÉGAL: juillet 2023

©2023, AREP éditions.
Tous droits réservés
pour tous pays.

SOMMAIRE N°2 – 2023

08
Timbre-POST.
Symptômes et possibles
d'un monde (post-)carbone

10
Coup d'œil.
La réalité matérielle
du numérique

14
Entretien.
Ester van der Voet
et Helga Weisz,
« *Les matières premières
sont un angle mort
des politiques publiques* »

20
Glossaire.
Les mots de la matière

23
Les nouvelles du front.
On nous écrit de la planète
Tech...

DOSSIER

Aux (res)sources de l'urbain

28
**De Pline l'Ancien au Rapport
Meadows, une brève
histoire de l'alerte scientifique
et environnementale**

36
Le ventre de l'architecte

42
**Cabinet de curiosités.
Usages et formes
du tableau de Mendeleïev**

46
**La face cachée des déchets
du BTP : des pratiques
à transformer**

50
**Jean Souviron,
« *L'invention du vitrage
isolant est aussi
l'invention d'un déchet* »**

52
**En Gironde, une école
en terre crue veut être l'élève
modèle de l'écoconstruction**

58
**Le ciment bas carbone,
une solution béton ?**

62
**Atelier LUMA : designer
avec les matières locales**

66
**Cyril Pitrou,
« *Miser sur l'extraction
minière dans l'espace
est illusoire* »**

IMAGINAIRES

72
Portfolio.
Edward Burtynsky,
le photographe
lanceur d'alerte

78
**Le pavé dans l'Histoire,
de la *via Appia* à aujourd'hui**

80
**Le « match ressources »
des transports**

86
**Julian Carrey.
Quel monde sans pétrole
et sans charbon ?**

90
Concours

98
BD.
La nouvelle gare
Saint-Michel Notre-Dame

POST JUNIOR

104
**Le cycle de la canette
en aluminium**

106
L'histoire du gratte-ciel

108
**Fausse bonne idée :
chauffer l'extérieur
pour refroidir l'intérieur**

POINTS DE VUE

112
**Raphaël Ménard,
« *Comme en peinture,
l'architecture se bonifie
souvent avec le repentir* »**

116
Regards croisés

122
Lettre à un pote qui s'en fout

124
**Sabine Barles,
« *Le recyclage tel qu'il existe
est plutôt du sous-cyclage* »**

128
Pour aller plus loin

129
POST à la loupe

Timbre-POST

Symptômes et possibles d'un monde (post-)carbone

textes Lila Meghraoua

Entre 1970 et 2017, l'extraction de matières premières a triplé et serait responsable de 90 % de perte de biodiversité. Du reste, quelque 15 % des matériaux seraient «gâchés» lors du processus de construction.

Entre 20 et 30 % de ces déchets seraient recyclés ou réutilisés (Fondation Ellen MacArthur).

Alors «cuire, fuir ou agir»? C'est la question qui a habité l'actualité du post-carbone, ces 18 derniers mois.

Extraits d'actu.

Signes d'espoir

- Depuis 2021, Toulouse Métropole mène une bataille active en faveur du réemploi des matériaux de construction. Le programme Life Waste2Build incite via la commande publique le secteur du BTP à valoriser les matériaux disponibles et prêts au réemploi sur d'autres chantiers. En deux ans, raconte *Le Parisien*, 58 chantiers ont appliqué le principe du réemploi. L'agglomération va plus loin en lançant une plateforme numérique qui recense les matériaux de déconstruction, surplus ou fins de stock pouvant être cédés pour des projets. •

- Le premier acier décarboné en Laponie suédoise. Alors que la fabrication traditionnelle de cet alliage nécessite du coke de charbon pour éliminer l'oxygène du minerai de fer, l'industriel SSAB pourrait changer la donne avec son usine pilote HYBRIT. Développée avec le fournisseur d'électricité Vattenfall et LKAB, le premier producteur de minerai de fer européen, l'usine expérimente un procédé qui utilise beaucoup moins d'énergie fossile: le charbon est remplacé par de l'hydrogène et de l'eau est rejetée à la place du CO₂. Un projet qui pourrait

métamorphoser une industrie responsable au niveau mondial de 7 à 9 % des émissions totales de CO₂. SSAB prévoit de commercialiser cet acier «vert» dès 2026. •

Le plan «Grand chaud»

Après six mois de travail et de discussions, la mission d'information et d'évaluation «Paris 50°C» portée par des élus parisiens a remis le 14 avril dernier à la Mairie de Paris un rapport contenant 85 recommandations visant à adapter la capitale au changement climatique. Parmi elles, figure la mise en place d'un plan «Grand chaud», sur le modèle du plan «Grand froid». Le rapport suggère ainsi la cartographie des «lieux rafraichis» parisiens. Les stations de métro fantômes ou les arcades des grandes surfaces pourraient servir de refuge pour les sans-abris, particulièrement exposés lors des épisodes de canicule. Le groupe d'élus préconise également de renforcer la protection des arbres remarquables, en interdisant leur abattage. Ces arbres anciens génèrent en effet plus d'ombre et sont de véritables îlots de fraîcheur. •

Prix des matériaux : stop ou encore ?

Fin janvier dernier, le ministre de l'Économie Bruno Lemaire annonçait un Observatoire des prix des matériaux de construction, un outil d'analyse des coûts de production, piloté par l'Insee. L'objectif? Permettre aux entreprises

d'établir leur devis en toute connaissance des prix finaux. Un premier indice devait être publié en avril. Problème: les industriels de la construction n'auraient à ce stade pas joué le jeu en se gardant d'envoyer leurs chiffres à l'Insee, a alerté Bruno Lemaire. Une incitation supplémentaire à «booster» le réemploi des matériaux et équipements existants?

RE2020 : quoi de nouveau ?

Une conférence en ligne organisée par le Conseil national de l'Ordre des architectes et dont les conclusions ont été relayées par le média *Batiactu*, s'interroge sur la mise en place de RE2020, et ses enjeux, un an après son entrée en vigueur. Si respecter l'ensemble des indicateurs de la RE2020 relève de «la quadrature du cercle», pointe Nathalie Tchang, présidente du bureau d'études Tribu Énergie, il n'y a pas de réelle difficulté à bâtir de manière traditionnelle, moyennant l'utilisation de matériaux moins carbonés. Mais aussi en faisant appel au réemploi, explique l'ingénieur-architecte Guillaume Meunier. Pour l'architecte Pascal Gontier, l'introduction de l'ACV – analyse du cycle de vie – est une chance qui «booste la commande» des projets vertueux. Mieux, elle représente un gain de temps. «Il faut que l'on s'approprie et que l'on acquiert des réflexes sur l'ACV comme on les a acquis sur l'énergie», conclut Guillaume Meunier. •

Le déclin de la maison individuelle ?

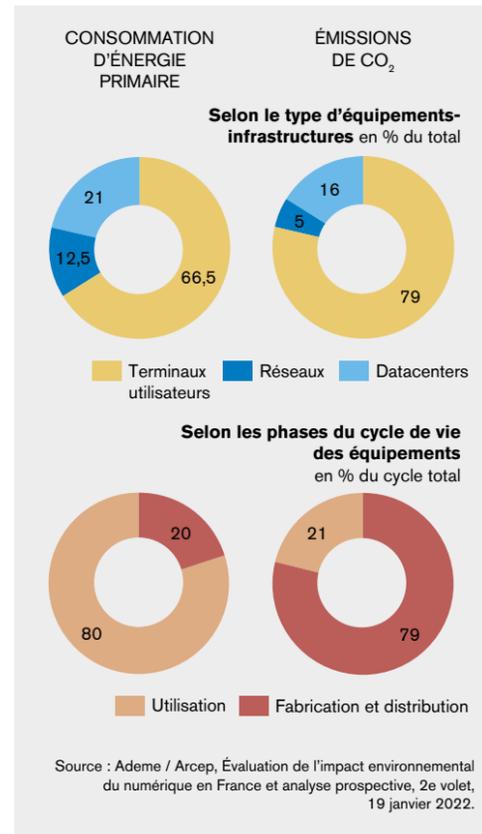
En 2021, la construction de maisons neuves avait augmenté de 22%. Pour le secteur, la période des vaches grasses de l'après-confinement semble terminée. La Fédération du bâtiment s'est inquiétée d'«un bilan catastrophique» du secteur. Pour cause, le marché aurait accusé en 2022 un recul de 31%, passant sous la barre des 100 000 maisons neuves. La faute, d'abord, à des taux d'intérêt des crédits immobiliers particulièrement élevés, et pas encore au principe de ZAN (zéro artificialisation nette) posé par la loi climat et résilience d'août 2021, à peine en place et déjà décriée. D'ici 2030, les maires devront réduire dans leurs communes par deux la consommation de terrains. Alors que la demande pour ce type d'habitat reste forte, le nouveau modèle de développement urbain reste à inventer. •

Coup d'œil

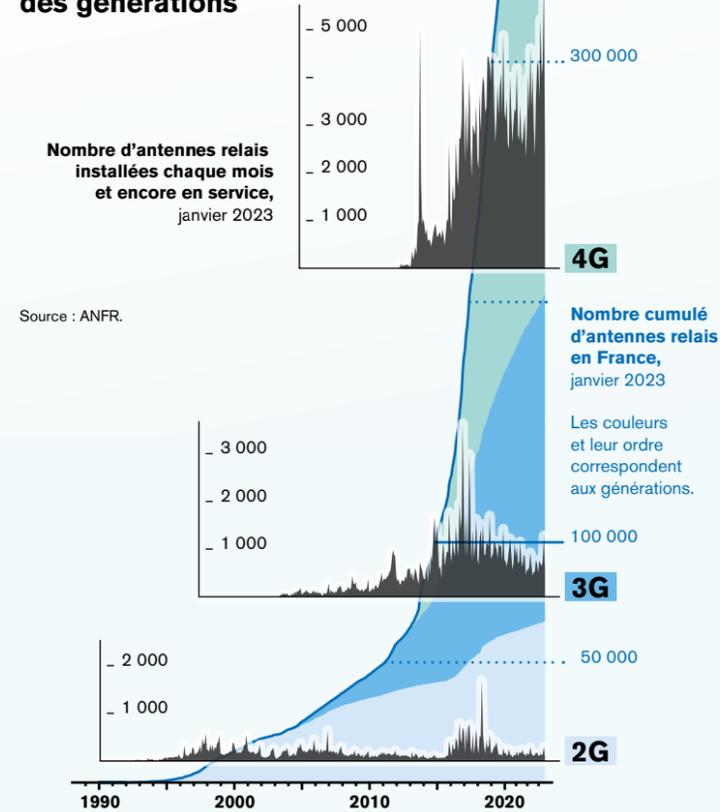
Par L'Atelier de cartographie de Sciences Po
Patrice Mitrano, Thomas Ansart, Benoit Martin et Antoine Rio

Câbles, data centers, antennes relais, satellites, métaux... Le numérique a une réalité matérielle. La preuve en sept visuels.

Impacts du numérique en France, 2020



Antennes relais en France : la grande accumulation des générations



Câbles et data centers : le cas de la France

Câbles à fibre optique en activité, janvier 2023

- sous-marins
- terrestres
- appartenant à un ou plusieurs GAFAM

Data centers hébergeurs*, janvier 2023

Effectif par ville ou métropole

Effectif	Nombre de villes
49	1
9	3
3	9
1	49

* ou data centers en collocation, mis à disposition par un opérateur à ses clients.

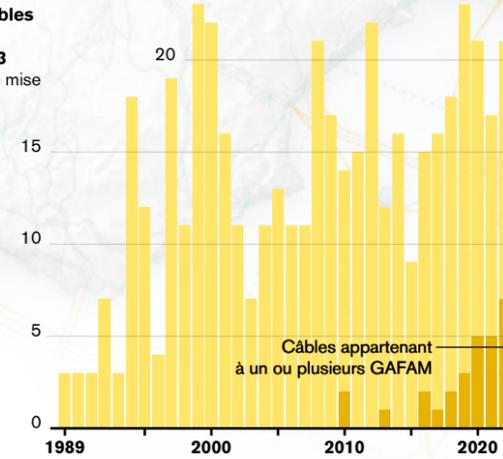
Sources : Union internationale des télécommunications, TeleGeography ; Data Center Map.

Ancienneté des câbles à fibre optique sous-marins en activité dans le monde

Nombre de câbles en activité en janvier 2023

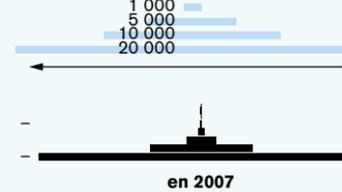
selon l'année de mise en service

Source : TeleGeography.



Concentration des antennes relais sur les supports en France

Nombre de supports, janvier 2023



Lecture : en 2023, la majorité des supports (plus de 7 600) ont 6 antennes

Nombre d'antennes relais par support, janvier 2023

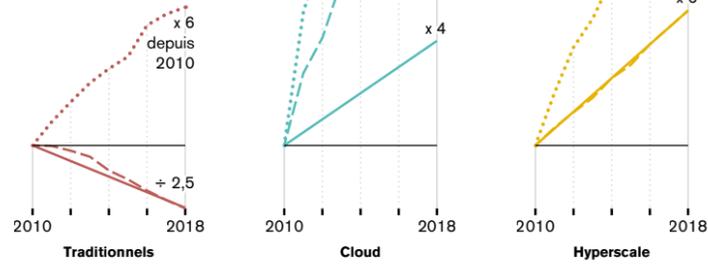
Source : ANFR.

Data centers dans le monde : effectif, stockage et consommation d'énergie

Ces données reposent sur des estimations de E. Masanet et al. (2020). Elles ne prennent pas en compte le minage de cryptomonnaie.

Évolution par type de data center, sous forme d'indice (valeur 1 en 2010), échelle logarithmique

----- Capacité de stockage
 --- Nombre de serveurs
 — Consommation d'énergie



Gérés et exploités par des organisations pour leurs besoins internes, ces data centers sont généralement hébergés par ces mêmes organisations. Cette catégorie inclut les data centers hébergés, mis à disposition par un opérateur à ses clients.

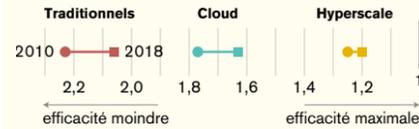
Fournissant des services informatiques à la demande sous forme de cloud computing, ces data centers sont souvent exploités par des fournisseurs de services cloud tels que Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure ou Google.

Installations de grande envergure regroupant des milliers de serveurs pour répondre à des besoins massifs de traitement de données, à la demande. Souvent utilisés pour le machine learning ou la modélisation, ils offrent une haute disponibilité.

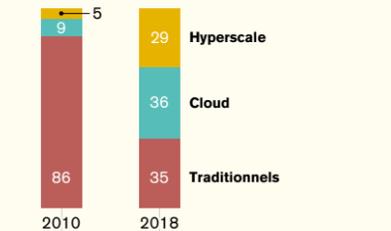
Source : E. Masanet et al., *Recalibrating global data center energy use estimates*, Science, Vol. 367, N° 6481, 2020.

Le PUE (Power Usage Effectiveness) est un indicateur mesurant l'efficacité énergétique d'un data center. C'est le rapport entre la consommation totale d'énergie du data center (équipements informatiques et systèmes de refroidissement) et la consommation d'énergie des seuls équipements informatiques (serveur, stockage, réseau). Dans le cas idéal (PUE de 1), la totalité de l'énergie consommée par le data center est utilisée pour ses équipements informatiques.

Évolution du PUE par type de data centers



Consommation énergétique par type de data centers, hors cryptage, en part du total (%)

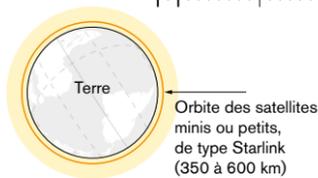


tous types confondus, en térawatt-heure



Constellations de satellites en orbite basse fournisseurs d'accès à internet

orbite basse 0 2 000 km orbite moyenne 35 786 km

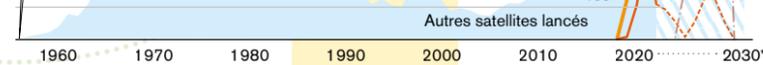


Orbite des satellites minis ou petits, de type Starlink (350 à 600 km)

Orbite des satellites géostationnaires

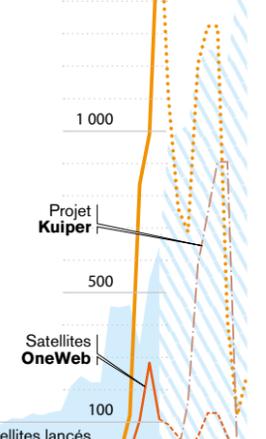
Nombre de satellites artificiels lancés chaque année, 1957-2022

1957, **Sputnik 1** premier satellite artificiel lancé



En mars 2023, seuls Starlink (SpaceX) et OneWeb (Eutelsat) sont en service ; Kuiper (Amazon), Lightspeed (Telesat) ou Iris² (UE) seront déployés dans les années à venir. **Ce seront donc** bientôt des dizaines de milliers de satellites situés en orbite basse.

Au cours de l'année 2022, SpaceX a lancé 1 720 satellites (Starlink)



Les courbes ci-contre montrent le flux des lancements de satellites : tous ne sont pas fonctionnels car leur durée de vie est environ de 15 ans (mais 5 ans pour Starlink). Le renouvellement du matériel existant se combine avec l'expansion d'activités économiques nouvelles.

Ces milliers de satellites constituent donc autant de déchets de tailles diverses (de la poussière à celle d'un bus) dont la régulation internationale commence seulement à être envisagée.

*Projections 2023-2030 d'après Le Monde (« Derrière le Starlink d'Elon Musk, la bataille des constellations de satellites », 13 déc. 2022), à partir d'Euroconsult, Bryan, Garnier & Co.

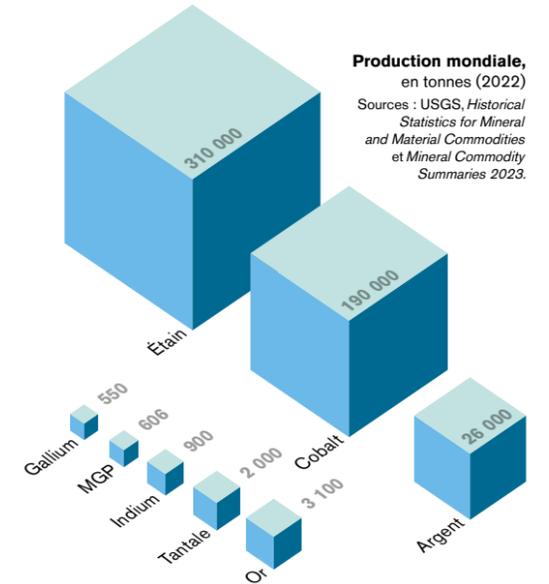
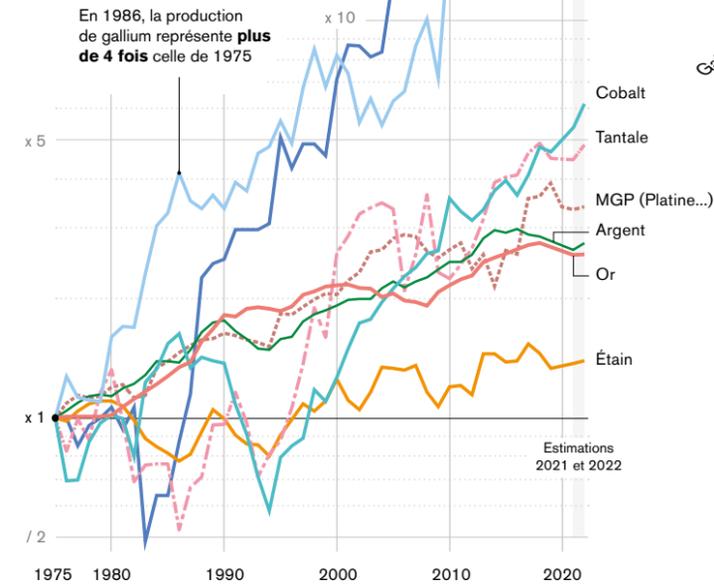
Sources : UNOOSA *Online Index of Objects Launched into Outer Space*, consulté le 27 mars 2023.

© Atelier de cartographie / Sciences Po, 2023

Les métaux dans les TIC : volumes, usages et origines

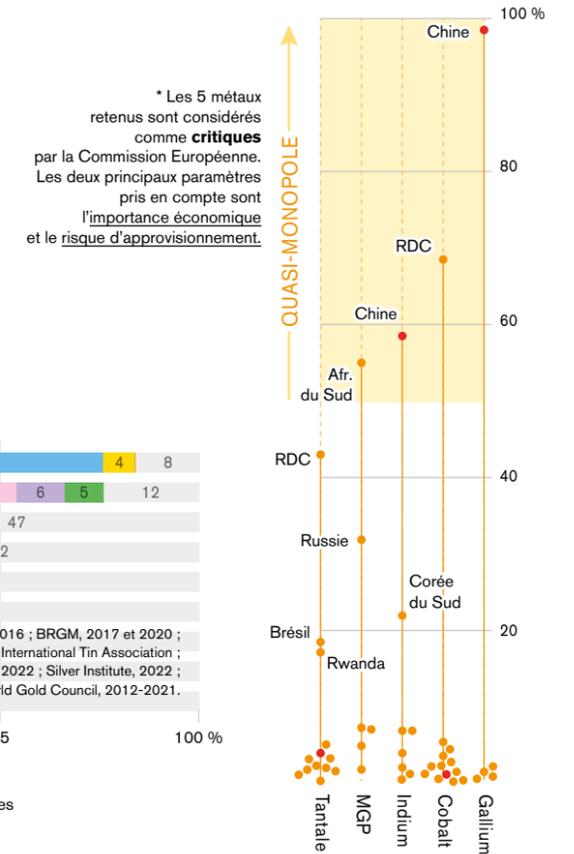
Évolution de la production mondiale d'une sélection de métaux, (1975-2022) sous forme d'indice (valeur 1 en 1975), échelle logarithmique

En 1986, la production de gallium représente **plus de 4 fois** celle de 1975



Production mondiale, en tonnes (2022)
 Sources : USGS, *Historical Statistics for Mineral and Material Commodities and Mineral Commodity Summaries 2023*.

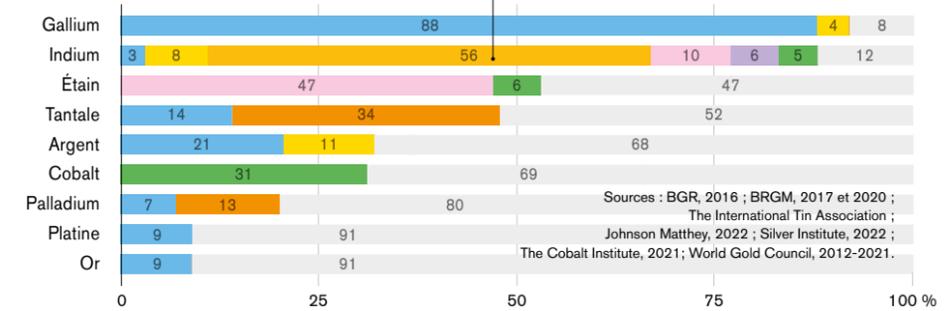
D'où proviennent les métaux ? origine géographique et part de la production (2022)



* Les 5 métaux retenus sont considérés comme **critiques** par la Commission Européenne. Les deux principaux paramètres pris en compte sont **l'importance économique** et le **risque d'approvisionnement**.

Utilisations des métaux dans les TIC et les technologies innovantes, en % de la consommation totale de chaque métal

La production d'écrans tactiles absorbe **56 % de l'Indium consommé** dans le monde



Électronique, Photovoltaïque, Matériaux interfaces thermiques, Écrans tactiles, Condensateurs, Piles et batteries, Soudures, Autres usages

Sources : BGR, 2016 ; BRGM, 2017 et 2020 ; The International Tin Association ; Johnson Matthey, 2022 ; Silver Institute, 2022 ; The Cobalt Institute, 2021 ; World Gold Council, 2012-2021.

ENTRETIEN

« *Les matières premières sont un angle mort des politiques publiques* »

Ester van der Voet et Helga Weisz

propos recueillis par Nicolas Celnik
illustration Jeanne Detallante

Réfléchir à une meilleure utilisation des ressources est un impératif environnemental. C'est la mission de l'International Resource Panel, un groupe d'experts des Nations unies.



Chaque jour, des milliers de tonnes de matières premières transitent par les villes, sont utilisées, rejetées, ou entreposées dans un coin et oubliées. Extraire ces ressources est souvent une opération polluante; assumer leur fin de vie aussi. Pour planifier des modèles de société plus soutenables, l'International Resource Panel (IRP), un groupe d'experts réunis par les Nations unies, étudie l'utilisation de ces matières premières. Ester van der Voet, professeure associée à l'université de Leyde, conseille le gouvernement néerlandais sur les « mines urbaines », ces gisements de ressources qui attendent leur heure dans les métropoles. Helga Weisz est professeure au Potsdam Institute for Climate Research et spécialiste du « métabolisme urbain ».

Qu'est-ce que l'International Resource Panel, et quelles y sont vos missions ?

Ester van der Voet: L'IRP est un programme des Nations unies créé en 2007, qui réunit un panel d'experts pour donner des recommandations sur l'utilisation des ressources à travers le monde, la manière dont elles sont extraites, gérées et traitées en tant que déchets. Il s'agit d'une mission essentielle, car les matières premières sont souvent un angle mort des politiques publiques. Par ailleurs, nous travaillons toutes les deux sur l'écologie industrielle, qui vise à réduire l'impact de l'extraction des ressources sur la société et l'environnement. Mon expertise concerne surtout le métal, et j'accompagne l'IRP dans la rédaction de scénarios prospectifs.

Helga Weisz: En ce qui me concerne, j'essaie en ce moment de définir ce que nous entendons par un usage « durable » des ressources, qui irait au-delà de la notion incomplète de découplage [qui désigne la possibilité de maintenir une croissance économique tout en réduisant l'empreinte carbone des productions – pour l'heure un objectif mais pas une réalité]. Je m'intéresse également au secteur minier et à la manière de le rendre le moins impactant possible pour l'environnement compte tenu de nos besoins. Certains métaux sont essentiels pour décarboner le système énergétique, comme le cuivre car il est un excellent vecteur d'électricité: il faut donc penser à la manière de l'extraire en polluant le moins possible.

Quelles sont les principales ressources qui entrent et sortent d'une ville ?

HW Les ressources utilisées varient beaucoup selon qu'il s'agit d'un pays industrialisé ou d'un pays moins développé. Dans les pays industrialisés, la ressource entrante et sortante principale sera toujours l'eau, nécessaire à tous types d'usages. Les autres matériaux essentiels sont ceux qui servent à la construction d'infrastructures: le béton, l'acier, le verre, les granulats, les sables, etc.

Comment réduire les volumes de ressources utilisées ?

EvdV C'est un élément auquel il faut prêter tout particulièrement attention: les ressources sont utilisées pour une fonction

essentielle, et, bien souvent, on ne peut pas s'en passer. L'un des objectifs de développement durable (ODD) est de parvenir à zéro émission de gaz à effet de serre. Mais arrêter d'utiliser les matières premières est absolument impossible!

HW Il faut plutôt réfléchir à la manière de répartir leur utilisation, et trouver un juste équilibre entre surconsommation, qui implique du gâchis, et sous-consommation, qui limite les potentiels de développement. Par ailleurs, l'un des enjeux ici est plutôt de définir qui a besoin de ressources, et qui en utilise déjà trop et pourrait réduire sa consommation. Par exemple, on utilise 80% de nos terres agricoles pour produire de la viande [selon un rapport de Greenpeace publié en 2018], qui est principalement consommée par les personnes les plus aisées, tandis que 828 millions de personnes souffrent de la faim dans le monde. Il serait donc possible de réduire les terres et les ressources mobilisées pour l'élevage. Par ailleurs, il y a une tendance, dans les pays développés, à vivre dans des domiciles de plus en plus grands: cela augmente la consommation de matières premières et d'énergie pour les usages domestiques. Il faut commencer par penser à cette répartition des ressources avant de chercher, par des mesures techniques, à optimiser leur utilisation.

Vous parlez de « métabolisme urbain »: que désigne cette expression ?

HW L'idée du « métabolisme urbain » est de comprendre la chaîne d'approvisionnement d'une ville à la manière d'un métabolisme vivant, de sorte à déterminer ce qui est essentiel à leur chaîne d'approvisionnement, et ce qui est inutile. On me demande souvent si les villes devraient être autosuffisantes en termes de ressources: je crois que c'est une mauvaise manière de cadrer le problème. Des villes qui viseraient l'autosuffisance (et pourraient produire une partie de leur nourriture ou de leur énergie) seraient beaucoup plus étalées, provoqueraient beaucoup plus d'artificialisation des sols, seraient moins efficaces d'un point de vue énergétique...

Comment est-il possible de réduire la consommation de ressources dans des secteurs comme le BTP, gourmand en énergie et responsable

« Il faut commencer par penser à cette répartition des ressources avant de chercher, par des mesures techniques, à optimiser leur utilisation. »



The Weight of Cities: Resource Requirements of Future Urbanization.
A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. IRP (2018)



Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future.
A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. IRP (2020)

de 23% des émissions de gaz à effet de serre de la France ?

EvdV D'un point de vue technique, beaucoup de choses sont faisables. Il y a des technologies pour recycler le béton, afin de produire du béton recyclé de bonne qualité. Ces techniques sont aujourd'hui un peu plus coûteuses que la fabrication de béton neuf, mais on peut penser qu'elles vont devenir rentables très prochainement. Cependant, il y a plusieurs freins qui limitent le développement de ces pratiques. Pour commencer, il existe de nombreuses réglementations qui encadrent l'usage du béton recyclé. Ensuite, le secteur du BTP est très frileux: ils ont leurs propres standards, et ne sont pas pressés d'en développer de nouveaux (*lire page 58*). Les constructeurs préfèrent utiliser du béton neuf parce qu'ils y sont plus habitués, et qu'ils en connaissent déjà la qualité. L'acier, lui, est déjà largement recyclé.

HW On observe également un intérêt croissant pour des matériaux de construction alternatifs comme le bois. On sait que le bois stocke le carbone. Or, si on l'utilise pour la construction, le bois continue de stocker le carbone pendant longtemps – à l'inverse, lorsqu'on brûle du bois pour en faire de l'énergie, le carbone qu'il a stocké est relâché dans l'atmosphère. Il faut toutefois examiner les externalités négatives de l'utilisation de ce matériau – utiliser trop de bois risque de faire pression sur les forêts, etc.

Que sont les « mines urbaines », et comment permettraient-elles de repenser l'utilisation des ressources ?

EvdV L'idée des mines urbaines est de considérer les matériaux déjà extraits et qui sont utilisés, ou ont été utilisés, comme des gisements de ressources. Il s'agit de « stocks en hibernation », des matériaux qui peuvent être utilisés en plus des stocks déjà considérés en tant que tels. Par exemple, on peut penser à des tuyaux de gaz qui ne servent plus; des câbles d'électricité ou de télécommunications, qui seraient une source de cuivre importante; les composants électroniques dans nos mobiles qui dorment au fond de nos tiroirs. Ce sont des stocks importants, et qui ne sont pas pris en compte dans les statistiques: on ne trouve pas facilement d'informations à leur propos. Si l'on espère développer leur

utilisation, une première étape est d'en réaliser un inventaire bien plus précis. On peut prévoir de réutiliser certains des matériaux qui composent aujourd'hui notre système d'énergies fossiles, qui va devenir obsolète dans le cadre d'une transition énergétique. C'est déjà le cas pour le système de distribution du gaz aux Pays-Bas: il y a des kilomètres de tuyaux qui attendent leur heure dans nos sous-sols, déjà inactifs, dont on pourrait utiliser les matériaux, ou que l'on pourrait utiliser pour transporter d'autres choses.

Quels sont les freins qui nous empêchent d'établir ces inventaires ?

EvdV C'est en partie un manque de volonté. Nous avons lancé une campagne de collecte de données aux Pays-Bas: les distributeurs d'électricité et les opérateurs de télécommunications nous ont très volontiers donné les informations sur leurs ressources. Si ces données n'avaient pas été collectées précédemment, c'est parce que personne n'avait voulu le faire.

HW Il faut toutefois insister sur le fait que ce sont souvent les entreprises privées qui disposent des meilleures technologies pour effectuer ces inventaires – elles ont déjà des logiciels qui leur disent combien de cuivre elles peuvent récupérer d'un immeuble à détruire, etc. Il faut donc développer une réglementation pour que cette connaissance des gisements urbains soit utilisée pour le bien commun, mais aussi pour que la solution la plus soutenable soit la plus intéressante d'un point de vue économique. •

textes

Bastien Marchand
et Lila Meghraoua

Glossaire

Stationnarité

Le terme fait écho à «l'état stationnaire», notion étudiée par les économistes classiques dès le XVIII^e siècle, qui décrit un système économique stable, une «stagnation». Dans un article de la revue *L'économie politique* (2004, n° 22), «De l'état stationnaire à la décroissance: histoire d'un concept flou», l'économiste Denis Clerc classe les théoriciens de l'état stationnaire en trois courants: les pessimistes (David Ricardo et Thomas Malthus), les «moralistes» (John Stuart Mill, John Maynard Keynes, John Kenneth Galbraith...) et les «catastrophistes» (Nicholas Georgescu-Roegen, Barry Commoner, Dennis Meadows...).

David Ricardo est le premier à introduire ce concept d'état stationnaire. En 1817, il publie ses *Principes de l'économie politique et de l'impôt* dans lesquels il développe l'idée qu'«on ne peut échapper durablement à l'état stationnaire, parce que des mécanismes économiques (hausse des prix et de la rente foncière, rendements agricoles décroissants, ndr) s'opposent à ce que la croissance économique soit autre chose qu'un feu de paille¹». Un de ses disciples, John Stuart Mill, délivre un message

bien plus optimiste: «Celui d'une société pouvant penser à autre chose qu'à produire sans cesse davantage.» Dans ses *Principes d'économie politique* (1848), Mill écrit ainsi que «l'accroissement de la richesse n'est pas illimité» et pointe l'«impossibilité d'échapper à l'état stationnaire, cette inévitable nécessité de voir le fleuve de l'industrie humaine aboutir en fin de tout à une mer stagnante». Le théoricien n'y voit pas une fatalité, mais au contraire, une opportunité: «C'est seulement dans les pays arriérés que l'accroissement de la production a encore quelque importance: dans ceux qui sont plus avancés, on a bien plus besoin d'une distribution meilleure.»

À partir de la fin des années 1960, ce sont les impasses écologiques et les limites planétaires qui remettent au goût du jour la nécessité d'une «croissance zéro» pour les uns et même d'une décroissance pour les autres...

1. «De l'état stationnaire à la décroissance: histoire d'un concept flou», *L'économie politique*, n° 22, 2004.

Cornucopialisme

La Silicon Valley est-elle le foyer des nouveaux cornucopiens? Décrits – et incarnés – pour la première fois par les intellectuels Francis Bacon et Samuel Hartlib (lire article «Une brève histoire des alertes environnementales», page 28), les cornucopiens sont de proches cousins des techno-solutionnistes: ils croient au droit des êtres humains à jouir d'une abondance matérielle illimitée grâce au progrès de la science. La philosophe Catherine Larrère décrit le cornucopianisme (du latin *cornu copiae*, corne d'abondance) comme la «croyance dans l'abondance naturelle»¹.

Anne Frémaux, une autre philosophe, le décrit comme une «idéologie philosophique» qui s'«interdit d'imaginer des "limites" au pouvoir humain»². Selon elle, les cornucopiens sont des techno-solutionnistes ascendants «anthropocénistes heureux» qui, bien que reconnaissant le problème écologique (ils ne sont pas climatologues), estiment que «la technologie sera toujours capable de fournir les solutions aux problèmes qu'elle crée». Dans leur escarcelle: géo-ingénierie, séquestration de dioxyde de carbone, réfléchis-

sement du rayonnement solaire, minage d'astéroïdes, etc. Les négociations climatiques sont en échec? Dont acte, les cornucopiens appellent la Science et l'Industrie à prendre le relais, sans trop s'embarrasser ni de considérations démocratiques ni de principe de précaution. Mais d'où vient donc cette «idéologie au fondement de la modernité industrielle», qui veut remplacer les «processus naturels par des processus technologiques»? Dans un article qui a fait date³, l'historien Fredrik Albritton Jonsson montre que le terme est entré dans la langue anglaise... au début du XVII^e siècle et a en fait irrigué toute l'histoire coloniale, du mythe de la «frontière» aux révolutions industrielles, jusqu'au Sommet de Rio en 1992 où l'économiste en chef de la Banque mondiale, Lawrence Summers, affirmait: «Il n'y a pas de limites à la capacité de charge de la Terre, qui soient susceptibles de nous contraindre à aucun moment dans un avenir prévisible».

1. Catherine Larrère, «Les Lumières dans les débats contemporains autour de l'écologie politique: la question des limites de la Terre», *Lumières*, 2019, pp.15-31.
2. Anne Frémaux, «Pour un bon usage de l'utopie dans l'anthropocène», *Journal du Mauss*, 2017.
3. Fredrik Albritton Jonsson, «The Origins of Cornucopianism: A Preliminary Genealogy», *Chicago Center for Contemporary Theory*, 2014, pp. 151-168.

Bio-sourcé

Les matériaux biosourcés désignent les matières premières partiellement ou totalement issues de la biomasse, végétales (le bois, la chaume, le liège, l'herbe de prairie, le chanvre, le lin...), animales (laine, plumes) ou recyclées (textiles, bois de palette, carton ou ouate de cellulose...). Ils présentent généralement une faible empreinte environnementale et sont particulièrement appréciés pour leurs vertus isolantes. À titre d'exemple, 10% de la paille de blé produite annuellement (fraction non requise pour l'élevage et la préservation des sols) suffiraient pour isoler tous les nouveaux logements construits chaque année en France¹, estime le Collect'IF Paille. Tenir compte toutefois, selon les cas et les volumes, du risque d'appauvrir les terres agricoles.

Pour les incorporer dans les bâtiments et répondre au cahier des charges normatif, il faut en revanche y adjoindre quelques additifs (traitements antibactérien et antifongique) ou les ignifuger. Personne n'est parfait...

1. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/les_materiaux_de_construction_biosources_geosources.pdf

Rapport Meadows

Comment «analyser les causes et les conséquences à long terme de la croissance sur la démographie et sur l'économie matérielle mondiales»? C'est l'épineuse question à laquelle seize chercheurs du MIT ont tenté de répondre au début des *seventies* à la demande du Club de Rome, un groupe informel composé d'hommes d'affaires, de dirigeants et de scientifiques. Publié en 1972 sous le titre *Limits to Growth*, puis actualisé à deux reprises en 1992 et 2004, le «rapport Meadows» — du nom de Donella et Dennis Meadows, deux des trois auteurs principaux — s'appuie sur la dynamique des systèmes et le modèle informatique World3 pour, littéralement, mettre le monde en équations. Au menu donc: des paramètres et des variables à n'en plus finir, des boucles de rétroaction, des stocks, des flux, des graphiques et des courbes pour parvenir à la modélisation de trajectoires possibles de développement au cours des *xx^e* et *xxi^e* siècles. Résultat? Dans tous les scénarios de World3, la « capacité de charge » de la Terre — ses

limites naturelles — oblige la croissance des activités humaines à s'arrêter à un moment ou un autre. Selon les auteurs, «*la fin de la croissance peut prendre différentes formes*»: un «*effondrement*» ou une «*adaptation en douceur*». Côté répercussions, les décideurs politiques et économiques y ont opposé une fin de non-recevoir: «*Je ne suis pas un partisan de ces théories*», tempérait par exemple Valéry Giscard d'Estaing². Or, n'en déplaise à VGE, les scénarios produits par World3 se sont révélés être d'une «*redoutable précision*»... Le «*business-as-usual*» décrit par exemple la trajectoire que nous avons effectivement suivie. L'édition de 1972 restait prudente et optimiste. Les mises à jour ont ajouté une conclusion moins joyeuse: en 1992, «*l'humanité avait déjà dépassé les limites de la capacité de charge de la planète*» et aujourd'hui les auteurs sont «*beaucoup plus pessimistes qu'en 1972 quant à l'avenir qui nous attend*». Vous avez dit déjà-vu?

1. Les citations sont issues de la traduction canadienne des *Limites à la croissance*, éditions Écosociété, 2013.

2. 1972, les alertes pour la planète du rapport Meadows, INA, 9 mai 2022, https://www.youtube.com/watch?v=uky_oUmFVZo.

Géo-sourcé

Ces matériaux sont d'origine minérale: terre crue (pisé, bauge, adobe...) ou pierre sèche (granit, calcaire, marbre, ardoise...). Lorsqu'ils ne sont soumis qu'à peu, ou pas de transformation, ils émettent bien moins de gaz à effet de serre que les matériaux plus conventionnels (béton, acier, plâtre...). Extraite des chantiers d'excavation, la terre crue utilisée localement limite l'impact du transport. Mélangée à d'autres matériaux biosourcés (paille, chanvre, fibres de cellulose), elle peut être utilisée comme enduit, matériau de remplissage, parement, ou pour réaliser des murs porteurs. Elle est en outre réutilisable et présente un intérêt acoustique et thermique appréciable. Absorbant l'humidité de l'air, la terre crue permet une meilleure régulation de la chaleur. Bémol: les matériaux géo-sourcés ne peuvent pas couvrir tous les besoins, notamment lorsqu'il s'agit de construire en infrastructure ou des structures sur plus de deux ou trois étages. En outre, les procédés de construction en terre crue n'étant pas répliquables, la technique de construction dépend des propriétés de la terre trouvée sur place.

Les nouvelles du front

On nous écrit de la planète Tech...

L'Hyperloop est-il condamné ?

C'est la question que s'est posé cet hiver le *New York Times* dans un long article qui revient sur les origines de ce moyen de locomotion supposément « du futur ». La promesse de l'Hyperloop ? Celui d'un vactrain (ou train sous vide), composé de deux tubes surélevés dans lesquels se déplacent à très grande vitesse (jusqu'à 1 000 km/h) des capsules. En somme, un pneumatique, mais pour passagers... Né sous la plume de Jules Verne dans la nouvelle *La journée d'un journaliste américain en 2889*, l'idée réapparaît dans les discussions en 2012. Elon Musk le présente alors comme la réincarnation d'un Concorde qui aurait fusionné avec un canon à propulsion électromagnétique, mais préfère se concentrer sur le développement de SpaceX. L'entrepreneur Dirk Ahlborn est le premier à se lancer en créant Hyperloop Transportation Technologies. Depuis 2017, on n'a plus trop de nouvelles de l'entreprise, qui peine à trouver des investisseurs depuis son fief toulousain. C'est un autre magnat des affaires qui mise sur un autre projet d'Hyperloop : Richard Branson, avec Hyperloop One. En novembre

2020, après quelque 400 essais sans passagers du véhicule, deux voyageurs embarquent dans la capsule. Un peu plus d'un an plus tard, l'entreprise rétro pédale, licencie la moitié de ses effectifs et annonce renoncer au transport de passagers... pour concentrer ses efforts sur le fret. Pour résoudre quel problème ? Seul Hyperloop One le sait...

Panique sur le métavers, ChatGPT à la rescousse !

128, c'est le nombre de fois qu'a été prononcé en 2021 le mot «métavers» lors des fameux Investor Days du NASDAQ (présentations des résultats et de la stratégie des grands groupes). En 2020, c'était sept fois selon le comptage du bureau d'études Senteo. Un emballement qui n'a pas duré bien longtemps. Le champion le plus fervent du métavers, Mark Zuckerberg a annoncé dans une lettre adressée au personnel de Meta, le 14 mars dernier, ralentir la recherche dans le métavers au profit de la nouvelle coqueluche tech: l'intelligence artificielle. «Notre investissement le plus important consiste à faire progresser l'IA et à l'intégrer à chacun de nos produits [...] Nous avons l'infrastructure pour le faire à une échelle sans précédent et je pense que les expériences que cela permettra seront incroyables». En six mois, 21 000 employés, dont 11 000 au sein du labo de recherche sur la réalité virtuelle Reality Labs à l'automne 2022, auraient été licenciés. C'est que les internautes préfèrent largement

entamer la discussion avec l'outil d'IA générative d'Open-AI, ChatGPT. En février 2022, Horizon Worlds, le métavers de Zuckerberg n'avait convaincu que quelque 300 000 utilisateurs actifs mensuellement. Un chiffre tombé en fin de la même année à 200 000. Un bien mauvais résultat pour l'entrepreneur habitué à attirer sur ses réseaux des milliards d'utilisateurs.

Neom, la mégalopole très très mégalo

Des publicités vantant les mérites du projet The Line de la mégalopole Neom ont squatté nos flux Twitter et LinkedIn cet hiver. Aux manettes du grand œuvre, le prince héritier saoudien Mohammed Ben Salmane. D'abord, il y aura The Line, une ville encadrée de murs à miroirs sur 170 kilomètres de long, 200 mètres de large et 500 mètres de haut. Oui, la ville est bel et bien une ligne. Elle serait exempte de voitures et reposerait à 100% sur les énergies renouvelables. Une vision selon ses concepteurs d'une ville «écologique» et hypra intelligente... Ses habitants pourront se promener en pleine nature dans le désert et la voir se refléter sur

Les voitures autonomes pas rentables pour Ford

les murs de la cité. Évidemment, sans considérer l'impact écologique – sur la biodiversité locale, la consommation de ressources et l'énergie embarquée dans les matériaux – et social de la construction d'un tel mur. Deux opposants ont d'ores et déjà été condamnés à mort par des tribunaux saoudiens; ils ont refusé d'être expropriés... «Next in line» à 50 kilomètres de la côte du golfe d'Aqaba: Trojena, une destination touristique et résidentielle en montagne, sur près de 60 kilomètres, où, promettent les promoteurs, il sera possible de «faire du ski et des sports d'aventure en plein air, été comme hiver» d'ici 2026. L'objectif: accueillir les Jeux asiatiques d'hiver en 2029.

On y était presque. On se voyait déjà, dans les petites voitures parfaitement autonomes, transportant les humains dans le film d'animation *Wall-E*, sirotant les orteils en éventail nos cafés, validant d'un clic distrait nos présentations conçues gracieusement par notre nouveau «*work husband*», ChatGPT. Encore manqué! Ford et Volkswagen qui avaient joint leurs forces pour imaginer leur flotte de «robomobiles» ou plus simplement dit de voitures autonomes ont jeté l'éponge. Le constructeur américain ne croit plus du tout à cette technologie. «Les véhicules rentables et entièrement autonomes à grande échelle sont encore loin et nous n'aurons pas nécessairement à créer cette technologie nous-mêmes», a déclaré fin octobre 2022 le patron de Ford, Jim Farley dans un communiqué. Résultat? Ford a enregistré une dépréciation de 2,7 milliards de dollars. Mi-avril 2023, l'entreprise s'est relancée dans la course en déclarant tester dans le centre Ford à Cologne un système de conduite auto-

matisée qui permet aux véhicules électriques fabriqués dans cette usine de sortir de la chaîne de montage sans l'aide d'un conducteur. En attendant, Apple a également repoussé Titan, son projet de véhicule plus tout à fait autonome (il y aura finalement un volant et un pédalier)... à 2026.



Aux (res) sources de l'urbain

illustration Chester Holme

De Pline l'Ancien au Rapport Meadows

Une brève histoire de l'alerte scientifique et environnementale

texte Lila Meghraoua

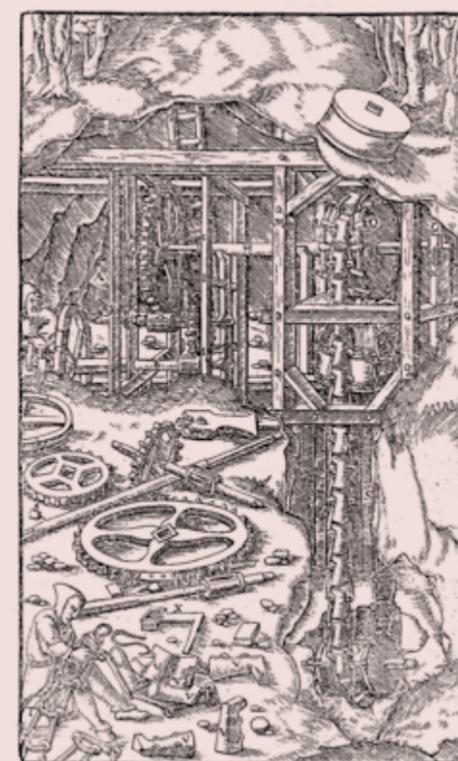
«Si on se demande s'il a toujours et partout été d'usage de considérer le monde comme un entrepôt où l'on vient se servir [...], la réponse est toujours la même: non», écrit l'historien Mathieu Arnoux. C'est que la notion de ressources «entendue comme ensemble de biens généralement disponibles est une innovation récente». Son extraction, en revanche, remonte à fort loin.

LIBER SEXTVS.

139



A—FORGE. B—BELLOW. C—TONGS. D—HAMMER. E—COLD STREAM.



Extraits de *De Re Metallica*,
George Bauer dit Agricola,
(voir page 34)

L'extraction et l'utilisation des matières premières, expliquent Alicia et Antonio Valero dans *The Material Limits of Energy Transition: Thanatia* (Springer, 2021), sont liées au développement humain. Pour se nourrir, se déplacer, s'éduquer, nos ancêtres préhistoriques consommaient individuellement trois kg par jour de ressources naturelles contre 44 au XXI^e siècle¹. Les roches – silice et quartz – sont alors collectées à la surface. L'exploitation minière s'intensifie avec l'apparition de sociétés plus complexes. Le cuivre est d'abord martelé à partir de 8 000 avant J.-C. puis fondu à partir de 4 000 avant J.-C.; l'or et l'argent le sont à partir de 4 000 avant J.-C. L'étain – vers 2 500 avant J.-C. – marque, allié au cuivre, l'invention du bronze. Enfin, le fer, abondant en tant qu'élément dans la croûte terrestre mais rare sous forme native, n'est disponible qu'en faibles quantités. Avec le plomb et l'étain, ces métaux vont ponctuer les relations économiques et géopolitiques des peuples et nations jusqu'à la révolution industrielle, racontent dans *Quel futur pour les métaux*, Philippe Bihouix et Benoît de Guillebon (EDP Sciences, 2010).

Des fouilles archéologiques récentes ont confirmé l'exploitation minière de cuivre, de plomb et d'argent dans le Laurion en Grèce, dès 3 200 avant J.-C. En Lydie (en actuelle Turquie), la rivière Pactole et ses paillettes d'or font la prospérité du roi Crésus (VI^e siècle avant J.-C.). Un autre exemple notable est le cas des mines d'or à ciel ouvert de Las Médulas dans la province de León en Espagne, dont les Romains extraient quelques cinq à six tonnes d'or dès le I^{er} siècle avant J.-C.² Très riche en métaux, particulièrement en argent, cuivre et plomb, la péninsule ibérique suscite la convoitise de l'Empire romain qui soumet la région pour exploiter ses sols à l'envi et en faire commerce. Tant et si bien qu'à la fin de la République et sous le Haut-Empire, les métaux hispaniques dominent les échanges méditerranéens³.

Le commerce des ressources minérales se poursuit intensivement au Moyen Âge⁴. En France, à partir du VI^e siècle, et pendant près de quatre siècles, Melle devient un haut lieu de production d'argent et de plomb en Europe. À l'Est, en Saxe, des mines de Rammelsberg coulent «*les veines d'argent de la Saxe*» (*Res gestae Saxonicae* de Widukind von Corveys, X^e siècle). Il faudra attendre le XVIII^e siècle et deux chimistes suédois, Georg Brandt et Axel F. Cronstedt pour que soient identifiés de nouveaux minerais: le zinc, le cobalt

et le nickel. Le cobalt et le nickel sont exploités dès le XV^e siècle en Saxe et en Bohême. Les mineurs espèrent en tirer du cuivre et prennent très vite en grippe le matériau. C'est que les fumées exhalées par le grillage du minerai les intoxiquent. Ils y voient une vilaine farce des Kobolds, créatures issues de la mythologie germanique. «Nickel» est le petit nom donné à un autre Kobold, pour l'amadouer.

La fin du XVIII^e siècle est marquée par le passage du charbon de bois au charbon de terre qui coïncide avec la multiplication de fours industriels pour produire l'acier. La machine à vapeur, à l'origine de la révolution industrielle, est particulièrement gourmande en matières et métaux. Du cuivre est utilisé pour les chaudières. Le bronze (alliage de cuivre et d'étain) est, quant à lui, indispensable au bon fonctionnement des machines. Les machines dévorent d'autres ressources plus renouvelables: par exemple, des lubrifiants à base d'huile de baleine pour les machines à vapeur et les locomotives. Dès lors, la course de consommation et d'extraction des ressources ne cessera de s'intensifier.

Abondance versus pénurie, une question antique

«*Dès la période médiévale, les pays européens ont affaire à l'épuisement de ressources du sous-sol, dès l'Antiquité dans certains cas*», ébauche l'historien Mathieu Arnoux dans *Un monde sans ressources*. Au I^{er} siècle après J.-C., le naturaliste romain Pline l'Ancien, auteur d'une monumentale *Histoire naturelle*, aborde longuement la question des métaux.

Dans le premier chapitre du tome XXXIII, il décrit cette «*industrie [qui] pour divers motifs, fouille le sein de la terre*» et précise: «*Nous pénétrons dans ses entrailles, nous cherchons des richesses dans le séjour des mânes: ne semble-t-il pas qu'elle ne soit ni assez bienfaisante ni assez féconde là où nos pieds la foulent? En se laissant aller à l'imagination, que l'on calcule combien il faudra de siècles pour mettre fin à ces travaux qui l'épuisent, et jusqu'où pénétrera notre cupidité!*» Dans ces lignes, il pressent la réalité d'une écorce terrestre dont les réserves ne sont ni infinies ni toujours renouvelables. L'auteur s'exprime à contrepied d'Aristote qui imagine que les minerais peuvent «*croître avec le temps, comme les êtres vivants*»⁵.

C'est Georg Bauer, sous le nom de plume d'Agricola, qui avec *De Re Metallica* pose en 1556 les premiers

«Aristote imagine que les minerais peuvent “croître avec le temps, comme les êtres vivants”.»

— Ugo Bardi

jalons de la minéralogie moderne et enterre définitivement l'idée des ressources minérales comme étant des corps vivants.

Au Moyen Âge et jusqu'à l'époque moderne, les notions d'abondance et de pénurie des ressources sont soumises aux principes de l'Église. «*Les ressources sont un don de Dieu, sont limitées; les désirs doivent être filtrés, réfrénés même*», nous explique l'historien Carl Wennerlind, auteur avec l'historien Fredrik A. Jonsson d'un ouvrage sur la notion de rareté⁶. Dieu a créé le monde pour l'humanité. Lorsqu'Adam et Eve sont chassés du Paradis, Dieu les punit en cachant les ressources naturelles et rend le sol dur. «*À partir du XVII^e siècle émerge quelque chose d'étonnant pour l'époque: l'idée de croissance, de ressources et de désirs infinis devient peu à peu socialement et politiquement acceptable. C'est un long processus qui s'écoule sur plusieurs siècles*», poursuit Fredrik A. Jonsson. Le cornucopianisme – l'idée que les ressources naturelles, bien que limitées, peuvent être renouvelées par le progrès technique – a semé doucement ses graines.

Au tournant du XIX^e siècle, avant la révolution industrielle, il entamera un débat d'idées qui se poursuit jusqu'à aujourd'hui, avec le finitarisme ou néomalthusianisme.

En 1625, en plein petit âge glaciaire qui paralyse le continent européen, le philosophe et homme politique britannique Francis Bacon développe l'idée que l'humanité peut «*avec l'aide de la science, soumettre la nature et la contraindre à partager ses mannes*». «*Bacon base sa vision de la nature sur la théologie et l'alchimie. Il est inspiré par l'idée présente dans la Genèse, de Dieu comme d'une force omnipotente. L'être humain est désormais, estime-t-il, capable d'imiter Dieu*», étaye Fredrik Jonsson. Bacon défend la thèse d'«*un futur où chaque génération vivra mieux que la dernière, grâce aux bénéfices matériels obtenus par la découverte des secrets de la Nature*». Dans la *Nouvelle Atlantide* (1626), il imagine la Maison de Salomon, un lieu d'expérimentation scientifique. Dans les sous-sols de la Maison, des savants multiplient les essais pour découvrir le secret des métaux⁷.

Un disciple de Bacon, le savant Samuel Hartlib pousse le rêve du maître plus loin dans un ouvrage intitulé *Cornu copia* (1652). L'humanité dispose, écrit-il, «*de sources infinies de soulagement et de confort*». «*Nos terres recèlent en leur sein un trésor infini, inépuisable, longtemps caché, mais en passe d'être révélé. [...] Nous ne jouissons, ne connaissons, n'utilisons pas même un dixième de cette manne de richesses*.» Le travail et la créativité apprivoiseront la corne d'abondance qu'est la Nature, est persuadé Hartlib.

La frugalité, méthode de survie

Le XVIII^e siècle remet en question les idées défendues par Bacon et Hartlib. La Maison de Salomon, qui est devenue réalité avec la création d'une académie des Sciences, la Royal Society, est largement pastichée dans les fameux *Voyages de Gulliver* (1726). Dans l'œuvre de Jonathan Swift, les scientifiques ne réussissent jamais à trouver une application concrète à leurs recherches. Les Yahoos sont «*follement épris*» d'or et d'argent; ils sont capables de creuser avec leurs serres des journées entières dans l'espoir de trouver quelque chose qu'ils protégeront au péril de leur vie. À la même époque, un autre romancier n'est pas beaucoup plus tendre. Le *Robinson Crusé* de Daniel Defoe (1719) ne gagne rien à avoir sauvé du naufrage son or et son argent. Cette frugalité



Les mines d'or à ciel ouvert de Las Médulas dans la province de León en Espagne



Usine de la Compagnie française des mines du Laurion, aux alentours de 1890

imposée le révèle libre de découvrir ses besoins réels et d'apprendre à les satisfaire.

Quelques décennies plus tard, en 1798, le révérend Thomas Malthus prophétise une fin prochaine de l'abondance. Le progrès humain tant vanté par les cornucopiens a un ennemi: les limites matérielles. L'ecclésiastique doute surtout des produits agricoles du sol, et se préoccupe peu des ressources minérales. Porté par l'industrialisation des sociétés européennes et une accélération dans la consommation des matériaux, le siècle suivant entame une discussion qui court jusqu'à aujourd'hui sur les limites planétaires. Parmi les premiers à marquer leur inquiétude, l'économiste William Stanley Jevons se penche sur la «question du charbon» dans les années 1860.

La discussion menée par Jevons et ses contemporains à propos de l'épuisement du charbon dans les années 1860 est dans la «*continuité d'une controverse née dans les années 1820-30*». En 1836, le géologue anglican William Buckland s'inquiète à la Chambre des communes de l'épuisement du charbon. Le combustible, don de Dieu à la nation britannique, n'est pas disponible en quantité illimitée. Une pénurie fragiliserait la puissance productive du pays et la rendrait moins compétitive. Cette inquiétude se heurte alors aux «arguments cornucopiens»⁸ d'un autre géologue et député, George Poulett Scrope qui y voit un «revival mal avisé» de la pensée malthusienne et croit, lui, en l'abondance providentielle du charbon qui nourrira une croissance infinie.

En 1865, Jevons sonne la fin de la récré. Dans son livre, *Sur la question du charbon*, l'économiste explique que la hausse de la consommation du charbon, si elle se poursuit, devrait conduire à une hausse des prix. Par ailleurs, il avance que la performance et l'efficacité des machines de la révolution industrielle n'amènent pas à une moindre consommation énergétique. Au contraire, en utilisant plus de machines, elle l'augmente.

L'alerte environnementale se médiatise

À peu près à la même époque, en 1854, s'élèvent en France les premières alertes environnementales avec la création de la Société d'acclimatation: «*Il s'agit d'une société savante, accolée au Muséum d'histoire naturelle*», développe l'historienne Anna Trespeuch-Berthelot. Au départ, ce collectif

de scientifiques et d'amateurs naturalistes s'emploie à «*acclimater les espèces végétales et animales à la fois pour doper l'agriculture française*». La conversion à une certaine conscience environnementale survient au détour de la Belle-Époque. «*Edmond Périer, président du Muséum et de la Société d'acclimatation déclare qu'il faut protéger les espèces, mais aussi l'équilibre naturel. Il défend l'idée que les scientifiques en sont garants.*»

Dans l'entre-deux-guerres, une série de grands congrès internationaux débouche sur la création en 1948 de l'Union internationale pour la protection de la Nature. En France, de grandes figures de l'alerte scientifique et environnementale occupent le terrain médiatique: le spécialiste des déserts Théodore Monod, le mycologue Roger Heim ou encore l'ornithologue Jean Dorst, qui mènent un travail de sensibilisation auprès du grand public. Le naufrage pétrolier de Torrey Canyon fera le reste: «*Cette marée noire, ces images d'oiseaux englués dans le mazout, ça a beaucoup choqué. Les vues de la Terre depuis l'espace en 1969. Tout ça revient beaucoup dans les témoignages des militants [écologues de l'époque].*»

En juin 1972 se tient pour la première fois une conférence qui place au cœur des discussions la question écologique: la conférence de Stockholm. Tous les pays membres de l'ONU y sont conviés. Quelques mois plus tard, un rapport commandé à des chercheurs du Massachusetts Institute of Technology est publié: le Rapport Meadows qui modélise les limites planétaires (*voir définition glossaire, p.22*). Le temps des alertes a démarré.

1. Étude de 2009 des Amis de La Terre.
2. Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, *The Material Limits of Energy Transition: Thanatia*, Springer, 2021.
3. Didier Boisseuil, Christian Rico et Sauro Gelichi, «*Le marché des métaux à l'époque romaine. Acteurs privés et publics. L'exemple du plomb et du cuivre hispaniques*», dans *Le marché des matières premières dans l'Antiquité et au Moyen Âge*, 2021.
4. Mathieu Arnoux, *Un monde sans ressources*, Albin Michel, 2021.
5. Ugo Bardi, *Extracted*, 2014.
6. Jonsson & Wennerlind, *Scarcity*, Harvard University Press, 2023.
7. Ibid.
8. F. A. Jonsson, *The Coal question before Jevons*, 2020.

3 questions à Ugo Bardi

Chimiste et chercheur, spécialiste des métaux à l'université de Florence

propos recueillis par Lila Meghraoua

Dans la préface de votre livre *Extracted*, l'un des co-auteurs du rapport Meadows, Jorgen Randers, explique que la déplétion des ressources minérales affectera nos économies bien avant que les minerais disparaissent. Partagez-vous ce constat ?

Oui, c'est le cœur de ce rapport. Les problèmes démarrent bien plus tôt que la fin des ressources. La question même de la fin des ressources est complexe. On change leur aspect, on les transforme en déchets, et on échoue à les détruire. Certes, on peut songer à recycler ce qui a déjà été extrait. C'est possible, mais souvent plus cher. Il faut aussi considérer le fait que nous avons besoin de ressources pour les extraire.

Vous développez longuement la question de la substitution comme une option à envisager. Qu'entendez-vous par là ?

On parle trop peu du problème de disponibilité des métaux rares, comme le platine qui est, notamment, indispensable pour la pile à combustible. On imagine un Nouveau Monde grâce à l'hydrogène, brandi comme une solution. Mais la technologie hydrogène

nécessite beaucoup de platine, alors que les ressources sont très limitées. Et ce n'est pas un matériau à 100 % recyclable. On peut continuer à construire des choses, mais à condition de recycler comme des fous¹.

À terme, nous allons devoir nous adapter à un monde privé de platine, palladium ou zirconium, sans pour autant retourner à l'âge de pierre. Dans son livre *Global Resource Depletion* (Eburon, 2010), André Diederer évoque les métaux d'espoir. Comme l'aluminium, le manganèse ou le zinc qui ne sont pas vraiment rares. Par exemple, pour produire un panneau solaire photovoltaïque, on a besoin de silicium et d'aluminium. Le silicium est un des matériaux les plus communs de la croûte terrestre. Nous n'avons pas besoin de métaux rares pour obtenir de l'énergie électrique. En revanche, il faut apprendre à s'adapter et accepter une performance moindre.

Ce que vous expliquez est extrêmement optimiste...

Oui, je crois en la créativité et au changement. Il faut construire des voitures moins chères, plus simples et moins lourdes. On rivalise de performance et de puissance, mais on ne peut plus

se le permettre. La planète n'est plus celle qu'elle était. Certaines ressources ont mis des millions d'années à se former. La formation des diamants, par exemple, nécessite des conditions qui n'existent plus. La planète n'en reformera plus jamais. La terre existe depuis quatre milliards d'années. Nous sommes robustes, mais nous ne survivrons pas si nous ne recyclons pas, si nous ne changeons pas. •

1. Précision d'Ugo Bardi: «*Le platine n'est pas à 100 % recyclable. Il est utilisé dans une forme très dispersée comme catalyseur et est dissipé dans l'environnement sous cette forme, en pratique impossible à recycler. On appelle ce phénomène "dissipation des ressources"*».



Le grand pillage: comment nous épuisons les ressources de la planète, Ugo Bardi, traduit par André Verkaeren, Les Petits matins, 2015, 427 pages

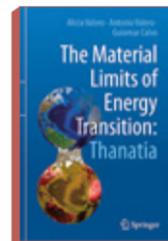
Les nouveaux cornucopiens

En 1967, le futurologue américain Herman Kahn – qui est l'une des inspirations de Stanley Kubrick pour le personnage du Dr Strangelove – publie *L'an 2000, un canevas de spéculations pour les 32 prochaines années* (Robert Laffont, 1967). On peut y lire une liste d'une centaine d'innovations «très probables d'ici l'an 2000». Y figurent aussi bien des «matériaux à ultra-haute résistance» ou des «techniques fiables et économiques de contrôle des naissances» que l'«extraction opérationnelle des gaz de schiste» ou encore la «généralisation de l'emploi des réacteurs nucléaires». Par ailleurs, avec l'institut Hudson, il s'emploie à réfuter les essais jugés catastrophistes, *La bombe P*, de Paul Ehrlich (1968) ou le *Rapport Meadows* (1972).

«*Au cours des décennies à venir, les progrès exploseront de tous les côtés comme une série de fusées qui nous arracheront au passé pour nous plonger au cœur d'une nouvelle société.*»

Dans les mêmes années, le sociologue et futurologue Alvin Toffler imagine dans *Le choc du futur* (Denoël, 1970) une société hyperindustrielle où le citoyen du futur sera dépassé par le progrès technique.

«*Nous devons être les architectes du futur, et non ses victimes*», scandait l'architecte Buckminster Fuller. L'homme croit en la toute-puissance de la technologie pour un monde habitable. À ses yeux, «*le vaisseau spatial Terre [...] possède les ressources suffisantes pour prendre soin de 100 % de l'humanité, mais il faut le piloter avec soin*». Si l'humanité réussit, elle le devra à ses inventions, affirme-t-il. •



The Material Limits of Energy Transition: Thanatia,

Alicia Valero, Antonio Valero, Guiomar Calvo, Springer, 2021, 280 pages



De re metallica,

George Bauer dit Agricola, traduit par Herbert Hoover, Andesite Press, 2015 [1556], 676 pages



Quels métaux pour demain ? Les enjeux des ressources minérales,

Michel Jébrak, Dunod, 2015, 256 pages



Scarcity, A History from the Origins of Capitalism to the Climate Crisis,

Fredrik Albritton Jonsson et Carl Wennerlind, Harvard University Press, 2023, 304 pages



Un monde sans ressources: Besoin et société en

Europe (XI^e-XIV^e siècles), Mathieu Arnoux, Albin Michel, 2023, 368 pages

Le ventre de l'architecte

auteurs de l'étude Raphaël Ménard, Blandine Laplace, Mathilde Lépine, Louise Jammet

Imaginer, construire, rêver l'éternité ?

Certains se souviennent de ce film de 1987 de Peter Greenaway, *Le ventre de l'architecte*, où il était question d'un architecte en prise avec ses douleurs stomacales. Pour cet article, nous interrogerons davantage l'appétit des concepteurs, ce désir de bâtir (parfois cet hubris constructif), ce « ventre » de la consommation de ressources que cette gourmandise anime. L'architecte (ou l'ingénieur) est un grand prescripteur de matières : lorsqu'il lève son stylo pour esquisser une intention, lorsqu'il rédige des lignes de ses cahiers de prescriptions, il commande (parfois sans en prendre vraiment conscience) un flot considérable de matières. Aujourd'hui, lorsqu'un architecte conçoit, il commande environ 700 kilos de matières finales par heure travaillée, et au cours d'une carrière, sans doute l'équivalent d'un cube rempli de matériaux, de près de 25 mètres de côté¹. Pourtant, il y a une vingtaine d'années, le designer Thierry Kazazian nous invitait à « *L'âge des choses légères* »². Mais de quelle légèreté s'agit-il ? Est-elle résumable à la masse totale de matières prescrites par les concepteurs ? Ce rapport à la production architecturale, à l'œuvre bâtie, pose des questions essentielles. On songe à Louis I. Kahn, à la frugalité numéraire de ses références construites, et à Ieoh Ming Pei, l'architecte de la pyramide du Louvre et de centaines d'édifices dans le monde, qui aurait volontiers échangé tout son portfolio pour les chefs d'œuvre de son idole³ ! En ce début de XXI^e siècle, à l'heure des crises écologiques majeures, dont celle de la rareté des matières à construire, nous amorçons l'enquête. Après l'accélération extractiviste de la modernité conquérante, nous ébauchons des éléments de méthode en faisant « monter sur la balance » un panel de cinq architectes, emblématiques et représentatifs du XX^e siècle.

1. Raphaël Ménard, « *Le pic de l'architecture* », dans Julien Choppin et Nicola Delon, Matière Grise, Pavillon de l'Arsenal, 2014, p. 161-168.

2. Thierry Kazazian (dir.), *Il y aura l'âge des choses légères*, Victoires Éditions, 2003.

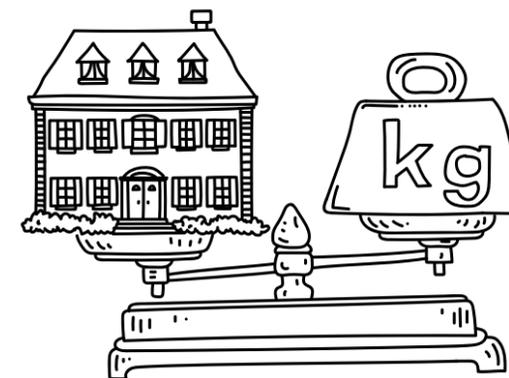
3. Interview de Ieoh Ming Pei dans My Architect - A Son's Journey, Nathaniel Kahn, 2003.

Peser l'architecture, peser l'œuvre

Parties émergées, matières visibles, on perçoit « cet impact gravitaire » à proximité des impressionnantes constructions antiques, telle la pyramide de Kheops et ses près de 6 millions de tonnes. De façon plus contemporaine, on le devine en se promenant dans un quartier de tours, expression du gigantisme de la modernité. À côté, la tour Eiffel, icône de la révolution industrielle, est d'une « insoutenable légèreté » avec ses 7 500 tonnes de fer puddlé.

Au XX^e siècle, la puissance des énergies fossiles a donné aux concepteurs le loisir de construire des ouvrages repoussant les limites des formes et des dimensions. De nouvelles alliances entre matière et énergie ont accéléré

les temps de construction (rappelons-nous, certaines cathédrales ont réclamé plusieurs siècles pour être achevées) en plus de rendre disponibles des ressources lointaines, comme de générer de nouveaux matériaux (bétons à haute performance, composites, etc.). Aujourd'hui, la criticité de certaines ressources, l'impact que leur extraction induit sur les écosystèmes, interrogent la quantité et la nature des matières à construire, car chaque mètre cube de béton ou de bois, chaque tonne d'acier, chaque kilo de verre mis en œuvre génère déchets et ressources non valorisées, depuis le berceau, jusqu'à la matière finale bâtie, et encore après leur démolition.



La sobriété en ressources à l'épreuve de la balance

Désormais, les réflexions sur l'impact des constructions sont au cœur des débats contemporains. Elles suscitent de nouvelles pratiques et questionnent le mix de matières¹. Toutefois, la quête de vertu environnementale ne peut se réduire à la légèreté massique de l'édifice. Récemment, l'exposition « L'empreinte d'un habitat »² retraçait une trentaine d'expérimentations remarquables d'architectes « épris de légèreté », constructions bâties entre 1920 et 2020. Par un travail méthodique et rigoureux, l'analyse coordonnée par Philippe Rizzotti établissait des corrélations entre « légèreté massique » et « légèreté carbone ». Or, la recherche de légèreté, de finesse, voire d'immatérialité, s'opère parfois au prix d'un

impact élevé des matériaux utilisés, comme en témoigne l'énergie grise considérable de l'acier inoxydable ou de l'aluminium par exemple. À rebours de cette dynamique, quelques architectes contemporains s'enorgueillissent encore parfois de la masse de leur projet. Françoise Fromonot s'en indigna justement dans son enquête sur la transformation des Halles à Paris et de sa récente couverture d'acier et de verre : « Ici et là, les acteurs du colossal chantier aiment à répéter que la Canopée pèse 7 000 tonnes, soit 500 de moins que la tour Eiffel... [...] La Canopée, aussi lourde qu'une structure de 300 mètres érigée au XIX^e siècle, signe donc une incompréhensible régression. »³

Cinq architectes sur la balance Un premier panel de la modernité

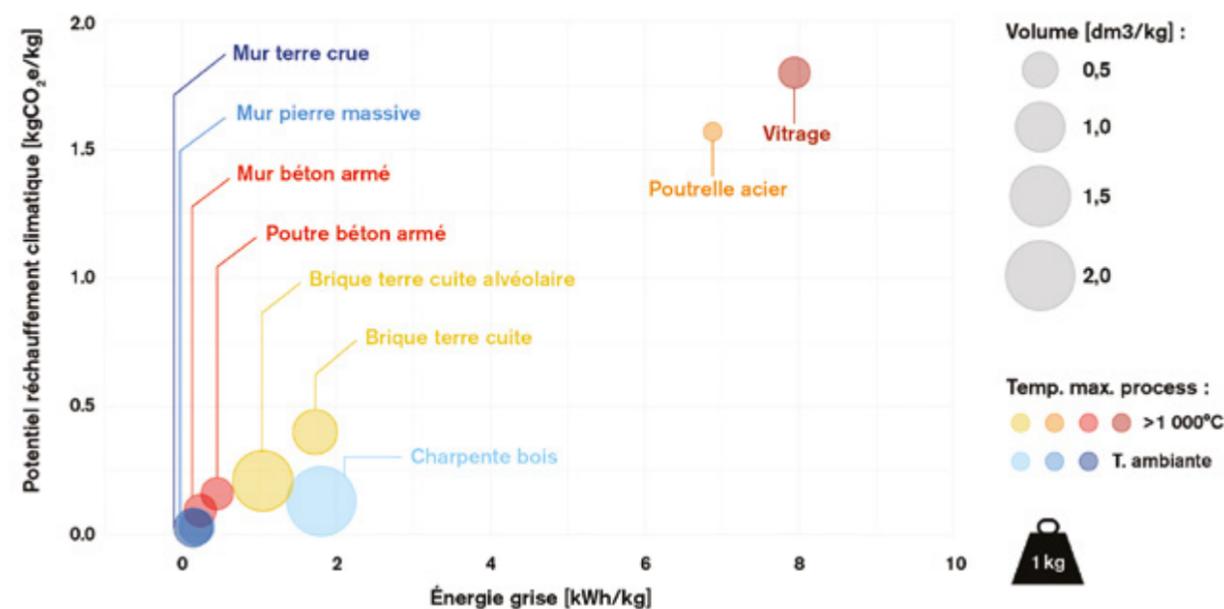
Afin de nous orienter dans l'architecture moderne, nous avons fait l'exercice de mettre sur la balance l'œuvre construite de cinq architectes majeurs du xx^e siècle aux profils constructifs contrastés: Le Corbusier, Louis I. Kahn, Lina Bo Bardi, Ludwig Mies van der Rohe et Hassan Fathy.

Le Corbusier a développé un riche langage architectural autour du béton qui a marqué le courant moderniste international; architecte-bâtitisseur tardif, Louis I. Kahn a beaucoup moins construit et son œuvre est davantage bigarrée, faite de briques, de béton et de bois; Lina Bo Bardi, architecte brésilienne, a peu construit également, mais a marqué l'archi-

tecture par des réalisations emblématiques, principalement en béton, ainsi qu'en pratiquant beaucoup de rénovations, moins gourmandes en matériaux; Ludwig Mies van der Rohe a été le parangon de l'acier et du verre et a massivement construit, en particulier aux États-Unis; enfin, précurseur de l'architecture écologique, Hassan Fathy défendait une architecture attachée aux techniques constructives traditionnelles, et a mis à l'honneur la terre crue en Afrique du Nord, dont l'Égypte. Ainsi, ce panel provoque une nouvelle rencontre, une comparaison intrigante, mêlant une grande diversité de contextes culturels, sociaux, techniques et économiques.

Caractéristiques de plusieurs matériaux de construction

Les données correspondent à 1 kilogramme de matière. Données issues de la base INIES, calcul effectué sur la durée de vie du produit; phases A à C, hors module D. Seul le vitrage à une durée de vie déclarée de 30 ans contre 100 ans pour les autres produits.



Ébauche d'une méthode, esquisse d'une métrique

Toutefois, établir la pesée, reconstruire le bilan de cette « dette constructive » de nos cinq protagonistes n'est pas si aisé. Par un travail d'inventaire, nous avons compilé les données

les plus précises sur les dimensions et les systèmes constructifs pour procéder à notre « pesée ». Face à la quantité et la diversité des bâtiments de chaque architecte, une extra-

plication a été nécessaire afin d'obtenir quelques ordres de grandeur utiles à ce premier examen.

Pour les dimensions d'abord, en l'absence critique de données, des surfaces-types moyennes ont été appliquées au regard de l'œuvre d'un même architecte. Mies van der Rohe a par exemple construit un grand nombre de maisons bourgeoises peu documentées pour lesquelles nous avons alors obtenu pour une surface moyenne de 300 m². Les hauteurs sont également peu renseignées et ont pu être appréciées à partir du nombre de niveaux de l'édifice analysé.

SYNTHÈSE Pesée des cinq architectes

La production construite des cinq architectes n'est pas comparable en quantité, qu'il s'agisse du nombre de bâtiments, ou des surfaces totales érigées. Pour preuve, on compte jusqu'à 64 références pour Le Corbusier⁴ alors que Bo Bardi ne recense que 13 édifices. En 79 projets construits, Mies van der Rohe a livré plus de 1,2 million de mètres carrés de bâti, soit près du triple du (pourtant) prolifique Le Corbusier qui atteint plus de 412 000 mètres carrés! Alors, un mètre carré conçu par Le Corbusier ça pèse combien? Et pour Hassan Fathy?

16 bâtiments ont été redessinés et quantifiés afin de déterminer le volume de chaque matériau constituant leur enveloppe et leur structure (hors fondations). Ce quantitatif permet d'obtenir un poids surfacique valable pour les types constructifs de chaque architecte. Ils sont ensuite extrapolés pour estimer le poids de leur œuvre. Cet exercice montre que la majeure partie des réalisations des cinq « cobayes » possède un poids surfacique compris entre 1 000 et 1 500 kg/m², malgré la grande variabilité des systèmes constructifs et des expressions architecturales. Quelques réalisations dénotent tout de même lorsque nous nous penchons sur « l'intensité ressources » de cette production. D'abord, l'œuvre de Fathy, principalement en terre crue, pèse très lourd dans la balance avec un poids surfacique d'environ 3 800 kg/m² pour la maison Hamed Said (1945). Dans son cas, cette pesée s'incarne matériellement par un grand volume de matière mis

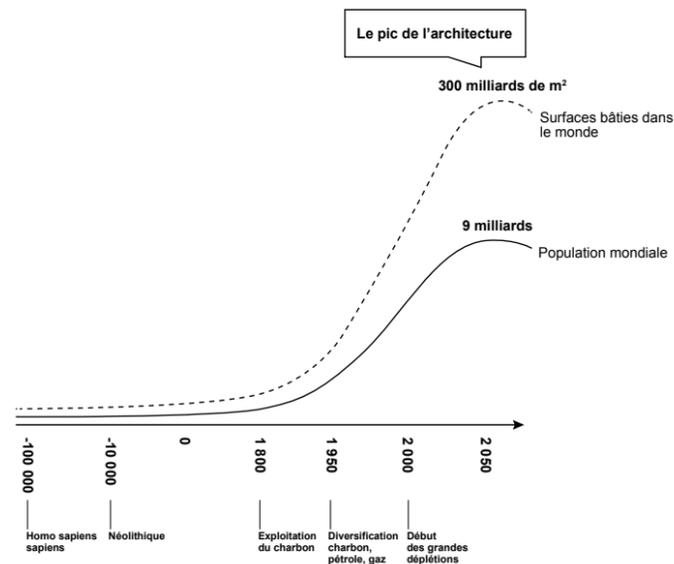
Ensuite, les systèmes constructifs. Notre panel rassemble (intentionnellement) des architectes aux œuvres marquées par des systèmes constructifs contrastés. Cela a malgré tout changé durant leur carrière pour certains, ou cela dépend des types de construction pour d'autres. Notre méthode a donc été de raisonner à partir de types caractéristiques à partir de l'analyse détaillée de deux à cinq bâtiments pour chaque architecte afin d'obtenir un poids surfacique typique (kg/m²) applicable à des « périodes » de leur œuvre.

en œuvre (2 m³/m² construit) ce qui contraste avec l'église Espirito Santo do Cerrado de Bo Bardi (1982) faite de bois et de brique, bien plus légère (990 kg/m²) et aérienne (0,6 m³/m²) ou le célèbre Salk Institute de Louis I. Kahn (1963), avec une moyenne de 1 200 kg/m² et moins de 0,5 m³/m² construit grâce à la densité et aux performances du béton armé. Entre ces extrêmes, on trouve sinon la célèbre bibliothèque Exeter de Kahn (1972) où l'épaisse façade de brique s'ajoute à la grande structure de béton pour une densité assez élevée pour notre panel, à 2 700 kg/m², mais un volume surfacique plus faible que Fathy (1,4 m³/m²). Réapparaît alors cette subtile gymnastique du métier d'architecte qui compose entre matériaux, surfaces, volumes, formes, poids et désormais impact environnemental.

Finalement, l'écart de poids s'établit dans un rapport de 1 à 30 entre les 1,2 million de tonnes pour l'ensemble de l'œuvre de Mies, comparées aux 38 000 tonnes de Bo Bardi. Fathy est le second poids plume avec ses 158 000 tonnes pour 42 édifices en tout. Concernant les volumes de ressources, les écarts relatifs et la hiérarchie sont sensiblement identiques: Mies a mis en œuvre l'équivalent d'un cube plein (d'acier, de béton, de verre, de bois etc.) de plus de 75 mètres de côté; à l'autre extrémité du panel, l'œuvre de Bo Bardi représente un cube de moins de 25 mètres de côté.

Perspectives

Cette pesée (sur notre balance encore imparfaite) met le doigt sur quelques enseignements. Elle confirme l'importance de l'« empreinte matière » des concepteurs, à l'instar de l'empreinte carbone de tout citoyen. Quoiqu'ils et elles ne soient pas les commanditaires des millions de mètres carrés édifiés (dont le besoin est déterminé par une maîtrise d'ouvrage parfois accompagnée par des programmatistes dont le rôle est de veiller au juste équilibre entre surfaces et usages), les systèmes constructifs et les mix de matières sont maîtrisés par les concepteurs, et sont l'expression même, de l'écriture architecturale. Cependant, la seule donnée de poids ne peut servir de boussole. De nombreux matériaux géosourcés (terre crue, pierre...) pèsent particulièrement lourds mais ont une empreinte environnementale exemplaire. Ainsi, la « pesée systémique » du « ventre du concepteur » réclame une plus grande variété d'indicateurs que la simple aiguille de la balance. Pour aller plus loin, au-delà de la masse globale, il est pertinent d'interroger l'intensité carbone des matériaux employés, et plus globalement le « scope 3 »⁵ (le « carbone gris » d'une analyse de cycle de vie). Cela implique d'observer à la fois la nature renouvelable (ou non) des matériaux, mais aussi l'énergie nécessaire à leur extraction, leur transformation et leur acheminement. Face aux centaines de milliers de mètres carrés d'acier neuf de Mies, les rénovations de Lina Bo Bardi étaient pionnières face au défi du XXI^e siècle. Elles dessinaient une architecture anticipant le « pic de la discipline »⁶ (voir graphique ci-contre) qui nous engage à moins démolir et davantage transformer pour amortir et « digérer » la dette constructive du XX^e siècle. Au cours de cette « grande accélération constructive », après avoir exploré les performances techniques de la matière, en se souciant peu de l'énergie ou des volumes consommés, les concepteurs (architectes ingénieurs, designers etc.) questionnent désormais la matière à travers son cycle de vie. Le concepteur n'est plus omnipotent, il intervient dans un monde à protéger, (voire à réparer), un « sachant-facilitateur » au sein d'un environnement où « rien ne se perd, rien ne se crée et tout se transforme ». Cette ébauche de pesée devra ainsi s'élargir sur davantage de critères, se préciser dans les calculs et s'ouvrir à un

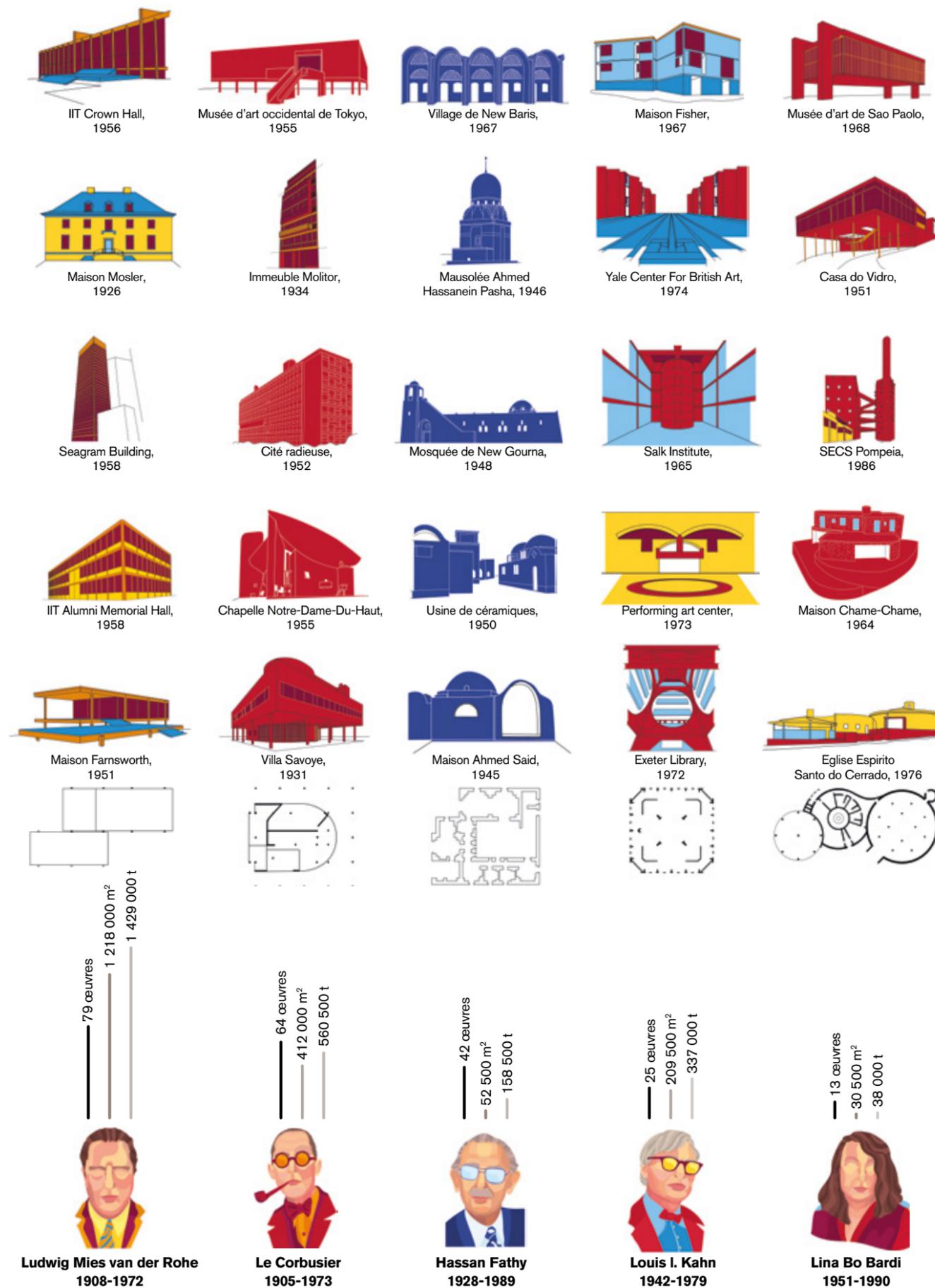


Raphaël Ménard, « Le pic de l'architecture », dans Julien Choppin et Nicola Delon, Matière Grise, Paris, Pavillon de l'Arsenal, 2014.

panel d'architectes (et de disciplines) plus grand afin d'interroger l'histoire de l'architecture et de la construction au prisme de leur impact au-delà de la matière (biodiversité, cycle de l'eau, pollutions etc.).

Entre légèreté et lourdeur, nature et provenance des matières, frugalité ou abondance, les architectes adoptent des stratégies diverses salutaires pour la créativité, la diversité des formes et des expressions architecturales. Ressources locales, matériaux crus (ou moins cuits!), réemploi et réhabilitation, les solutions sobres et frugales sont nombreuses et doivent entrer dans le « régime alimentaire » des architectes et des concepteurs de demain. •

1. *Thème de l'exposition et du catalogue « Matière grise », commissariat scientifique: Julien Choppin et Nicola Delon, 2014-2015, Pavillon de l'Arsenal.*
2. « L'empreinte d'un habitat », commissaire scientifique invité: Philippe Rizzotti Architecte, 2021-2022; voir l'ouvrage L'empreinte d'un habitat: construire léger et décarboné, dirigé par Philippe Rizzotti Architecte, Paris, Pavillon de l'Arsenal, 2022.
3. Fromonot Françoise, La comédie des Halles, Paris, La Fabrique éditions, 2019, p. 115.
4. Nous avons arrêté notre liste aux œuvres individuelles et exclu les collaborations comme le Secrétariat des Nations Unies pour Le Corbusier ou quelques projets du jeune Louis I. Kahn.
5. Prise en compte des émissions indirectes de l'ensemble de la chaîne de valeur d'une entreprise, ici concernant les matériaux mis en œuvre.



Temp. max. process: T. ambiante > 1 000°C

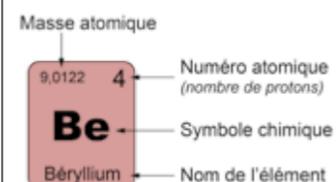
terre crue pierre bois terre cuite métaux béton vitrage

Cabinet de curiosités

Usages et formes du tableau de Mendeleïev



NOM : Mendeleïev
PRÉNOM : Dimitri
NATIONALITÉ : Russe
DATE DE NAISSANCE : 27/01/1834
LIEU DE NAISSANCE : Tobolsk



PRÉCOCE

À 16 ans, Mendeleïev entre à la faculté des sciences et mathématiques de Saint-Petersbourg où il étudie la chimie et la physique. Il en sort diplômé cinq ans plus tard et part rejoindre à Heidelberg, en Allemagne, le laboratoire des réputés Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff. En 1863, il retrouve les bancs de son Alma Mater en tant que professeur.

VISIONNAIRE

En 1869, Mendeleïev fait une découverte qui inscrit définitivement son nom dans l'histoire des sciences, le classement périodique des éléments chimiques. D'autres savants avaient tenté l'entreprise de les ordonner, comme Lavoisier en 1789 ou Newlands en 1863. Mais Mendeleïev est visionnaire : à l'époque, on ne connaît que 63 éléments. Il laisse des cases vides, pressentant qu'elles correspondront à des éléments qui seront découverts. Le Français Lecoq de Boisbaudran lui donne raison en 1875 lorsqu'il découvre le gallium, appelé dans le tableau de Mendeleïev «éka-aluminium».

CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Considéré comme l'une des plus belles œuvres scientifiques du XIX^e siècle, le tableau périodique de Mendeleïev distingue plusieurs familles d'éléments et les classe selon leurs propriétés chimiques : les métaux vrais regroupant les métaux alcalins et les métaux alcalino-terreux, les métaux de transition, les métalloïdes, les non-métaux, les halogènes, les gaz nobles, les lanthanides, les actinides et les transuraniens. Cette classification est qualifiée de «périodique» car les propriétés chimiques des éléments reviennent périodiquement à chaque saut de ligne. Ici, le tableau périodique est limité aux 92 éléments chimiques naturels.

Deux questions à l'auteur et conférencier Alexandre Marciel

«Le tableau de Mendeleïev est un alphabet universel puissant»

Vous avez publié en 2018 un livre *Le chasseur d'atomes* (Az-art atelier éditions) qui relate une drôle d'épopée : la rencontre de 500 labos et entreprises et la collecte de milliers de minerais et de matériaux. Comment vous est venue cette idée ?

Un jour, alors que je roulais dans ma voiture, j'ai été saisi par une image troublante : j'étais un tas de cailloux conduisant dans un tas de cailloux sur un tas de cailloux. Ma quête est partie de là. J'ai senti, ce jour-là, que le tableau périodique de Mendeleïev était une sorte d'alphabet universel puissant composé d'atomes, tout aussi stratégique que celui que nous utilisons tous les jours pour communiquer. Avec cette bonne centaine de lettres, on peut tout décrire et tout créer : l'univers, les mondes minéral, végétal, animal et technologique.

Vous avez constitué une collection conséquente de matériaux, de minerais et de technologies. Pourquoi cette approche physique ?

Pour une raison simple. Je crois qu'on ne peut comprendre les enjeux (que revêtent les éléments

du tableau périodique, ndr) que si on les voit et touche du doigt à l'état de pierres, d'éléments «purs» ou de matériaux. Le sous-titre que j'ai donné à mon livre, *Le high-tech à l'âge de pierre*, le rappelle. On prête au numérique à tort quelque chose d'esotérique. Derrière le numérique se cache un monde bien réel fait de cailloux «recombinés». À travers cette connaissance des pierres, on peut lire toute la trame de notre histoire et de ses conflits, celle de nous humains qui vivons

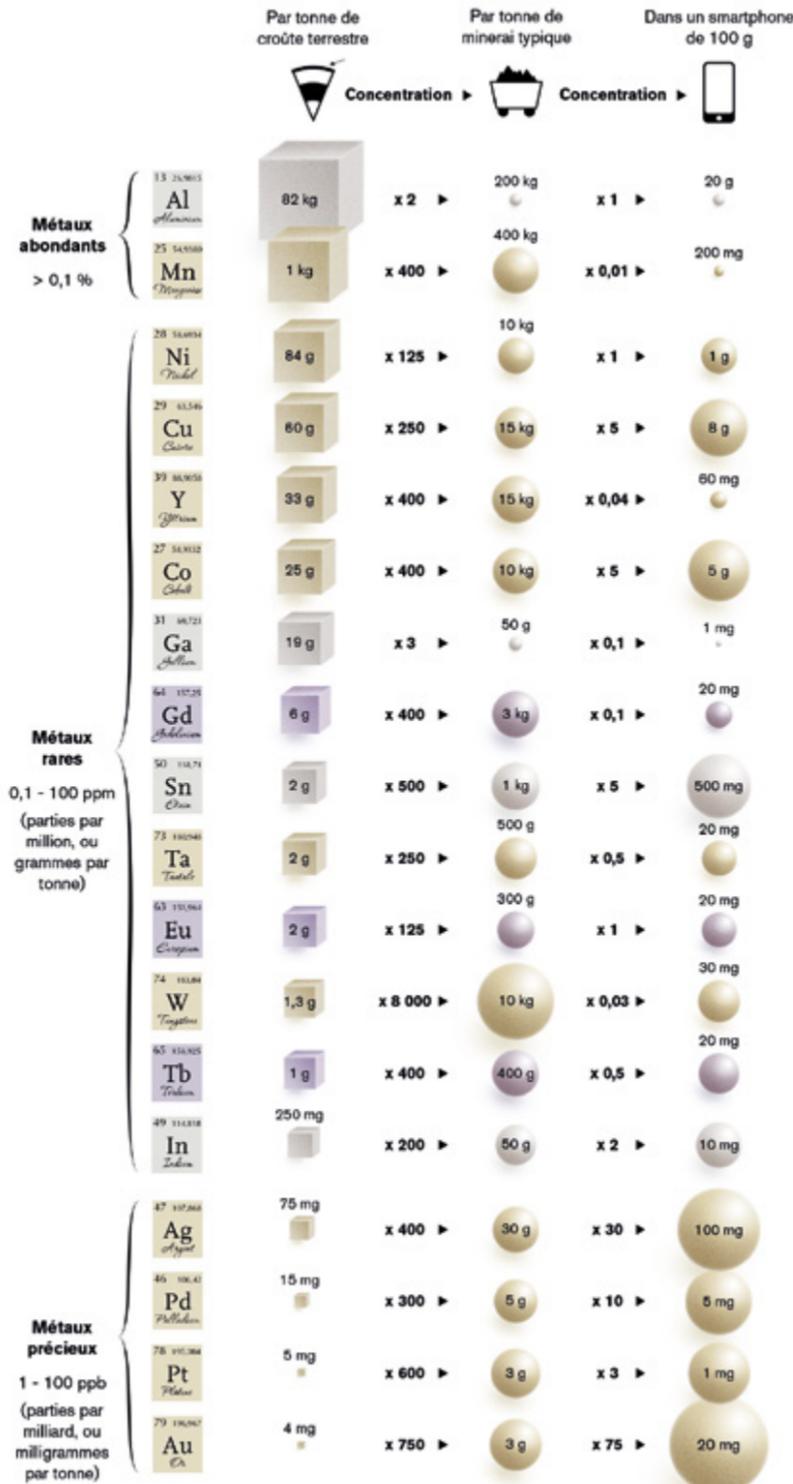
sur un gros caillou, notre terre, et qui frottons leur imaginaire à ces pierres pour y incarner les rêves les plus fous, les plus inattendus, souhaitables comme terribles. Qui aurait pu imaginer à l'époque des hommes préhistoriques qui laissaient les traces de leur passage à même la roche, qu'aujourd'hui, nous continuerions à reproduire des images et même des vidéos accessibles sur un téléphone portable toujours grâce à l'utilisation de roches... stratégiques? •



Tableau périodique fabriqué par le chasseur d'atomes

Le smartphone, machine à concentrer les métaux « rares » ?

infographie Florent Lavergne



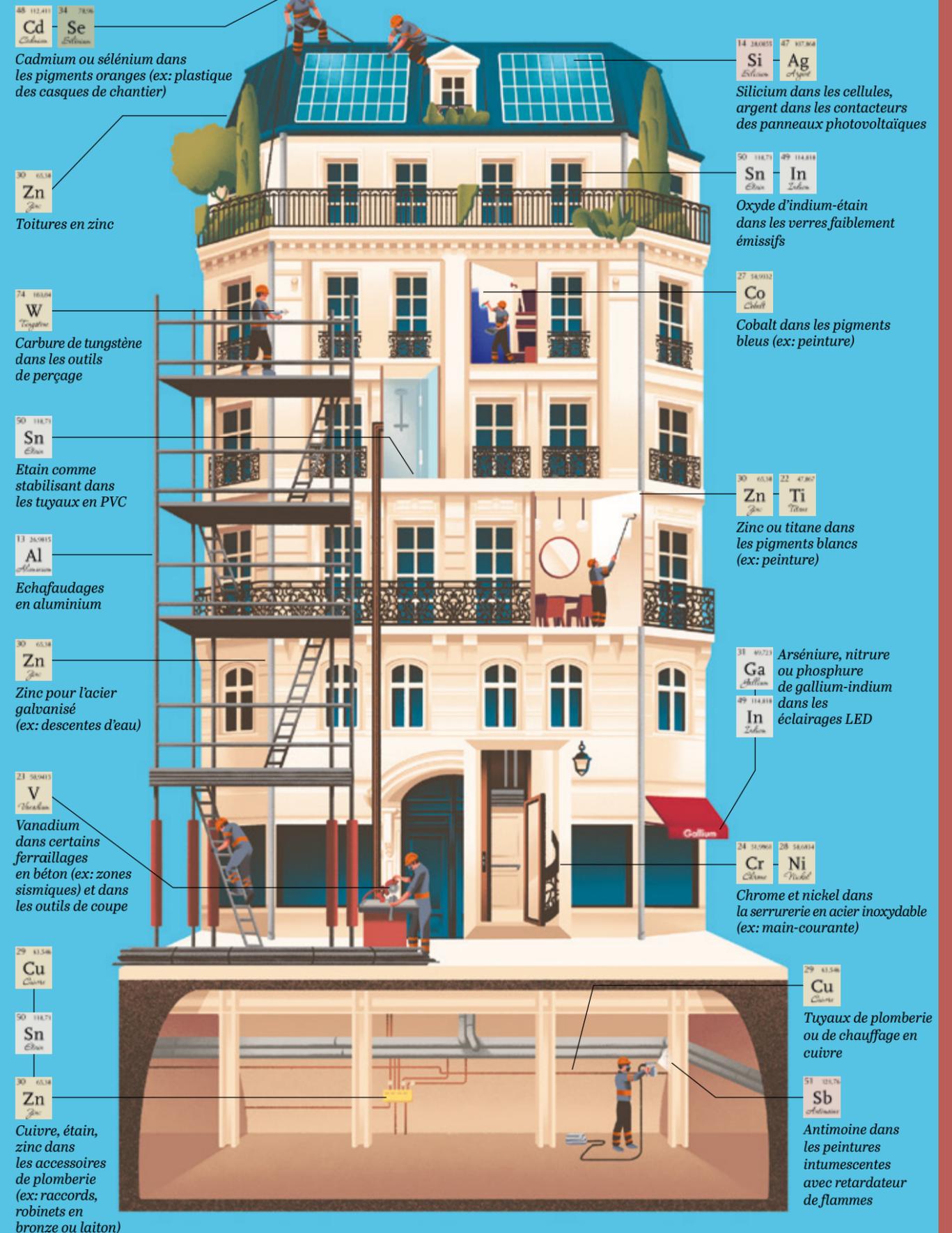
→
Visibles ou dissimulés, les métaux, métalloïdes, et autres éléments atomiques peu abondants sur Terre sont partout autour de nous: comme pigments ou additifs dans les peintures et les plastiques, comme éléments constitutifs ou d'alliage dans les objets et les matériaux techniques, sans même parler des équipements électriques et électroniques... Mendeleïev et son tableau s'invitent, plus ou moins intensément, dans toutes les formes de bâtis, des sous-sols aux toitures, des tuyaux de salles de bain aux peintures murales. Petit tour – non exhaustif – du propriétaire.

Clé de lecture

Le cuivre est 250 fois plus concentré dans les mines que dans la croûte terrestre, et cinq fois plus concentré dans un smartphone que dans les mines.
Les terres rares comme le gadolinium, l'europium ou le terbium sont 100 à 400 fois plus concentrées dans les mines que dans la croûte terrestre; mais leur concentration dans un smartphone peut être de un à dix fois inférieure à celle des mines (nota: on obtiendrait des chiffres différents en ne prenant que l'écran LCD où ils sont incorporés dans les luminophores).

- Les cubes sont proportionnels à la quantité (échelle logarithmique)
- Les sphères sont proportionnelles au facteur de concentration par rapport à la croûte terrestre (échelle logarithmique)

Mendeleïev dans le bâti



La face cachée des déchets du BTP : des pratiques à transformer

texte Sophie Kloetzli



Recyclage limité, réemploi quasi inexistant : les déchets du bâtiment et des travaux publics s'amoncellent et peinent à entrer dans la boucle de l'économie circulaire. La raréfaction des ressources et les évolutions réglementaires pourraient néanmoins changer la donne. À condition de rénover en profondeur la filière, de la conception des bâtiments aux méthodes de déconstruction.

Gravats, isolants, tuiles, céramiques, plastiques... Le méli-mélo de matières accumulées par les chantiers du BTP atteint 240 millions de tonnes par an en France, soit 70 % du total des déchets du pays selon l'Agence de la transition écologique (Ademe)¹. Un chiffre vertigineux que l'on a parfois tendance à analyser un peu vite sous une catégorie uniforme. L'écrasante majorité de ces déchets (à hauteur de 97 % dans les travaux publics en termes de poids, 85 % dans les travaux de gros œuvre ayant trait à la structure des bâtiments) est dite « inerte », c'est-à-dire ne se décomposant pas et ne produisant aucune réaction chimique ou physique. Il s'agit notamment des bétons et des terres cuites, lesquels font l'objet d'un taux de valorisation assez élevé, à hauteur de 77 % dans le bâtiment². Mais valorisation n'est pas forcément recyclage. En Île-de-France, « l'une des filières principales est l'utilisation de ces matériaux, et notamment des terres excavées, dans le réaménagement de carrières, indique Agnès Bastin, docteure en études urbaines de Sciences Po Paris, dont la thèse porte sur les déchets de chantier. Ceux-ci peuvent aussi être envoyés dans des installations de stockage des déchets inertes et servir de remblais, par exemple paysagers pour aménager des parcs. » Bien souvent, comme il s'agit de matières

lourdes dotées d'une faible valeur économique et dont le transport coûte cher, c'est la logique de proximité qui prime. Le recyclage à proprement parler ne concerne, lui, que 39 % des déchets inertes (hors verre) et consiste, en ce qui concerne le béton, à le concasser afin de l'utiliser comme sous-couche routière. « Des déchets générés par le bâtiment se retrouvent ainsi dans les travaux publics et le génie civil, pour des usages de moindre qualité technique et de moindre valeur économique que les usages en bâtiment. La circularité est donc limitée, analyse Agnès Bastin. Ce modèle pose des questions d'approvisionnement en matières, que l'on continue à extraire faute de recycler les déchets dans la construction, mais aussi de foncier, car ces installations de stockage prennent beaucoup de place. »

Contraintes techniques et idées reçues

Pourquoi les déchets de béton ne sont-ils donc pas davantage incorporés dans la construction de nouveaux bâtiments ? La réglementation française permet pourtant d'utiliser jusqu'à 30 % de granulats recyclés selon les usages, et même 60 % dans certaines parties de la structure des constructions. Ces limites sont

dues à «une certaine altération des propriétés mécaniques liée au surcroît de porosité apportée par la gangue d'ancienne pâte de ciment contenue dans les granulats recyclés»³, expliquent dans un rapport les porteurs du projet national Recybéton (2012-2018) consacré à l'introduction de granulats recyclés dans le béton destiné à la construction. Il n'en reste pas moins que les bétons (en partie) recyclés «sont des matériaux qui peuvent être de bonne qualité», assure Pierre-Yves Mahieux, chercheur au Laboratoire des sciences de l'ingénieur pour l'environnement à l'université de La Rochelle. Selon lui: «Le gros travail que l'on doit faire consiste à persuader la maîtrise d'ouvrage d'utiliser ces matériaux-là en lieu et place des matériaux neufs. Beaucoup voient encore les granulats recyclés comme des déchets, qui seraient donc de moindre qualité.»

Le béton n'est pas le seul à faire face à des contraintes spécifiques. Les taux de recyclage parlent d'eux-mêmes: 16 % pour le plâtre, 3 % pour le verre plat, moins de 1 % pour les laines minérales et les moquettes⁴... Dans le cas du verre, c'est le tri sur les chantiers qui pose des difficultés. «Le frein au recyclage provient du fait que le verre doit être non souillé ou non endommagé: les critères d'acceptabilité du verre pour qu'il soit recyclé en calcin sont jugés difficiles à respecter», détaille un rapport de l'Atelier parisien d'urbanisme⁵. Résultat: les vitrages sont le plus souvent valorisés comme sous-couche routière ou enfouis.

D'autres matériaux, comme les revêtements de sols textiles, font face à des enjeux d'ordre économique et réglementaire. «La plupart des moquettes sont aujourd'hui envoyées en incinération ou en décharge après utilisation. Cela tient notamment au fait que les acteurs de la filière ne sont à aucun moment incités à modifier leurs façons de faire. Rien n'est fait pour faciliter la collecte des moquettes après leur utilisation», décrypte un rapport de Zero Waste France et Changing Markets⁶. Ce qui n'a pas empêché un certain nombre d'innovations de voir le jour. En partenariat avec l'entreprise de textile italienne Aquafil, la multinationale

française Tarkett a mis au point un processus de recyclage des moquettes consistant à séparer la sous-couche de la fibre textile. Le fil de polyamide est ensuite transformé en fil de nylon et utilisé dans des moquettes neuves. Si le réemploi est encore rare, des entreprises comme le français Orak montrent la voie en proposant des services de maintenance et de pose de dalles de moquettes de seconde main, qu'il dit «aussi belles que neuves».

«Déchets mélangés dans les bennes»

Entre pénurie et hausse du prix des matières premières d'un côté et l'évolution de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) sur l'enfouissement des déchets de l'autre, le vent est en train de tourner. «Un grand écart s'est produit ces dernières années entre le coût de l'évacuation du déchet et celui de la valorisation», observe Thibaut d'Hau Decuyppère, directeur d'EndLess, une solution de collecte et de valorisation des déchets de chantier en *big bags* (sacs de transport) et en bennes. Il évoque notamment le cas du bois – qui peut être broyé en copeaux pour faire de la pâte à papier, des panneaux de bois ou des pellets – et du plâtre, qui peut être réduit en poudre de gypse. Première filière de recyclage du plâtre en France, Placo (filiale de Saint-Gobain) vise ainsi une incorporation de 30 % de plâtre recyclé dans de nouvelles plaques d'ici à 2030, contre 20 % en 2022.

La mise en œuvre en 2023 de la filière Responsabilité élargie des producteurs (REP) des déchets du bâtiment – consistant à généraliser le tri à la source par le biais d'éco-organismes dédiés, mais aussi à développer l'écoconception pour faciliter le recyclage et le réemploi en fin de vie – pourrait également donner un coup de pouce à ces filières. «Cela devrait apporter des garanties en termes de volume qui vont permettre de réaliser des investissements industriels», estime Rym Mtibaa, experte des déchets du bâtiment et directrice des projets chez EndLess.

La généralisation du tri à la source s'impose

avec d'autant de force qu'actuellement «beaucoup de déchets du bâtiment se retrouvent mélangés dans des bennes, de l'ordre de 40 % du gisement», soulève Florence Godefroy, coordinatrice de pôle au sein de la direction de la supervision des filières REP à l'Ademe. «Depuis plusieurs années, on constate que les pratiques de déconstruction sélective [consistant à séparer les composants d'un bâtiment à la fin de leur vie utile dans le but d'en conserver les qualités] et de tri sur chantier sont difficilement, ou assez lentement, mises en œuvre, poursuit-elle. Or cela nuit à la possibilité de recyclage et de réemploi, car un tri ultérieur manuel n'est pas envisageable d'un point de vue économique, et un tri mécanique, pas forcément réalisable.» La filière REP naissante espère ainsi porter le taux de recyclage des déchets inertes (hors verre) de 39 à 55 %, et doubler le taux de recyclage des déchets non inertes et non dangereux (bois, plastiques, textiles...) en l'espace de six ans.

«Déconstruire avec un tournevis plutôt qu'une masse»

Une telle accélération nécessiterait une meilleure organisation de la filière, à commencer par la traçabilité des déchets que les éco-organismes devront assurer dans le cadre de la REP. «Savoir que le matériau vient de tel bâtiment, qu'il a été démolé avec telle méthode, que le tri s'est fait de cette façon et a transité par tel gestionnaire de déchets et par tel préparateur matière... Tout cela permet de créer un lien de confiance. C'est la clé de réussite de toute nouvelle filière de valorisation», appuie Rym Mtibaa. C'est aussi vrai pour le recyclage que pour le réemploi, qui n'atteint aujourd'hui que 1 % en Europe dans le secteur du bâtiment⁷, et concerne principalement des éléments du second œuvre: menuiseries, sols, faux plafonds... Or le réemploi (pour des usages identiques à ceux qui étaient prévus initialement) et la réutilisation (pour des usages différents), moins énergivores que le recyclage, se trouvent tout en haut de la hiérarchie des modes de traitement des déchets et devraient, à ce titre, être privilégiés partout, rappelle

Florence Godefroy. Pour Zélie Perrin, chargée de projets au sein du Booster du réemploi qui mobilise les acteurs du bâtiment pour massifier le réemploi, un changement de perception s'impose: «La vision du bâtiment comme une banque de matériaux, qui permettrait aux propriétaires et aux exploitants d'avoir une connaissance beaucoup plus fine et précise de quoi ils sont constitués, est encore trop peu développée.» Une déconstruction sélective et réfléchie est néanmoins plus coûteuse et longue qu'une démolition classique, ajoute-t-elle tout en soulignant un «véritable levier de création d'emploi». Il s'agit de «déconstruire avec un tournevis plutôt qu'une masse», résume Rym Mtibaa. Un changement de paradigme que devraient faciliter les pratiques d'écoconception. Reste que dans la perspective d'une économie véritablement circulaire, le modèle de renouvellement urbain dominé par les démolitions et les reconstructions plutôt que par les opérations de réhabilitation et de rénovation pose aujourd'hui question. «Étant donné le rythme de démolition et le fait que l'on ne peut pas recycler à 100 %, prévient Agnès Bastin, on va finir par se heurter à des limites physiques à force d'extraire des matières premières.» •

1. Ademe, «Déchets chiffres-clés – L'essentiel 2021», avril 2022.
2. Ademe, «Étude de préfiguration de la filière REP. Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment», mars 2021.
3. Recybéton, «Comment recycler le béton dans le béton», 2019.
4. Ademe, «Étude de préfiguration de la filière REP. Produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment», mars 2021.
5. Apur, «Principales filières des déchets du BTP. Quels organismes, valorisations et gisements à venir?», février 2022.
6. Zero Waste France et Changing Markets, «Moquettes: la planète au bout du rouleau», février 2017.
7. Selon les chiffres du projet FCRBE destiné à faciliter le réemploi des matériaux et des équipements de construction en Europe du Nord-Ouest.

Jean Souviron

« L'invention du vitrage isolant est aussi l'invention d'un déchet »

propos recueillis par Sophie Kloetzli

Architecte, ingénieur et docteur en art de bâtir et urbanisme de l'université libre de Bruxelles, Jean Souviron a consacré ses recherches à l'impact écologique des politiques d'efficacité énergétique, et notamment au vitrage isolant, qui n'est pas à un ou deux paradoxes près.

Quel diagnostic faites-vous de l'empreinte environnementale et de la recyclabilité des vitrages ?

J.S. Le premier aspect est la consommation de matières premières [principalement du sable] extraites et transportées en très grandes quantités. Il y a ensuite une problématique de dépendance aux énergies fossiles, notamment au gaz utilisé dans les fours verriers dont les températures atteignent facilement 1 500 °C. À l'autre extrême du cycle de vie, se pose le problème de la recyclabilité. Entre les années 1950 et 1980, du fait notamment des réglementations thermiques, les vitrages simples ont laissé la place aux vitrages isolants. Ce qui veut dire que ce n'est jamais seulement du verre que l'on utilise, mais deux ou trois feuilles de verre maintenues espacées par ce que l'on appelle un espaceur, le tout scellé par un joint étanche. Différents matériaux sont ainsi assemblés : de l'aluminium, des plastiques, des matériaux composites. En fin de vie, les séparer est compliqué – c'est encore assez anecdotique et expérimental – et surtout peu rentable face au prix de la matière première. L'invention du vitrage isolant est donc aussi l'invention d'un déchet. Alors que le verre, en soi, est un matériau extrêmement durable et résistant qui se recycle facilement.

Dans quelle mesure le recyclage du verre est-il réellement intéressant, en termes d'impact environnemental, par rapport à la fabrication de verre vierge ?

J.S. Le différentiel est assez important. Pour produire une tonne de

BETTER YOUR LIVING in a new home with Thermopane between you and the weather

You'll be happier in a new home! Today's new homes are better planned for family living. And better built! Builders are using advanced building materials, like Thermopane insulating glass! It keeps you snug in winter, comfortable in summer.

Builders know that without windows of Thermopane a house is only partially insulated. It's colder in winter—harder to heat; hotter in summer—harder to keep cool. Costlier to keep comfortable all year 'round. Thermopane's two panes of glass, with dry air

between, cut down fogging and frosting... protect you from drafts... increase your living space because you're comfortable close to windows. You can forget about storm windows!

This weekend, why not visit the model homes on display in your community? And write for your copy of the beautifully illustrated booklet describing Thermopane insulating glass and what it does for you. Dept. 6108, Libbey-Owens-Ford Glass Company, 608 Madison Avenue, Toledo 3, Ohio.

NEW SUPER
Thermopane
INSULATING GLASS
LIBBEY-OWENS-FORD
A Great Name in Glass TOLEDO 3, OHIO

verre recyclé, on n'a besoin que d'une tonne de déchets verriers, au lieu de 1,2 tonne de matières premières. De plus, l'ajout de ces déchets dans les fours accélère la fusion puisque les réactions chimiques entre les ingrédients du verre ont eu lieu lors de la première cuisson. Cela permet d'économiser de l'énergie; en recyclant le verre, on évite donc des émissions de CO₂.

En 2022, Saint-Gobain a annoncé avoir réussi une première mondiale en fabriquant du verre plat «zéro carbone», constitué à 100 % de débris de verre, ou calcin. Ce type de procédé

préfigure-t-il l'avenir de l'économie (circulaire) du verre ?

J.S. Cela préfigure en tout cas l'écologisation des discours dans l'industrie de la construction. Sur le calcin, l'enjeu est non seulement le transport (qui pollue forcément) mais aussi d'en avoir suffisamment par rapport à la demande dans une perspective de croissance ou de maintien des taux de production, ce qui n'est pas le cas. On pourrait plutôt imaginer une situation de décroissance de la production du verre et se concentrer sur la maintenance des vitrages existants et la réparabilité des nouveaux. •

En Gironde, une école en terre crue veut être l'élève modèle de l'écoconstruction

texte Annabelle Laurent
photos Manuel Aranha



À Taillan-Médoc, groupe scolaire à l'architecture écoresponsable, performante et biosourcée

Au nord de Bordeaux, la ville du Taillan-Médoc achève la construction d'une école en terre crue, paille et bois. Inédit dans la région et très observé, le projet pourrait insuffler une dynamique autour de ces matériaux si précieux à l'heure du réchauffement climatique.

Il faut, en arrivant sur le site, un peu d'imagination. Ici, au cœur d'un quartier pavillonnaire, sur le parking encombré où nous avons rendez-vous, se situe la future cour de récréation. Là-bas, le préau. En bas, les maternelles, et à l'étage, les classes élémentaires. Dans quelques mois, l'agitation régnera du matin au soir entre ces murs. Pour l'instant, avant celles des parents d'élèves, l'heure est aux réunions de chantier. C'est à l'issue de l'une d'elles que nous retrouvons William Saves, architecte du cabinet bordelais Node, choisi par la commune du Taillan-Médoc.

Une autre esthétique

Le Bordelais a l'habitude de faire visiter les lieux, déserts ce vendredi après-midi après la «débâche», telle qu'on l'appelle dans le Sud-Ouest. Première étape du parcours: les fameux murs en pisé. Ceux qui valent à l'école d'être désignée comme étant «en terre crue». Le matériau est pourtant loin d'être omniprésent: seuls les murs côté rue sont en pisé. Toutes les autres parois du bâtiment sont faites de caissons isolés en paille avec des ossatures bois. Reste que le recours au pisé pour un bâtiment public de cette taille (surface de plancher: 2 516 m²) est très rare. En Gironde, c'est une première. Rappelons la méthode: la terre, crue car elle n'a pas fait l'objet d'une cuisson et n'a pas été stabilisée avec de la chaux, est

tassée dans des coffrages, en couches successives, ici de 10 cm, jusqu'à atteindre la hauteur attendue. Rien de difficile, estime l'architecte, le montage est surtout «long», s'étalant sur les étés 2021 et 2022. «On doit se plier à la saisonnalité, rappelle-t-il. On ne peut travailler qu'aux beaux jours, pour limiter l'hygrométrie.» C'est en partie pour cette raison que la zone en terre crue n'est pas si importante. «Du point de vue du phasage, du temps de chantier, il aurait été vraiment compliqué de l'agrandir, complète par téléphone Matthieu Fucks, co-gérant de l'agence Mil Lieux, engagée aux côtés de l'agence Node dans le projet. La terre reste un élément fragile, à l'eau, aux chocs, il y a des précautions à prendre. Surtout, ça coûte cher! Car ce sont des techniques qui ne peuvent pas être industrialisées.» Et l'architecte d'évoquer sans détour un coût de «1 000 euros le mètre carré» pour les murs du projet. Au moment de notre visite, sur un chantier qui semble encore loin du compte, le mur n'en est pas moins fini... Il semble pourtant ne pas l'être tout à fait. Bien qu'un mélange de terre et de chaux ait été utilisé sur les arêtes pour les protéger, l'essentiel de la surface arbore un aspect très brut. «On s'est inspiré des murs traditionnels en pisé avec l'envie que le rendu soit le plus rustique possible, explique William Saves. Si c'est pour imiter le béton, ça n'a pas d'intérêt. Nous voulons que les gens s'habituent à une autre esthétique.»

La barre haute

Surprendre le public, et pousser les curseurs au maximum pour le sensibiliser et l'habituer à l'architecture durable: telle est l'ambition affichée du projet. En premier lieu pour la maîtrise d'ouvrage, la ville du Taillan-Médoc (10 000 habitants). Une commune... très déterminée.

L'idée remonte à 2016. La ville décide à l'époque de construire un quatrième groupe scolaire: sa démographie est en hausse et un cabinet d'études a projeté l'arrivée de 134 enfants supplémentaires à scolariser dans les cinq ans. Pour cette quatrième école, la maire, Agnès Versepuy, veut un projet phare, exemplaire sur le volet environnemental. En 2018, les candidatures sont ouvertes, avec «*la volonté de choisir celle qui nous proposerait le degré le plus élevé en termes de décarbonation, de matériaux biosourcés...*», relate Germain Isern, directeur de cabinet d'Agnès Versepuy. Parmi les candidats, un groupement d'architectes avait «*mis la barre très haute*», au point de susciter «*des doutes*» du côté de la mairie, consciente que la filière pour les matériaux biosourcés, très présents dans la candidature en question, n'est encore «*que très peu structurée en Nouvelle-Aquitaine*». Certains membres de la commission d'appel d'offres sont par ailleurs particulièrement «*réticents à lancer un projet autour de la terre crue, parmi eux, des architectes et des techniciens*», assure le directeur de cabinet. *Il a fallu que la maire argumente sur la structuration que cela pourrait apporter à la filière et sur l'importance de l'investissement public pour promouvoir des projets en décalage avec les pratiques actuelles.*» Finalement, banco: accompagnées par AIA et 180 degrés ingénierie, l'agence Node (Bordeaux) et l'agence Mil Lieux (Nancy), qui ont toutes deux fait leurs preuves avec des projets d'architecture écoresponsable, performante et biosourcée, l'emportent.

Quatre ans plus tard, alors que nous parcourons les différents espaces de l'imposant bâtiment qui doit être livré en juin, William Saves énumère les objectifs atteints. En se référant au label E+C-, qui a servi de «*grille de conception*» (et qui



Mil Lieux Architecture et Node Architecture.
Photos © Manuel Aranha

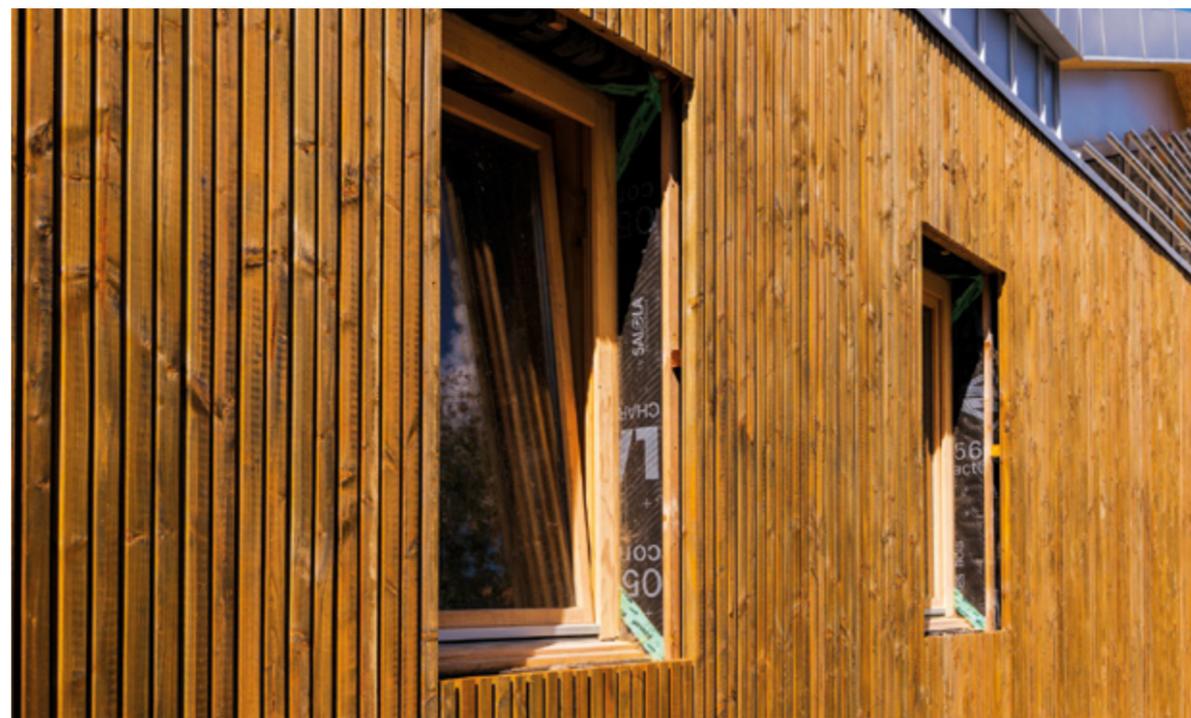
atteste depuis 2016 de la performance énergétique d'un bâtiment et de son niveau d'émissions de gaz à effet de serre), le niveau E3/C2 (très exigeant) est atteint. Pour les matériaux, bien que les fondations soient en béton, le projet atteint un ratio de 120 kilos de matériaux biosourcés par mètre carré, et «*dépasse ainsi largement le niveau maximum du label "Bâtiment biosourcé", fixé à 36 kilos par mètre carré*», se réjouit l'architecte. Ces matériaux biosourcés proviennent par ailleurs d'un rayon de 80 kilomètres maximum. La terre crue vient de l'est de la Gironde, la paille du sud de la Charente, le bois du massif de la Gironde. Un approvisionnement local rare dans les constructions en France, en particulier pour le bois, souvent importé d'Allemagne ou du nord de l'Europe.

Pari économique

Au cœur du projet: la volonté de créer une isolation très performante pour réduire les besoins en énergie et assurer un confort thermique l'hiver et l'été. «*Nous sommes partis des rapports du GIEC et des projections pour 2050, avec un climat qui se sera largement réchauffé sur la métropole, et des canicules plus violentes et plus précoces*», poursuit William Saves. *Face à cela, notre conception nous permet d'obtenir des temps de déphasage (la durée de pénétration de la température extérieure) de 9 à 12 heures selon les parois.*» La complémentarité des matériaux est la clé: l'isolation est apportée par la paille, et la terre crue, très efficace pour stocker aussi bien la chaleur que la fraîcheur, permet de travailler sur le déphasage.

L'avantage de cette performance thermique, au-delà bien sûr du confort des enfants qui y passeront leurs journées, est économique. Les dépenses d'énergie prévues sont minimales. Or l'argument est décisif pour une maîtrise d'ouvrage

s'étant lancée dans un projet à neuf millions d'euros. «*Nous avons fait le calcul: la construction nous coûte environ un tiers plus cher que pour une école classique, mais du fait des flux d'énergie très faibles, nous amortirons le surplus des travaux en moins de dix ans*», assure le directeur du cabinet d'Agnès Versepuy. Un argument important pour convaincre les habitants – surtout ceux s'étant inquiétés lors des réunions de quartier du coût important du projet – «*que les investissements d'aujourd'hui sont les économies de demain et que ce n'est pas une "lubie écolo" mais aussi une manière de bien gérer l'argent public*», assure-t-il. Autre élément du calcul: l'opportunité d'obtenir, grâce aux performances environnementales record du bâtiment, des subventions exceptionnelles de la part de l'État, de la Région (label Bâtiment du futur), de la Métropole, pour atteindre plus de quatre millions d'euros au total. L'école Anita Conti ouvrira donc ses portes en septembre, rejoignant le club très fermé des bâtiments publics ayant



Mil Lieux Architecture et Node Architecture. Photos © Manuel Aranha

«La construction nous coûte environ un tiers plus cher, mais du fait des flux d'énergie très faibles, nous amortirons le surplus en moins de 10 ans.»

mis en œuvre de la terre crue, soit seulement «vingt à trente» bâtiments ces quinze dernières années, estime Matthieu Fucks de l'agence Mil Lieux. À la rentrée 2019, l'école Miriam Makeba, construite en partie en pisé, à Nanterre, avait concentré l'attention. Qui prendra la suite?

Pour que de tels projets, coûteux, puissent voir le jour, l'implication du secteur public semble en tout cas déterminante...

Mais d'autres leviers sont à activer en parallèle. Sur le cas précis de la terre crue, «la formation est un frein très fort: très peu d'artisans sont formés à ces techniques», déplore Boris Delafoulhouze, architecte, membre du collectif CANSAN et du projet Des terres, lancé en 2021 pour «caractériser, sensibiliser et fédérer autour du matériau terre crue en Nouvelle-Aquitaine».

S'ajoute le frein de la réglementation. Une «contrainte» plutôt qu'un réel frein, tempère Matthieu Fucks qui insiste: «Nous disposons aujourd'hui de règles professionnelles éditées par des acteurs du monde de la terre crue qui permettent d'avoir des éléments de lecture, de caractérisation et de dialoguer avec les bureaux de contrôle!»

Boris Delafoulhouze évoque encore le frein des ressources car «si la terre crue est une ressource très présente, les canaux de distribution ne sont pas au point, entre les terres polluées, les gros volumes... D'où la nécessité de ne pas concevoir sans avoir un gisement en tête». «Dès la phase concours, vous devez faire une cartographie des artisans disponibles, une autre de la ressource disponible... Tout se pense très en amont, renchérit Matthieu Fucks. Sur le moment, c'est un chemin de croix. Il ne faut pas taire les difficultés. Mais encore moins les avantages, qui eux sont indéniables.» La route est encore longue... mais à chaque nouveau projet pilote capable de rayonner et de fédérer la filière, l'horizon peut s'éclaircir. •



Plan du rez-de-chaussée

Le ciment bas carbone, une solution béton ?

texte Vincent Gautier

Les chiffres donnent le vertige. Ingrédient incontournable du béton, matériau le plus utilisé sur notre planète, le ciment est responsable à lui seul de l'émission de plus de 2 milliards de tonnes de CO₂ par an. Que vaut sa version bas carbone ?



Poudre de ciment décarboné, Hoffmann Green

Sur le podium des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre, elle figurerait sur la troisième marche, seulement devancée par la Chine et les États-Unis. S'agit-il de l'Inde ? Ou bien de l'Union européenne ? Non, la place serait occupée par l'industrie du ciment. Selon l'Association mondiale du ciment et du béton (GCCA), elle est responsable à elle seule de l'émission de plus de 2 milliards de tonnes de CO₂ chaque année, soit presque 7 % du total mondial ! Le ciment représente ainsi la quasi-totalité des émissions liées à la production du béton, alors même qu'il ne constitue qu'environ 10 % de sa masse. « Dans un mètre cube de béton, 95 % des émissions de CO₂ sont liées au ciment et seulement 5 % proviennent des granulats », détaille Julien Blanchard, président du directoire de Hoffmann Green Cement Technologies. Décarboner cette filière est devenu un enjeu primordial pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, condition *sine qua non* pour limiter la hausse des températures à 1,5 °C d'après le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Un objectif que s'est également fixée la France dans le cadre de sa Stratégie nationale bas carbone (SNBC). Concernant le secteur du ciment, la feuille de route table pour 2050 sur une réduction de 80 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport à 2015.

Pour comprendre pourquoi le ciment est la source de tant d'émissions de CO₂, il faut s'arrêter sur le clinker, le principal ingrédient du ciment, qui résulte de la combustion d'un mélange de calcaire et d'argile. « Le clinkering se fait à environ 1 450 °C, explique Cyrille Dunant, chercheur au département d'ingénierie de l'université de Cambridge. Pour atteindre une telle température, il faut brûler des hydrocarbures et c'est une première source de CO₂. » Celle-ci représente environ un tiers des émissions. Les deux autres tiers proviennent de la réaction chimique se déroulant dans le four, qui implique la décarbonatation du calcaire.

La chasse au clinker

En l'espace de quelques années, les initiatives se sont multipliées pour s'attaquer à ce chantier d'ampleur. En France, la start-up landaise Matterup, créée il y a cinq ans, a mis au point un ciment comprenant jusqu'à 70 % d'argile crue non calcinée. Associée à un précurseur pouzzolanique et un activateur alcalin, elle est issue de terres d'excavation ou de coproduits non utilisés par les industries. « Nous souhaitons essaïmer sur l'ensemble des territoires pour rester au plus proche de la matière et la distribuer localement. Ce mode de distribution permet de réduire les transports entre l'extraction de la matière première jusqu'à la mise en œuvre du matériau sur les chantiers », ajoute Julie Neuville, responsable marketing de Matterup. Un ciment « 0 % clinker et sans cuisson, sans four, sans cheminée », c'est aussi le chemin emprunté par Hoffmann Green, fondé en 2014. « Nous utilisons des coproduits issus de l'industrie, notamment des laitiers de hauts fourneaux, mais aussi de l'argile, du gypse, des fillers », précise Julien Blanchard, indiquant par ailleurs que ces coproduits proviennent « principalement de France et d'Europe. Après leur activation à froid, ils réagissent de la même façon qu'un ciment Portland traditionnel lorsque l'on ajoute de l'eau, du sable et des granulats pour faire du béton. »

Produire du ciment en employant des déchets tout en évitant l'étape de la calcination, c'est également l'objectif de Saferock. Mais au lieu d'en passer par l'emploi de coproduits industriels comme les laitiers ou les cendres volantes, l'entreprise norvégienne concentre ses efforts sur une technologie à partir de résidus miniers mélangés à une solution de silicate alcalin. Saferock a pour cela développé son activité en partenariat avec la mine d'ilménite de Sokndal. « Il y a plus de 50 millions de tonnes de déchets miniers stockés dont ils ne savent pas quoi faire », expose Stian Rossi, architecte et directeur commercial de Saferock.

«Nous tentons de cette façon de régler la question des émissions de CO₂ liées au ciment et celle des déchets miniers.» Cyrille Dunant et ses collègues de Cambridge ont pour leur part tourné leur regard vers l'industrie de l'acier pour baisser la facture en carbone du ciment. Ils ont ainsi eu l'idée d'utiliser le ciment usagé à la place de l'habituelle chaux lors du recyclage de l'acier, qui s'effectue à haute température dans des fours à arc électrique. Il se trouve que le laitier en résultant, refroidi puis réduit en poudre, a la composition chimique d'un clinker. «Nous avons vu que cela fonctionne à petite échelle. Maintenant, la question est de savoir comment ajuster notre recette à l'échelle industrielle pour obtenir un produit constant à la fin du processus», précise Cyrille Dunant.

Moins de carbone, et après ?

Pour l'ensemble de ces innovations, la réduction des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux ciments Portland traditionnels est indéniable, oscillant actuellement entre -50 % pour Materrup et -80 % pour Hoffmann Green ou Saferock. Présenté comme le «premier ciment zéro carbone» dans un communiqué de presse en mai 2022, le Cambridge Electric Cement (CEC) génère plus probablement «entre 50 et 100 kg de CO₂ par tonne, soit 10 % d'un ciment Portland», reconnaît Cyrille Dunant, qui justifie notamment cet écart par le choix d'attribuer plus ou moins d'émissions de CO₂ à l'industrie de l'acier ou à la production de ciment. Le cimentier français Vicat se targue même d'un bilan carbone négatif pour son dernier-né, le liant Carat. Le résultat, lié à une faible teneur en clinker et à l'incorporation de biochar, un sous-produit de la filière du bois capable d'absorber le carbone, est cependant à relativiser puisqu'un tel résultat ne peut être obtenu qu'en faisant fi du sort de ce béton et de ce carbone capturé lorsque le matériau arrive en fin de vie. Malgré cet argument de taille, ces ciments décarbonés n'ont pas encore balayé les ciments Portland. Le CEC en est à ses balbutiements tandis que Saferock doit



Chantier Maulini à Genève, Hoffmann Green

ouvrir son usine-pilote d'ici six à huit mois. Pour Matterup et Hoffmann Green, les volumes de production ne s'élèvent pour le moment qu'à quelques dizaines de milliers de tonnes par an, quand l'ensemble du marché hexagonal en représente près de 18 millions. Et dans la perspective d'une montée en puissance de ces solutions, celles d'Hoffmann Green pourraient également être freinées par la disponibilité limitée des laitiers de hauts fourneaux, dont 80 % sont déjà utilisés pour la fabrication de ciment. Mais leurs parts microscopiques actuelles n'entament pas l'optimisme de Julie Neuville ou Julien Blanchard, qui mentionnent la réduction de l'écart de prix à venir entre leur ciment et le Portland. «Nous estimons que les deux courbes vont se croiser d'ici 2026 du fait de l'augmentation du prix de Portland et du coût de l'énergie», anticipe ce dernier.

Par ailleurs, si les applications des nouveaux ciments recouvrent la construction d'immeubles de plusieurs étages, les ouvrages de génie civil restent pour le moment hors de portée. «Nous faisons attention, en avançant pas à pas, assure Julien Blanchard. Aujourd'hui, nous nous refusons par exemple de faire des piles de pont.» Materrup a adopté un positionnement similaire. «Les ouvrages d'art, les

viaducs ont été exclus parce que ce n'est pas le cœur de notre cible, fait valoir Julie Neuville. Nous nous sommes, dans un premier temps, concentrés sur 80 % des usages du ciment et du béton portant entre autres sur la rénovation des trottoirs ou la construction de bordures d'autoroute, de logements sociaux ou d'Ehpad.» Ces limites économiques et techniques posées, la question de l'impact du béton sur l'environnement ne s'en trouve pas épuisée. Aux émissions de CO₂ viennent notamment s'ajouter l'artificialisation des sols, la disparition de plages ou la destruction des lits des rivières provoquée par les quantités phénoménales de sables et granulats extraites. Julien Blanchard affirme en être bien conscient: «Nous devons également nous attacher à la préservation des ressources naturelles. Nous menons des essais en interne pour utiliser des granulats moins nobles issus de la déconstruction ou des déchets. Ce sera la prochaine étape pour proposer un béton le plus

propre possible.» Ces assurances supplémentaires ne suffisent pas à lever les craintes d'Anselm Jappe, auteur de *Béton: Arme de construction massive du capitalisme* (L'Échappée, 2020). «Décarboner le ciment et le béton ne résoudrait qu'une toute petite partie du problème. Ce pourrait même être pire parce qu'une fois qu'une solution écologique a été trouvée pour un matériau, nous avons encore moins de problèmes à l'utiliser à grande échelle», met en garde le philosophe, pour qui la réduction de notre usage du béton et le recours aux matériaux alternatifs demeurent la priorité. •



Béton: arme de construction massive du capitalisme, Anselm Jappe, L'Échappée, 2020, 194 pages

Dalles de gazon pour parking perméable, Matterup



Atelier LUMA : designer avec les matières locales

texte Christelle Gilabert



Le Magasin électrique, en cours de rénovation selon une approche régénérative, doit accueillir un futur grand laboratoire d'explorations sur les matériaux.

© Adrian Deweerdt, Atelier LUMA

Situé en plein cœur du Parc des Ateliers de la ville d'Arles, Atelier Luma est un laboratoire de recherche en design et architecture qui conçoit des matériaux à partir de ressources naturelles et de savoir-faire de la région. Le sel, les algues ou encore les tournesols qui peuplent les paysages locaux s'invitent grâce à leurs travaux dans nos intérieurs. Lancé en 2016, le projet s'inscrit dans une démarche baptisée Bâtir pour des futurs incertains, pour cultiver la frugalité et la résilience dans le milieu du bâtiment.

Laboratoire unique en son genre, Atelier Luma est un programme développé par le Luma Arles, un complexe d'innovation artistique et culturelle qui s'interroge sur les relations entre l'humain et son environnement. Fondé en 2013, il prend vie sur un ancien site industriel datant du XIX^e siècle qui accueillait autrefois la construction et la réparation de locomotives. Un lieu chargé d'histoire, témoin des évolutions économiques de la ville, dont les bâtiments d'époque ont été préservés.

C'est dans cet environnement historique et créatif que s'activent les membres de l'Atelier Luma, une équipe d'une trentaine de personnes travaillant avec un réseau d'experts composé de designers, scientifiques, ingénieurs, artistes et activistes. Ensemble, ils réinventent les matières qui font la culture, l'histoire et les paysages de la biorégion. De la Camargue aux plaines de La Crau, en passant par le massif des Alpilles, le collectif

a sillonné le territoire pour identifier les ressources potentielles (déchets agricoles, plantes invasives, salins), et œuvre à leur (ré)introduction dans des filières locales grâce au design.

«*Notre travail s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de circuits courts qui met en pratique ce que l'on appelle le design biorégional*», explique Marie Pradayrol, coordinatrice des programmes Atelier Luma. Ces explorations ont donné naissance à de multiples chantiers. Petit tour d'horizon.

1# La tour

Première vitrine de ces expérimentations, l'emblématique tour dessinée par l'architecte Frank Gehry, qui surplombe le parc. Perchée sur une immense rotonde de verre en hommage aux arènes de la ville, la tour se déploie comme une roche métallique dont la forme déstructurée s'inspire des massifs des Alpilles.

Les ascenseurs au mur de sel

Aux pieds des ascenseurs, dans le hall circulaire qui accueille les visiteurs, s'élève un gigantesque mur en carrés de sel qui court jusqu'au neuvième étage de la tour. 4 116 carreaux scintillants, aux reliefs irréguliers, enveloppent l'ossature des colonnes d'ascenseurs. Quatre années de recherches ont été nécessaires pour élaborer cette matière, fruit d'une étroite collaboration avec les Saliniers du Midi. «*On a voulu montrer que le sel n'était pas juste un comestible, mais aussi un matériau*», raconte Henna Burney, responsable du projet Atelier du sel.

Les équipes ont d'abord testé des méthodes de thermocompression ou de fonderie avant de se rendre compte que le processus naturel de cristallisation du sel offrait les propriétés idéales pour le bâtiment sans avoir besoin de le dénaturer ou de le surtransformer. «*On a donc imaginé tout un cycle de production adapté depuis la cristallisation dans les salins jusqu'à l'installation en bâtiment*», détaille la responsable. Grâce au savoir-faire des saliniers et à une étude approfondie de la cristallisation, une méthode de culture spécifique a pu être mise au point. Les carreaux ont ainsi été formés à partir d'une structure métallique surmontée d'encadrement en plexiglas, plongé dans les salins afin que les cristaux puissent s'accrocher et pousser à l'intérieur. Le sel possède des propriétés particulièrement intéressantes pour les espaces publics car c'est une matière naturellement ignifuge et antibactérienne. Il permet également d'absorber l'humidité tout en réduisant la charge calorifique des bâtiments. Aujourd'hui, les équipes poursuivent leurs recherches sur des formes de cristallisation plus complexes, destinées à la fabrication d'objets ou à la microarchitecture.

Le café de laine et de tournesol

Au bout des ascenseurs, le Drum Café, bar-restaurant situé au rez-de-chaussée

de la tour dont la conception a été confiée à l'artiste thaïlandais Rirkrit Tiravanija. À l'intérieur, les murs ont été habillés de revêtements muraux en moelle de tournesol, teintés à l'aide d'un pigment minéral, un ocre vert, et fabriqués à partir de déchets organiques issus de la culture du tournesol dans les plaines de La Crau. Ces déchets comprennent notamment les tiges délaissées après les récoltes ou bien les résidus de graines issus de l'extraction de l'huile. Ces éléments ont été broyés, tamisés puis mélangés avec un liant végétal à base d'amidon, avant d'être compressés à chaud pour former une fine couche de revêtement de 3 à 5 millimètres d'épaisseur. «*Le plus dur est de trouver les moyens de production. Comme le tournesol est un matériau inédit, il n'en existait aucun. Tout a été fait ici en interne avec une presse à bois*», indique Henna Burney.

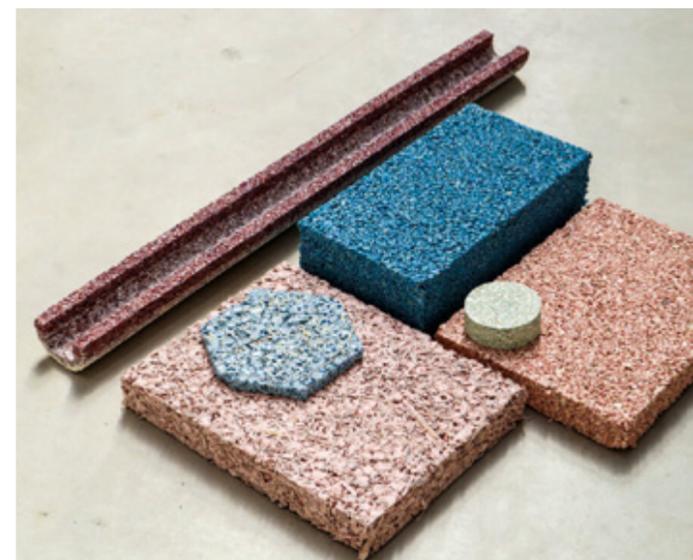
À gauche de l'entrée, une tapisserie monumentale de 10 mètres de long sur 4 mètres de large orne le mur principal. L'œuvre représente un champ de tournesols fanés sur lequel est inscrit «*Le bonheur n'est pas toujours drôle*». «*Rirkrit avait envie d'une grande pièce textile*», explique Axelle Grisot, responsable du Labo textile. Cette œuvre est le premier projet phare mené par l'équipe: la conception de fils en laine de mérinos d'Arles. «*Les troupeaux fournissent la laine la plus fine d'Europe. Nous nous sommes associés avec une coopérative d'éleveurs de Camargue qui mettent en commun leur laine pour la filature*». Pas moins de 100 kilos de laine ont ainsi été fournis. En parallèle, des procédés de mise en couleurs à base de plantes invasives et tinctoriales ont été spécifiquement mis au point pour obtenir une gamme de 72 nuances de couleurs. «*Nous avons travaillé avec des chantiers d'insertion pour récupérer des plantes lors de grands ramassages organisés par le parc de Camargue*», raconte Axelle. Quant à la tapisserie, elle a été tissée dans les ateliers de la célèbre manufacture d'Aubusson et a nécessité douze mois de travail. C'était leur plus grosse commande depuis 100 ans.

2# Le Réfectoire

Dernière étape, le réfectoire. Installé dans l'ancienne cantine ouvrière du site ferroviaire, il a été entièrement rénové par le designer italien Martino Gamper. Du sol au plafond, en passant par le mobilier, presque tous les éléments ont été co-conçus avec Atelier Luma à partir de ressources récupérées dans un rayon de 20 kilomètres autour du site.

Bioplastique, moules et paille de riz

Un enduit projeté à base de terre et de paille de riz tapisse les murs. Le bar a été construit avec des restes de briques récupérés sur un chantier et recouvert d'un lino en marmoleum. Les chaises se composent d'une structure en fer forgé réalisée par un ferronnier de la ville et de baguettes en bioplastique faites de paille de riz et de grignons d'olives. Dans la seconde salle du restaurant, les murs sont parés de revêtements en coquilles de moules. Quant aux banquettes, elles sont tapissées de laine mérinos feutrée et garnies de paille de riz. «*Pour produire ces pièces, on a dû recréer tout un circuit de manufactures en mettant en relation éleveurs, transformateurs, filatures, ateliers de feutrage et tapissiers d'ameublement*», précise Axelle. Toutes ces expérimentations visent à élaborer des méthodologies scientifiques appropriables et déclinables partout ailleurs. «*Notre but n'est pas seulement de produire des matériaux, mais de lancer des projets qui ont un poids social et culturel sur les territoires, en accompagnant les industries vers de nouvelles ressources, en revitalisant des filières locales et en pérennisant des savoir-faire*», souligne Henna Burney. Mais travailler avec le vivant dans le respect des rythmes et des milieux naturels suppose un nouveau paradigme. Comme le résume Axelle: «*Cela demande de réapprendre à vivre avec des ressources, des matériaux, des couleurs qui bougent, qui évoluent en fonction de l'environnement. Il faut accepter les singularités des matières. C'est ce qui fait aussi la beauté des choses.*» •



Matériaux à base de tournesol développés pour différentes typologies d'implémentations dans le projet *Bâtir pour des Futurs Incertains* dans le cadre de *Sunflower Power* (développement de biomatériaux pour l'architecture et le mobilier à partir des coproduits de la culture et de la production d'huile de tournesol).

© Atelier LUMA



Panneau pressé produit à partir de coproduits agroalimentaires et de mycélium, coloré avec des pigments minéraux, dans le cadre du projet de recherche *Myco Structure* autour des matériaux biosourcés à base de mycélium de champignons.

© Atelier LUMA

« Miser sur l'extraction minière dans l'espace est illusoire »

propos recueillis par Youness Bousenna

Revenant sur l'origine et la composition de la Terre, l'astrophysicien Cyril Pitrou met en perspective les équations auxquelles nous sommes confrontés à l'heure de la crise environnementale. Pour ce chercheur en cosmologie à l'Institut d'astrophysique de Paris, l'avenir n'est pas dans d'hypothétiques projets spatiaux d'extraction minière, mais dans une utilisation des ressources plus sobre, ici et maintenant.



« Aller jusqu'à un astéroïde, y extraire des ressources nécessiterait 10 à 100 fois plus d'énergie primaire que la mise en orbite d'un satellite. »

au moins quelques centaines d'euros. Le seul intérêt économique serait d'aller chercher des matériaux rares, comme le dysprosium, mais même ce dernier coûte 200 euros le kilogramme. Ces projets supposent donc une abondance énergétique irréaliste... et contradictoire. Si l'on disposait des possibilités pour les réaliser, par exemple en maîtrisant les techniques de fusion nucléaire, il n'y aurait plus d'intérêt à aller chercher ces ressources ailleurs puisqu'on maîtriserait probablement la synthèse d'éléments par réactions nucléaires.

Quelles pistes vous semblent prometteuses pour améliorer notre utilisation des ressources ?

C.P. La matière est une forme d'énergie, mais immédiatement disponible sous la forme dont on a besoin – un atome de cuivre est par exemple la forme adéquate pour avoir un bon conducteur électrique. Une ressource est donc une énergie utile, puisqu'elle évite de procéder nous-mêmes à une synthèse nécessitant d'utiliser une autre source d'énergie. Considérer la matière sous cet angle nous rappelle qu'il faut absolument conserver les ressources

le plus longtemps possible. La liberté totale d'en disposer, qui implique un gâchis futur, est donc un problème. De la même manière que dans certains domaines, comme l'urbanisme, on ne peut faire ce que l'on veut. L'utilisation des ressources doit être encadrée, c'est-à-dire que tous les choix doivent être débattus. Cela suppose de ne plus sacrifier le droit d'entreprendre qui est nécessairement associé à l'utilisation d'énergie et de matière. Par ailleurs, les solutions les plus efficaces sont aussi les plus simples. Je pense ainsi qu'il est urgent de standardiser les objets, comme le sont les bouteilles de bière en Allemagne avec un système de consigne, afin que la réutilisation prime toujours sur le recyclage. Ce dernier, impliquant une destruction-crétion énergivore et inutile, doit être envisagé comme le deuxième niveau de protection de nos ressources. La conception des objets devrait impérativement permettre la réutilisation totale des pièces ne s'usant pas ou peu. L'adoption de standards obligatoires, dans l'industrie, mais également dans la construction, est la seule façon d'optimiser l'utilisation des ressources. •

Le dernier carbone,
le blog de
Cyril Pitrou
lederniercarbone.org

Comment se caractérise la composition de la Terre ?

C.P. Elle est liée à celle du système solaire, puisqu'il est né de l'effondrement d'un nuage de gaz il y a 4,5 milliards d'années. L'univers, lui, est né il y a quelque 13 milliards d'années. Dans l'intervalle, l'univers s'est enrichi des éléments lourds (c'est-à-dire comportant deux protons ou plus, comme le carbone et l'oxygène) que les générations précédentes d'étoiles ont produits et rejetés dans le milieu interstellaire. La Terre est composée de 32 % de fer, 30 % d'oxygène, 14 % de magnésium, 15 % de silicium. Le reste, comme le soufre, le nickel et l'aluminium, n'est présent qu'en petite quantité. Ces éléments sont donnés une fois pour toutes: les réactions chimiques changent la manière dont les éléments s'associent, sans changer leur nature.

D'où vient l'existence de la matière ?

C.P. Plus que l'existence de la matière, la question primordiale est celle des éléments qui la constituent. Le modèle actuellement bien établi du Big Bang considère que l'univers était à l'origine très chaud et très dense, formant une soupe originelle où presque toutes les particules se sont rapidement annihilées avec leurs antiparticules. On ne connaît pas l'origine de la rupture de symétrie faisant que la matière l'a légèrement emporté sur l'antimatière. On sait, en revanche, qu'il n'a subsisté que des électrons et des protons, et quelques neutrons piégés dans de l'hélium primordial. Puis, les réactions nucléaires au cœur des étoiles ont généré des éléments – c'est-à-dire des noyaux atomiques – plus complexes qui ont formé la matière telle que nous la connaissons. La matière se définit également comme une forme d'énergie, car tout ce qui a une masse a aussi une énergie. Soit la synthèse d'éléments nouveaux produit de l'énergie, soit elle en consomme. Ce lien intrinsèque entre masse et énergie pose une contrainte d'actualité pour nous: tout problème de ressources est donc aussi un problème énergétique.

Quelle équation cette structure de la matière engendre-t-elle pour nous, sur Terre, à l'heure des défis environnementaux ?

C.P. Nous sommes parvenus à un stade de la connaissance où l'on est certains de ne pas pouvoir échapper à deux contraintes fondamentales. La première, issue du modèle standard des particules, est la nature des forces permettant à la matière d'interagir: on sait qu'il n'y aura pas de sources magiques d'énergie, et que nous devons composer avec les forces électromagnétiques et nucléaires. La seconde est liée à la structure de l'espace-temps, dont la vitesse limite est celle de la propagation de la lumière (300 000 km/seconde). Celle-ci pose une impossibilité fondamentale: plus on s'approche de cette vitesse, plus il faut d'énergie pour accélérer. Cela signifie qu'en pratique nous sommes condamnés à demeurer isolés dans le système solaire, où l'essentiel des éléments lourds accessibles se trouve sur les planètes rocheuses. Or, la masse de Vénus, Mercure, Mars et des astéroïdes réunis est à peine supérieure à celle de la Terre: nous ne pourrions au mieux que doubler notre stock actuel en utilisant ces astres, et ce à un coût qui rend l'hypothèse inenvisageable. Il est donc illusoire de miser sur cette extraction.

Vous ne croyez donc pas à la crédibilité des initiatives projetant une exploitation minière dans l'espace, comme celle de la société américaine Planetary Resources ?

C.P. Ces projets me semblent délirants en raison de leur coût énergétique, qui reste la grande inconnue. On peut néanmoins appréhender l'ordre de grandeur en considérant la consommation énergétique de la fusée Ariane qui utilise 500 mégajoules de carburant pour un kilogramme de charge utile. Aller jusqu'à un astéroïde, y extraire des ressources et les rapporter sur Terre nécessiterait dix à cent fois plus d'énergie primaire que la mise en orbite d'un satellite, ce qui placerait le kilogramme de ressources à

Imagi- naires

page 72

Portfolio.
Edward Burtynsky,
le photographe
lanceur d'alerte

page 78

Le pavé dans
l'Histoire,
de la via Appia
à aujourd'hui

page 80

Le «match
ressources»
des transports

page 86

Julian Carrey.
Quel monde sans
pétrole
et sans charbon?

page 90

Concours

page 98

BD.
La nouvelle gare
Saint-Michel
Notre-Dame

**Edward Burtynsky,
le photographe lanceur d'alerte**

Portfolio

photos © Edward Burtynsky, courtesy Nicholas Metivier Gallery, Toronto/Flowers Gallery, London

Des fleuves rouge sang, des estuaires asséchés, des déserts gorgés d'huiles, ou sillonnés par l'activité minière, des humains perchés au sommet de montagnes de déchets multicolores... Depuis plus de quarante ans, le photographe canadien Edward Burtynsky documente les effets de l'industrie, de l'agriculture intensive et de l'extractivisme minier sur les paysages naturels. Ses œuvres grand format essaient un message-plaidoyer sur les murs des plus grands musées et galeries d'art. «*Nous venons de la nature. Il est d'autant plus important de la préserver que nous sommes intimement connectés à elle. En détruisant la nature, c'est nous que nous détruisons*», martèle l'artiste sur son site. Né en 1955, Burtynsky grandit en Ontario au Canada. À l'âge de 11 ans, il installe une chambre noire dans le garage familial et s'adonne à la photographie. Lorsqu'il entre en école d'art, il travaille dans les mines pour financer son matériel. Une expérience qui le marque. Il a alors 19 ans. Ce n'est que bien plus tard (en 1981) que les mines apparaissent à l'artiste comme sujet et matière artistiques.



Lithium Mines #1, Salt Flats,
Atacama Desert, Chile, 2017



Anthropocene,
Edward Burtynsky,
Jennifer Baichwal,
Nik de Pencier, Steidl
Verlag, 2018, 224 pages



Nickel Tailings #30,
Sudbury, Ontario 1996



Nickel Tailings #34,
Sudbury, Ontario 1996



**Manufactured
Landscapes –
The Photographs
of Edward Burtynsky,**
Lori Pauli, Yale University
Press, 2003, 160 pages



Densified Oil Drums #4,
Hamilton, Ontario 1997



Mines #22, Kennecott Copper Mine,
Bingham Valley, Utah 1983



Edward Burtynsky:
Essential Elements,
Edward Burtynsky,
William A. Ewing,
Thames & Hudson,
2016, 202 pages

Le pavé dans l'Histoire, de la *via Appia* à aujourd'hui

textes Lila Meghraoua illustrations Miriam Persand



- 312 av. J.C. La *via Appia* part de Rome, longe la côte tyrrhénienne et finit sa course dans les Pouilles.

Elle est pavée de larges dalles de basalte. Ces dernières ne sont pas utilisées sur tous les grands axes de la République. Les voies sont alors couvertes de terre et de sable, éventuellement de graviers.

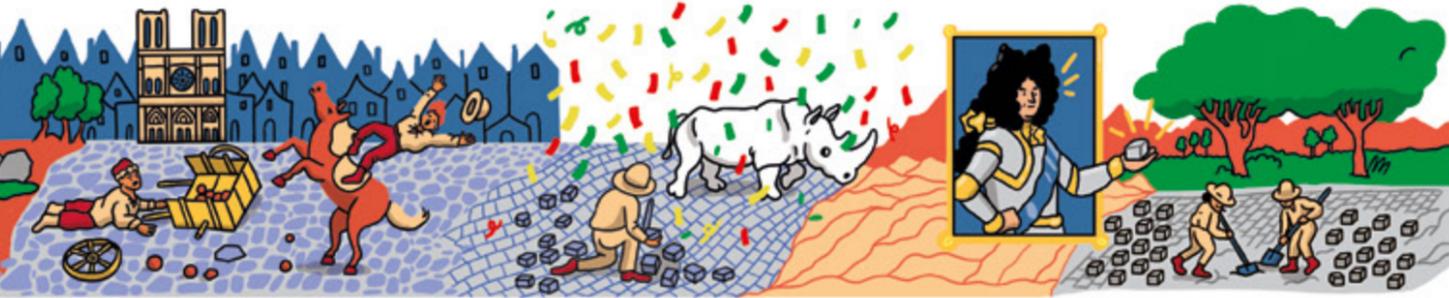
- 118 av. J.-C. Construction de la *via Domitia* qui relie la péninsule ibérique à la Gaule narbonnaise.

La voie est d'abord empruntée par les légions romaines, puis les marchands. Elle participe largement au développement économique du bassin méditerranéen. C'est une belle des villes et un rat des champs: dans les villes, elle est pavée. En campagne, elle fait place à un chemin en terre battue sur des couches stratifiées de gravier.

1184. Au Moyen Âge, les rues de Paris sont recouvertes de terre battue.

Eaux usées et déchets sont évacués grâce à des voies en forme de V. Les citadins ont pour habitude de marcher sur la partie haute de la rue. Il est d'usage que le plus pauvre cède le passage au plus nanti, d'où l'expression «tenir le haut du pavé». En 1184, le roi de France Philippe-Auguste ordonne l'assainissement des chaussées et fait poser des pavés sur les grands axes de la ville.

Symbole de Mai 68, ce petit cube d'une dizaine de centimètres de côté a connu bien des péripéties à travers l'histoire... jusqu'à devenir un projectile dans les manifestations.



xiv^e siècle. De plus petits pavés parent les rues parisiennes.

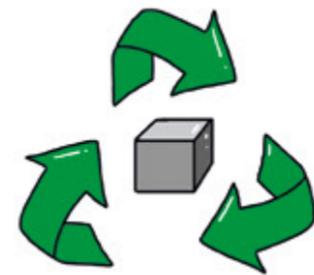
Paris devient la première cité à se doter de ce pavage. Au grand dam des (oreilles) des citadins: ces pavés nécessitent régulièrement des travaux d'entretien et de réfection. Les accidents de transport sont alors nombreux.

1498. Pour la parade d'anniversaire du roi du Portugal, auquel un rhinocéros prend part, quelques rues de Lisbonne sont pavées d'un granit provenant du nord du pays, la fameuse *calçada portuguesa*.

Il ne faudrait surtout pas souiller de boue les pattes de l'animal. En 1755, un grand tremblement de terre ravage la ville. Ce n'est qu'en 1842 que les pavés font leur réapparition.

xviii^e siècle. Le règne de Louis XIV introduit l'administration des Ponts et Chaussées qui contribue grandement à l'amélioration des routes.

Le siècle suivant, l'inspecteur général Pierre Marie Jérôme Trésaguet propose une méthode de revêtement dite en hérisson, composée de couches d'empierrement, de gravier et de sable. Cette technique inspire en 1820 l'Écossais John Loudon McAdam, qui invente... le macadam.



2023. Le pavé circulaire. Les 1 625 kilomètres de chaussées parisiennes recèlent, sous une couche de bitume, trois millions de tonnes de pavés de granit. Désormais, lors des travaux de réfection de voirie, l'usage est de récupérer les pierres naturelles. Chaque année, quelque 10 000 tonnes sont récupérées.



2019. Retour du pavé contestataire avec les «gilets jaunes». Les agents de la propreté de Paris racontent enlever en sus des déchets et barricades, quelques centaines de pavés, arrachés par les manifestants pour servir de projectile contre les forces de l'ordre. Ces pavés sont stockés; la remise en état de la chaussée est longue. En attendant, les trous sont bouchés de manière temporaire avec de l'enrobé, un mélange de sable, de graviers et de bitume.

«Sous les pavés, la plage».

En 1968, ce pavé, qui peut peser jusqu'à 4 kilos, entre dans l'Histoire. Les pavés rejoignent panneaux de signalisation et voitures renversées pour consolider les barricades érigées par les étudiants et servent aussi de projectiles de protestation.



1938. Le pavé de bois est définitivement remis par les Parisiens – il est récupéré par les habitants pour se chauffer. C'est à ce moment-là que le petit pavé piqué fait son entrée. Ses contours sont réguliers. Pour le poser, on lui prépare un sol nivelé et un petit lit de sable.

«Stinky 1881». Les Champs-Élysées accueillent le dernier pavé à la mode anglaise, le *Nicolson pavement*, un pavé en bois debout, qui après avoir envahi les rues de Boston, pare désormais la chaussée londonienne. Hélas, ces pavés sont chers, demandent beaucoup d'entretien et sont de véritables nids à bactéries.

1862. «Je suis tombé par terre, c'est la faute à Voltaire. Le nez dans le ruisseau, c'est la faute à... Il n'acheva point. Une seconde balle du même tireur l'arrêta court. Cette fois il s'abattit la face contre le pavé, et ne remua plus.» C'est en ces termes que périt le personnage de Gavroche dans *Les Misérables* de Victor Hugo. Le livre fait écho à l'insurrection républicaine qui éclate à Paris en 1832. Les insurgés ont pour arme principale: le pavé.

Le « match ressources » des transports

par Laurent Castaignède, ingénieur, conseiller en impact environnemental, auteur de *La bougeotte, nouveau mal du siècle?* (Ecosociété, 2021) et *Airvivre ou le mythe des transports propres* (Ecosociété, 2022) et Philippe Bihouix, ingénieur, directeur général d'AREP.

Il y a quelques mois, les déclarations d'Augustin de Romanet, le patron d'Aéroports de Paris, invitant «*les gens à être plus raisonnables*» et à faire preuve de modération dans leur usage du transport aérien, ont été remarquées, voire saluées. Dans le même temps, il ajoutait que «*sur le long terme, c'est le transport aérien qui sera le système le moins émetteur de CO₂*», car «*l'infrastructure de l'avion, c'est l'air*» et si «*vous analysez la quantité de CO₂ émise pour faire des voies de chemin de fer, du ballast, vous savez que sur le long terme, le transport aérien est extrêmement vertueux*»¹. Cela nous a donné l'envie de creuser un peu cette idée. Une fois «*réglé*» le problème de l'énergie – une gageure cependant, mais cette question nous emmènerait trop loin! –, jusqu'à quel point l'avion serait effectivement plus vertueux que le train, ou la voiture et le vélo tant qu'on y est? Quand on évoque l'impact environnemental des transports, c'est d'abord la consommation de carburants, et non de ressources, qui vient à l'esprit. Dans la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre, aux niveaux national ou international, on retrouve, au titre des «*transports*», les émissions directes (de fonctionnement), mais jamais celles de la fabrication des véhicules ou de la construction de l'infra-

structure qui les héberge et les supporte, qui sont noyées dans le chapitre «*industrie*».

Il y a une exception notable, celle des véhicules électriques, pour lesquels une analyse complète de cycle de vie est nécessaire. En effet, tandis que 20 % du CO₂ émis par une voiture thermique durant sa durée de vie l'est lors de sa fabrication et 80 % par les pleins de carburant à l'usage, la voiture électrique est moitié plus émettrice à la fabrication, essentiellement à cause des batteries, tandis que pour les recharges, le contenu en CO₂ est très dépendant de la nature de l'électricité retenue. L'exercice est alors délicat, entre les calculs qui présupposent que les recharges seront proportionnelles au mix électrique moyen du pays où elles roulent, hypothèse particulièrement favorable en France métropolitaine, et celles qui, au contraire, y voient la stimulation fréquente du maintien de centrales au charbon particulièrement polluantes.

Mais revenons à nos ressources. L'exercice que nous avons souhaité mener vise à donner un *ordre de grandeur* de la «*matérialité*» des systèmes de transports. Non pas avec les chiffres de consommation globale du secteur, sa contribution à l'extractivisme planétaire permettant d'augmenter, chaque année, le parc automobile de 30 millions de véhicules²,

la flotte de trains de 5 000 locomotives et 12 000 automotrices³, celle d'avions de ligne de 800 unités⁴... et de construire, d'ici 2050, quelque chose comme 25 millions de kilomètres de routes⁵ et 500 000 kilomètres de voies ferrées⁶; mais plutôt de comparer ce que «*coûte*» en ressources, par kilomètre parcouru, le fait d'emprunter tel ou tel mode de transport.

Un ordre de grandeur seulement, tant les paramètres sont complexes à appréhender. Pour les véhicules, il est assez simple de récupérer les compositions moyennes des différents types, un nombre de kilomètres parcourus moyen pendant leur durée de vie, un taux de remplissage moyen (voilà déjà trois façons de faire varier votre consommation «*réelle*» de ressources quand vous parcourez un kilomètre). Pour l'infrastructure, c'est un peu plus complexe, car il faut prendre en compte la durée d'amortissement mais aussi «*allouer*» une proportion de l'infrastructure quand celle-ci est mutualisée entre différents modes, comme c'est le cas de la route⁷.

Fabrication des véhicules

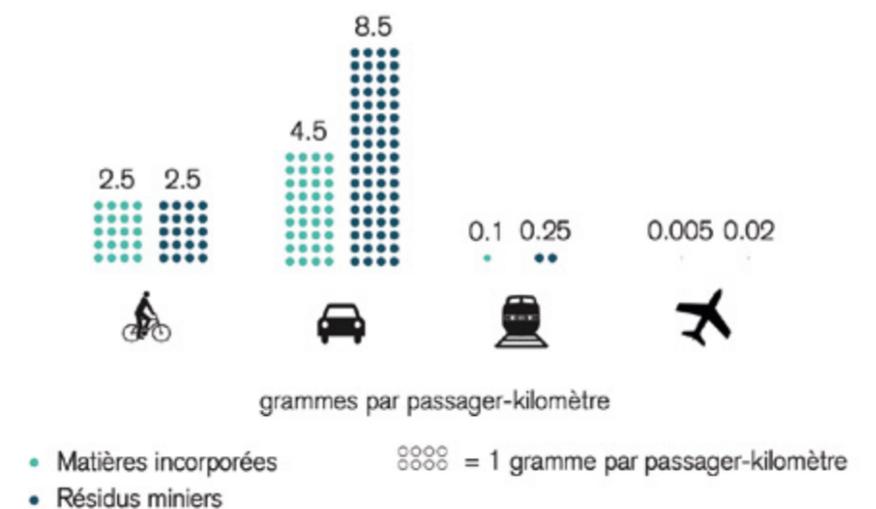
Prenons l'exemple du TGV. Une rame duplex pèse 390 tonnes et comporte environ 550 places, soit près de 400 passagers embarqués avec un taux de remplissage de 70 % – on peut noter au passage qu'il faut donc mobiliser une tonne de matière par passager, le même ordre de grandeur qu'une voiture!

Pendant sa durée de vie, cette rame parcourra 10 millions de kilomètres, en réalisant donc 4 milliards de «*km-passagers*»⁸, (pour environ 400 millions de grammes mobilisés⁹), soit 0,1 g/pas.km. Lors d'un aller-retour Paris-Bordeaux, chaque passager consomme ainsi 120 grammes de matières premières!

L'avion moyen transporte deux fois moins de passagers, mais parcourt dans sa vie cinq fois plus de kilomètres et est dix fois moins lourd. Il est donc vingt fois plus «*efficace*». Les transports intensifs, aux véhicules très utilisés, bien remplis, sont donc peu mobilisateurs de matière. La voiture fait pâle figure, avec une «*efficacité*» 50 à 1 000 fois plus faible... Le vélo est très léger (disons 15 kilos), mais bien sûr il parcourt, dans sa vie, bien moins de kilomètres, ce qui le pénalise.

Aux matières incorporées dans les véhicules, on peut ajouter les matières «*extraites*», car les minerais de métaux ont des concentrations variables, environ 50 % pour l'acier et 20 % pour l'aluminium, mais moins de 2 % pour le cuivre... il faut donc extraire au moins 50 tonnes des mines pour en récupérer une. Enfin, rappelons qu'il ne s'agit ici que de la vision «*ressources*»; s'il fallait parler énergie «*grise*» (incorporée) ou émissions de CO₂, l'image se déformerait: l'aluminium du TGV duplex (environ 20 % de sa masse) ou de l'aéronef (environ 50 %), et encore plus le titane (environ 10 % de la masse d'un avion) sont bien plus énergivores que l'acier!

Matière mobilisée dans les véhicules



Construction des infrastructures

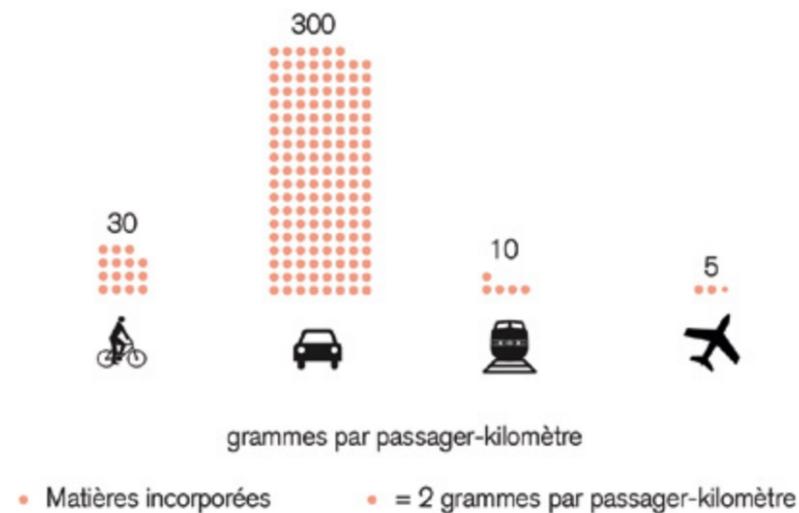
En termes d'infrastructures, les différences sont aussi particulièrement frappantes. Certains moyens de transport, comme la marche ou le vélo, aux pistes cyclables près, peuvent n'en nécessiter presque aucune, quand d'autres mobilisent leur propre réseau linéaire (voiries dédiées, réseaux ferrés) ou leurs propres points d'appui ponctuels (pistes d'atterrissage). À cela s'ajoutent de multiples ouvrages d'art (ponts, viaducs, tunnels) et les infrastructures d'accueil (parkings, gares, aéroports) et de maintenance et remisage (ateliers, hangars).

De façon surprenante, l'aérien n'est ici que deux fois plus efficace que le TGV... et même si les infrastructures ferroviaires sont imposantes, c'est encore la route, particulièrement répandue et subdivisée, qui est des dizaines de fois plus consommatrice de ressources

(granulats d'abord, ciment et acier ensuite) pour les chaussées et les ouvrages. Il faudrait, pour faire bonne mesure, ajouter tous les parkings incorporés dans les bâtiments! Le vélo, lorsqu'il a ses voies dédiées (cyclables et vertes), n'est pas négligeable, mais bien sûr, dans de nombreux cas, il partage des infrastructures existantes (rues, routes) ou très légères (chemins de terre).

Dans tous les cas, la masse de l'infrastructure l'emporte largement sur celle des véhicules. On peut se faire une autre idée de cet écart important en «positionnant» les véhicules les uns derrière les autres sur leur propre infrastructure. À l'échelle française¹⁰, l'ensemble des vélos occuperait environ la moitié de la longueur totale des pistes cyclables, les voitures 15 % des routes, les TGV seulement 3,5 % des lignes à grande vitesse, mais les pistes ne seraient pas tout à fait assez longues pour y stationner les avions...

Matière mobilisée dans les infrastructures



Une comparaison « injuste » ?

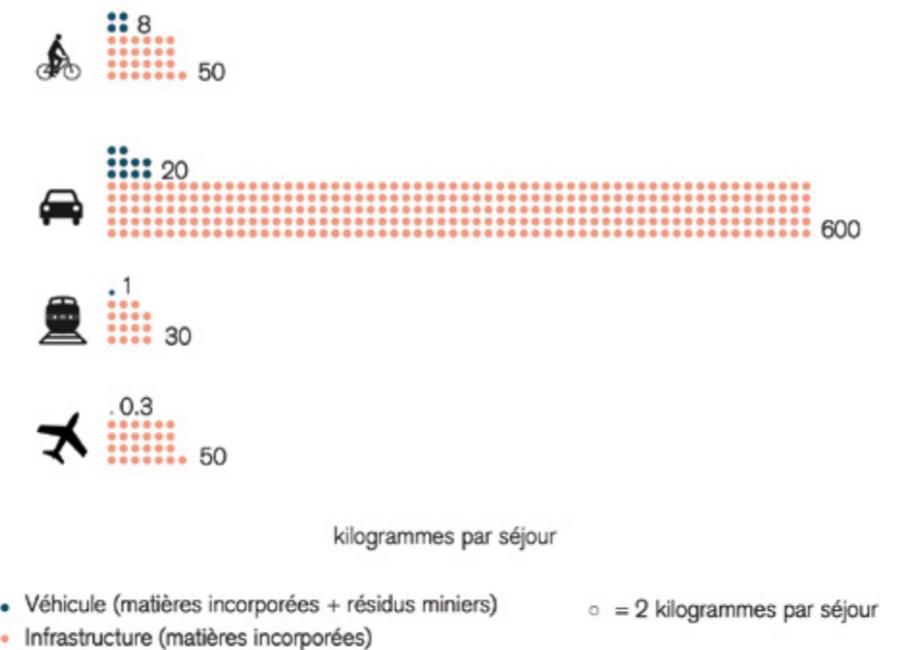
Alors vive le transport aérien? Évidemment, la comparaison par km.passager est très biaisée. Le secteur aérien se targue, vis-à-vis de la voiture au moins, de bons résultats unitaires de consommation de carburant ou d'émission de CO₂; mais cela passe sous

silence qu'en avion, on parcourt en général une bien plus longue distance! À ce compte-là, par kilomètre, un séjour dans la station spatiale internationale est très économe en énergie: la consommation d'énergie phénoménale pour s'extraire de la gravité terrestre est amortie sur des millions de kilomètres parcourus en orbite.

Pour être véritablement équitable, il faut donc se ramener à des cas d'usages courants. Prenons d'abord le trajet d'une famille de trois personnes prenant des vacances. Pour un budget du même ordre de grandeur, ils pourront se rendre, à partir de la région parisienne, en voiture ou en TGV sur le bassin d'Arcachon (600 kilomètres), ou au Maroc en avion (retenons Agadir, 2 300 kilomètres)¹¹. En cyclotourisme, nous avons supposé qu'ils

réalisent une boucle de 500 kilomètres. Le recours à la voiture demeure, compte tenu du très fort impact de la construction et de l'entretien des routes, le moyen le plus consommateur de matière; mais l'avion, qui permet de couvrir facilement de longues distances, rejoint assez vite le TGV! Prévoyez quand même quelques dizaines à quelques centaines de kilogrammes selon les cas...

Matière mobilisée pour un séjour type de vacances

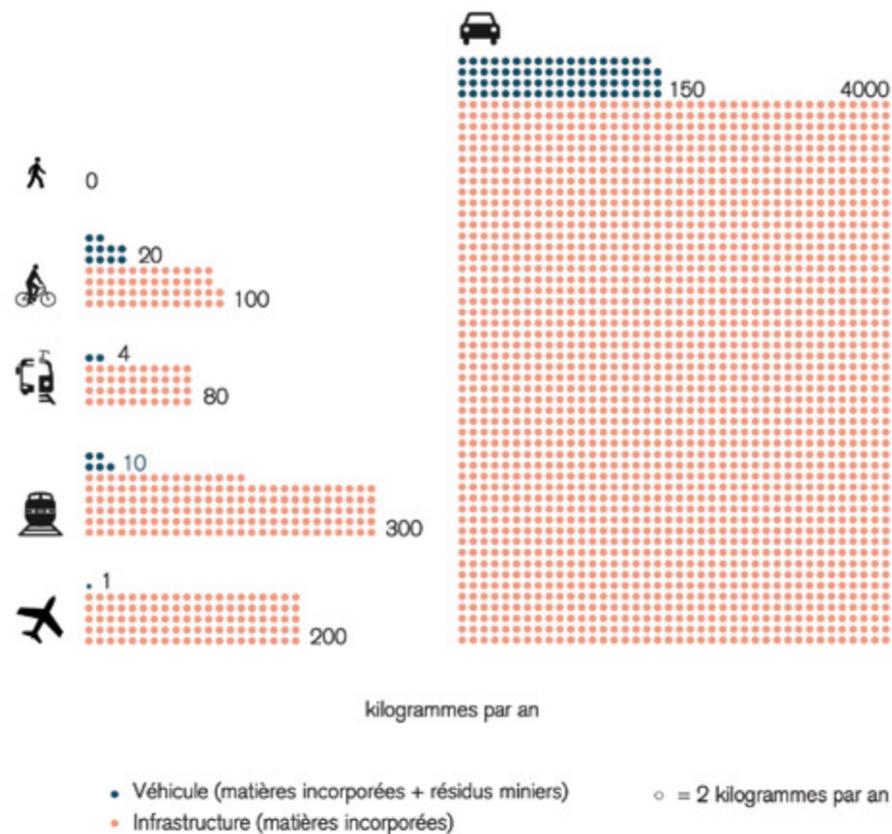


Prenons maintenant le cas du trajet domicile-travail, en rappelant qu'historiquement, la mise à disposition massive de nouveaux moyens de transports plus rapides et meilleur marché (au kilomètre) a plutôt conduit à augmenter les distances parcourues que réduire les temps de trajet¹². Un salarié consacrant un peu plus d'une heure par jour aller-retour porte à porte pourra parcourir deux fois par jour environ 3 kilomètres à pied, 10 kilomètres à vélo ou en autobus, 12 kilomètres en tramway, 15 kilomètres en métro, 25 kilomètres en voiture et 30 kilomètres dans un train de banlieue. S'ajoutent les possibilités récentes offertes par le télétravail

pérenne, avec des distances plus longues et moins de trajets: s'installer au Mans et travailler un jour sur deux à Paris, s'installer à Nice et faire un aller-retour par semaine à Paris en avion... soit, ramené en distance moyenne quotidienne, respectivement 100 et 140 kilomètres.

De nouveau, le recours à l'automobile mobilise énormément de matière – plusieurs tonnes par an. Les autres moyens, à l'exception de la marche dont l'usage se limite au renouvellement de semelles de chaussures, sont, étonnamment, du même ordre de grandeur, avec une bonne centaine de kilos par an.

Matière mobilisée pour un an de trajets domicile-travail



Complément d'éclairage énergétique

Ces résultats pourraient vous laisser dubitatif: le cycliste régulier en sort inquiet, le lobbyiste aérien enthousiaste. C'est qu'il n'y a pas que les ressources de fabrication dans la vie, mais aussi... la consommation énergétique! Si on réintègre les émissions de CO₂ (et, pour l'aviation, l'effet des traînées de condensation¹³), l'avion, qui jusqu'ici s'en sortait plutôt bien grâce à des infrastructures ponctuelles et des aéronefs intensément utilisés, passe largement en tête des impacts.

Les vacances à Agadir représentent alors 12 tonnes équivalent CO₂ pour la famille, et l'année de domicile-travail Nice-Paris de papa ou maman 2,5 tonnes. Comparativement, la voiture a un impact dix fois moindre (respectivement 200 kilos et 1,5 tonne) et les autres

moyens motorisés sont encore meilleurs (respectivement quelques dizaines et quelques centaines de kilos). Quant à la bicyclette, elle retrouve légitimement sa place de (petite) reine.

Bilan

L'avion est, de bien loin, le moyen le plus émissif en gaz à effet de serre, même si les ressources pour le fabriquer, construire et entretenir les aéroports, sont proportionnellement faibles. L'automobile, quoique pire choix pour les matières mobilisées, demeure bien moins carbonée que l'avion. Le transport ferroviaire s'en sort correctement, même s'il n'atteint pas la performance des autres transports en commun ou du vélo.

Augustin de Romanet pourrait légitimement nous reprocher d'avoir sauté directement au critère «équivalent CO₂» alors que son idée

est justement qu'on pourra, à terme, décarboner l'énergie qui sera utilisée dans les avions (ou les voitures): électricité, hydrogène, carburants «durables¹⁴»... Mais, comme on commence à s'en rendre compte, l'accès à une énergie décarbonée à profusion réclamerait aussi une mobilisation sans précédent, encore bien théorique, de ressources dans les énergies renouvelables, les systèmes de transformation, d'acheminement et de stockage.. Si, pour cette raison ou d'autres, il faut, dans le futur, économiser l'énergie eu égard à la fin de l'abondance, les transports guidés par rail, énergétiquement imbattables s'ils sont bien remplis, tireront leur épingle du jeu. Réduire ou limiter la vitesse des moyens de transport sera aussi un levier très efficace, et l'on peut même imaginer, de façon un peu disruptive, que, parallèlement à la limitation sur (auto) route et à la baisse de la vitesse commerciale des TGV, les avions seront de moins en moins pertinents, et/ou repasseront à des vitesses de vol inférieures et une propulsion à hélice¹⁵. Enfin, le levier le plus efficace pour dématérialiser ou décarboner les transports, serait de réduire les besoins, de mettre en œuvre une organisation spatiale et économique qui permette une certaine *démobilité*, en particulier pour les besoins de transport du quotidien, contraints par les trajets domicile-travail mais aussi les courses, les activités sociales et culturelles, les loisirs... en bref par une réduction de la furieuse tendance de nos sociétés à une bougeotte chronique. •

1. «Augustin de Romanet, le PDG d'ADP, prône un usage modéré de l'avion», La Tribune, 22 septembre 2022.
2. Production annuelle neuve de 50 millions d'unités.
3. Union internationale des chemins de fer, Railis UIC statistics, comparaison des éditions 2017 et 2022.
4. Airbus, «Global Market Forecast 2019-2038», 2019, p. 8.
5. International Energy Agency (IEA), «Global land transport infrastructure requirements», 2013, p. 16.
6. IEA, «The future of rail», janvier 2019, p. 72-74.
7. Les hypothèses et les sources que nous avons retenues sont disponibles sur le site www.bco2.fr.

8. Un «km-passager» (abréviation usuelle «pas.km») représente la distance d'un kilomètre parcouru par le passager d'un moyen de transport (hors personnel assurant le service). Un véhicule transportant 10 passagers (et son chauffeur) sur 10 kilomètres parcourt donc 100 pas.km.
9. Il faudrait ajouter le poids de toutes les pièces qui seront renouvelées lors des opérations de maintenance... ce qui ne modifiera pas l'ordre de grandeur.
10. Chacun dans un seul sens de circulation; l'aéroport de Roissy accueillant des avions au prorata mondial de son trafic passager.
11. Toute autre destination est envisageable évidemment, proportionnellement à la distance. Les trajets routiers pour se rendre aux gares et aux aéroports ont été négligés en première approximation, car d'un impact nettement inférieur en ordre de grandeur à celui du recours à la voiture (quoiqu'il soit de nature à augmenter proportionnellement ceux des dits moyens qui en mobilisent peu).
12. Voir Yves Crozet et Iragaël Joly, La «Loi de Zahavi»: quelle pertinence pour comprendre la construction et la dilatation des espaces-temps de la ville?, *Plan urbanisme construction architecture* (Puca), 2006.
13. Les fins nuages qui apparaissent derrière les aéronefs évoluant à haute altitude ont un effet radiatif sur le réchauffement planétaire au moins aussi important que celui du CO₂ de combustion du kérosène.
14. Ou SAF, pour sustainable aviation fuels; version actualisée des bio (ou agro) carburants.
15. Il s'agit en fait de turbopropulseurs, plus modernes et efficaces que les hélices conventionnelles. Cela pourra s'accompagner d'une baisse de leur altitude de croisière pour qu'elle passe sous celle de la formation des traînées de condensation.



Airvore ou la face obscure des transports: Chronique d'une pollution annoncée, Laurent Castaignède, Éditions Ecosociété, 2018, 341 pages

Julian Carrey

Quel monde sans pétrole et sans charbon ?

propos recueillis par Victoire Radenne

À quoi ressemblerait un monde sevré du pétrole et du charbon ? Julian Carrey, physicien spécialisé en nanotechnologies à l'Institut national des sciences appliquées (Insa) de Toulouse, s'est penché sur la question dans sa série d'ouvrages *Sans pétrole et sans charbon*. Membre de l'Atelier d'écologie politique (Atécopol) depuis 2018, il fait partie de ces chercheurs qui ont décidé de changer de voie pour se consacrer à la bifurcation écologique. La question d'un monde émancipé des énergies fossiles traverse la société entière sans néanmoins offrir d'images concrètes sur les manières de faire et d'y parvenir. Jugée utopique, inconcevable ou inacceptable, l'idée d'un monde décarboné peine encore à s'imaginer. Cette transition suscite de nombreuses interrogations. Par quoi et comment remplacer les énergies fossiles ? Comment les secteurs de l'agriculture et de la construction vont-ils s'adapter ? Julian Carrey nous projette dans un monde affranchi des énergies fossiles.

Dans votre premier ouvrage, vous explorez les millénaires durant lesquels les humains ont vécu sans utiliser d'énergies fossiles, à l'image des moulins à vent ou des animaux de traits. Que peut-on imaginer pour l'avenir ?

J.C. Imaginer l'intégration de nos technologies modernes dans des sociétés préindustrielles sans avoir à user d'énergies fossiles est un exercice de pensée passionnant. Par exemple, nous pouvons nous demander quels seraient les éléments nécessaires pour réintégrer l'électricité à l'époque romaine sans utiliser ni pétrole ni charbon. Il faudrait ainsi produire les fils de cuivre, des aimants, et fabriquer des isolants électriques à l'aide de résine végétale. Dans cet objectif, on pourrait également interroger l'accumulation de connaissances acquises depuis la révolution industrielle. Une telle perspective est-elle du reste seulement possible sans l'énergie abondante fournie par les énergies fossiles ? L'aviation est un exemple tout aussi parlant. Rien

que pour décarboner l'hydrogène nécessaire à faire voler des avions à hydrogène correspondant au trafic pré-Covid de l'aéroport Charles de Gaulle, il faudrait couvrir entièrement d'éoliennes un département français ou faire tourner 16 réacteurs nucléaires.

L'agriculture a une place importante dans votre premier tome. Quelles adaptations déployer pour favoriser la transition vers une société sans pétrole et sans charbon ?

J.C. On a remplacé la force de travail humaine et animale par des machines et des engrais chimiques, tous deux dépendants des énergies fossiles. À l'avenir, un système agricole et alimentaire pérenne ne serait compatible qu'avec le retour d'une importante main-d'œuvre : avant la révolution industrielle deux personnes sur trois travaillaient dans le secteur agricole. L'idée est de savoir si on pourrait faire mieux avec les connaissances que l'on a accumulées : qu'est-ce que des décennies de recherches à l'Institut national de la recherche

agronomique (Inra) pourraient nous apprendre sur la manière de nous nourrir dans un monde sans énergies fossiles ?

Dans vos ouvrages, les low-tech, alternatives à l'obsession du high-tech, sont au cœur de nombreuses réflexions sur la durabilité de nos sociétés.

Comment peut-on les définir ? En quoi seraient-elles indispensables demain ?

J.C. Avec mes collègues, nous considérons qu'une technologie est *low-tech* si elle constitue une brique élémentaire d'une société pérenne, équitable et conviviale. Dans nos sociétés actuelles, on fait déjà du *low-tech* sans le savoir, à chaque fois qu'on utilise des objets dont on maîtrise le fonctionnement et dont on n'est pas esclave, comme la couture, le jardinage sans engin mécanique, la lactofermentation, etc. Il est également bon de rappeler que, dans notre société high-tech, refuser l'utilisation de certains objets technologiques globalement nuisibles fait partie de la philosophie *low-tech*.

L'île danoise de Samsoe, devenue en 2007 la première île autosuffisante en énergies renouvelables



«*Dans nos sociétés actuelles, on fait déjà du low-tech sans le savoir, à chaque fois qu'on utilise des objets dont on maîtrise le fonctionnement et dont on n'est pas esclave.*»

Outre la philosophie *low-tech*, vous évoquez l'importance du concept de convivialité, fondamental dans une société décarbonée...

J.C. Les modes de vie et la philosophie *low-tech* sont de toute façon plus désirables, avant tout parce qu'ils sont plus conviviaux. C'est troublant, mais nous avons construit nos imaginaires sur des plaisirs énergivores qui ont une forte empreinte carbone et un coût financier important, comme jouer seul à un jeu en ligne par exemple. Tandis que jouer à un jeu de société en groupe est bien plus convivial et moins polluant. De la même manière, des vacances en vélo sont plus désirables qu'un séjour dans un Club Med. Dans une société décarbonée, nous avons tout intérêt à déconstruire les imaginaires basés sur ces activités qui nous isolent et nous coûtent cher en énergie.

Votre ouvrage dessine des scénarios plus concrets. Vous vous êtes ainsi spécialisé dans la métallurgie solaire. Quel serait son rôle dans une société affranchie du charbon ?

J.C. Depuis la révolution industrielle, c'est le charbon qui est utilisé dans le processus de métallurgie, où il joue à la fois le rôle de source de chaleur et de «réducteur». C'est-à-dire qu'il permet de convertir l'oxyde de fer du minerai en fer. À la place, on pourrait imaginer utiliser la métallurgie solaire, qui vise à utiliser l'énergie solaire concentrée comme source de chaleur et d'autres composés que le charbon en tant que réducteurs, comme l'hydrogène ou bien l'urine, qui contient de l'urée ou de l'ammoniac. Évidemment, un tel procédé ne serait pas transposable dans notre société actuelle: la quantité produite serait bien plus faible qu'aujourd'hui.

Chaque seconde, 150 tonnes de ciment sont coulées dans le monde. Qu'imaginez-vous pour le secteur du BTP – qui représentait en 2021 environ 37 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, liées à l'énergie et l'utilisation de matériaux de construction ?

J.C. La construction est un domaine dans lequel on pourrait complètement rebattre les cartes par rapport au standard tout-ciment encore à l'œuvre aujourd'hui. L'avantage avec ce secteur, c'est que le passé nous a prouvé qu'il était possible de ne pas dépendre des énergies fossiles. Nous avons eu de magnifiques exemples de constructions *low-tech* dans l'histoire. Le bois, la pierre, la paille, la terre crue sont des matériaux présents abondamment sur la planète qui ont permis des constructions bioclimatiques adaptées à leur écosystème et aux besoins recherchés par les humains: se protéger du soleil, s'isoler du froid.

Lors du confinement en mars 2020, le monde a observé, hagard, une nature qui reprenait ses droits, suite à la baisse de la pollution atmosphérique, sonore et lumineuse. Dans une société sans pétrole et sans charbon, la nature jouirait-elle d'une nouvelle position ?

J.C. Il est clair que les énergies fossiles ont donné à l'humanité une puissance considérable. Elles nous ont armés face à la nature, au vu de la guerre menée actuellement contre le vivant. Une société sans pétrole et sans charbon rééquilibrerait sans doute les forces. Et qui sait, on retrouverait peut-être un peu d'humilité?

L'île danoise de Samsø est devenue en 2007

la première île autosuffisante en énergies renouvelables. Depuis, elle parvient peu à peu à se libérer de l'utilisation de pétrole. Existe-t-il d'autres exemples à plus grande échelle ?

J.C. La Corse faisait rêver les personnes qui étudiaient l'autosuffisance alimentaire et l'agroforesterie. Il fut un temps où chaque village produisait suffisamment pour sa consommation, basée sur la culture de la châtaigne et l'élevage porcin. L'île de beauté pourrait servir de modèle à l'avenir. •

1. Rapport de l'Unep, novembre 2022
<https://www.unep.org/resources/publication/2022-global-status-report-buildings-and-construction>

Sans pétrole et sans charbon, Tome 1: Techniques et énergies dans les sociétés préindustrielles,
Julian Carrey,
IS Editions, 2020,
276 pages



Concours

jury Anastasia de Villepin (L'Architecture Aujourd'hui), Philippe Vion-Dury (Socialter), Marion Waller (Pavillon de l'Arsenal), Philippe Bihouix, Elise Dageons, Morgane Delarc (AREP)

Un peu fatigués parfois du « monde d'après » qui se fait décidément attendre ? Déboussolés aussi entre les angoisses environnementales et les promesses technosolutionnistes des empereurs de la tech ? Saturés des rapports de prospective, des scénarios divers et de leurs engagements de neutralité carbone à l'horizon 2030 (2035, 2050, 2060, 2100...), des récits sympathiques pour construire « les nouveaux imaginaires désirables » ? Lassés de débattre à chaque repas de famille avec vos aînés parce que « tout est de leur faute » et qu'on aurait quand même pu réagir avant ? Et d'ailleurs, auriez-vous (ré)agi différemment ? Bref, envie de repartir d'une page presque blanche pour se donner de l'énergie ? Alors ce concours d'uchronie est fait pour vous ! [...]

L'uchronie, c'est « l'utopie de l'Histoire », un genre de fiction qui repose sur le principe de la réécriture de l'Histoire à partir de la modification du passé. Elle part d'une situation historique existante et en modifie l'issue pour imaginer les différentes conséquences possibles. Alors, à vos crayons, stylos, claviers, tables à dessin ! Racontez la bifurcation qui aurait pu avoir lieu, les variantes du cours des choses et du destin du monde. Faites le récit uchronique d'une transformation, voire d'un combat écologique, d'un événement impromptu, politique, social, culturel, ou encore environnemental, et

de ses conséquences. Mettez en scène des personnalités publiques, vos proches ou des personnages de fiction. [...] Faites-nous rire ou rêver. Soyez sincères, émouvants ou révoltés. Donnez-nous à voir des futurs possibles, par la réinvention du passé. Surprenez-nous, bousculez-nous... et surtout inspirez-nous ! » C'est en ces mots qu'AREP a invité les étudiants en école/université européenne d'architecture, d'urbanisme, de design, de sciences politiques ou d'ingénieurs à s'essayer à l'exercice de la fiction. Voici le texte et la BD réalisés par les deux lauréats du concours.

Hasard du calendrier, AREP ouvrait le concours deux semaines après le lancement de la première version publique de ChatGPT par OpenAI. Curieux, comme beaucoup, de cette innovation, nous avons rapidement imaginé de la faire participer.

Aurions-nous pu soumettre le résultat au jury au même titre que les récits et dessins de nos candidats en chair et en os ? Comme vous pourrez le constater, la réponse est indéniablement non. Si le texte répond formellement à la demande, il manque encore un peu de... créativité. Bref, en décembre 2022, il nous restait encore quelques temps avant que nous ne soyons remplaçables ou remplacés. Mais alors que nous bouclons le numéro, ChatGPT en est à sa version 4... Fallait-il « jouer » à nouveau ? Nous avons préféré nous abstenir et ne pas solliciter outrageusement les nombreux serveurs, alimentés pour partie à l'électricité au charbon, nécessaires à sa performance. Matérialité, quand tu nous tiens...



Chat GPT, écris-moi une uchronie qui parlerait d'une bifurcation écologique



Il était une fois, dans un monde qui aurait pu être le nôtre, où l'humanité avait pris conscience de la fragilité de la planète et de son impact sur l'environnement. Ensemble, les gouvernements, les entreprises et les citoyens avaient décidé de prendre des mesures concrètes pour protéger la Terre et ses habitants.

Les énergies propres se développaient à grande vitesse, remplaçant progressivement les combustibles fossiles qui avaient causé tant de dégâts. Les villes devenaient de plus en plus vertes, avec des espaces verts et des toits végétalisés qui absorbaient les gaz à effet de serre et rafraîchissaient l'air. Les transports publics étaient de plus en plus utilisés, et les voitures individuelles avaient été remplacées par des véhicules autonomes et électriques. L'agriculture était devenue plus durable, avec une forte réduction de l'utilisation de pesticides et de fertilisants chimiques.

Grâce à ces efforts concertés, la bifurcation écologique avait été franchie avec succès et la Terre était en voie de guérison. Les espèces en voie de disparition réapparaissaient et les océans retrouvaient leur pureté. Les générations futures pouvaient espérer vivre sur une planète saine et prospère.

Et si le pétrole n'avait été qu'un accident de l'histoire ? Comme un fantôme, l'idée hante les couloirs d'un château écossais, carrefour de la modernité en septembre 1928. Un week-end de fin d'été, les plus grands pétroliers se réunirent en toute discrétion à Achnacarry, en Écosse, pour figer le marché au détour d'une partie de chasse et attribuer au baril un prix sans lien avec sa valeur réelle, parfois moins chère que l'eau. L'accord As-Is (« Tel quel »), resté secret jusqu'aux années 1970, permit aux sociétés pétrolières d'accumuler une richesse immense et de devenir des acteurs politiques surpuissants. Leur activisme politique façonna notre xx^e siècle, puis notre xxi^e siècle – des chamboulements politiques du Moyen-Orient à l'ubiquité des voitures et du plastique, en passant par le camouflage prolongé d'un réchauffement climatique connu de l'industrie dès 1977. En retournant à Achnacarry, le pétrole change de visage. Notre dépendance envers lui n'est plus le sens irrésistible de l'histoire et du progrès, seulement le fruit de la stratégie commerciale réussie d'une poignée d'individus qui parvinrent à métamorphoser une ressource abondante en un nouvel « or noir ». Que se serait-il passé si ces astucieux businessmen avaient trébuché au moment de sceller leur pacte juteux ? Dans quel monde vivrait-on si la machine à profits perpétuels conçue à Achnacarry n'avait pas démarré ? C'est ce scénario alternatif, dans lequel les pires travers d'un capitalisme trop glouton entravent ses plus ardents suppôts, que ce petit texte essaie d'imaginer.

Fort William,
28 septembre 1978

Chère Léa,

Derrick m'a transmis les images de ton enquête sur les raffineries illégales de pétrole en Ouganda. Je suis resté stupéfait : vingt-cinq ans après l'interdiction permanente de toute extraction, c'est quand même dingue que certains soient encore contraints de puiser à la sauvette pour faire tourner leurs tracteurs du début du siècle. J'imagine pas l'odeur et la saleté, c'est vraiment difficile de croire que ça ait pu être considéré comme un produit de luxe il y a à peine quelques décennies.

J'ai justement pensé à toi l'autre jour et à tes recherches sur les derniers vestiges des pétroliers. Je suis actuellement en Écosse avec la Mecav (Mission européenne pour la captation des vents) ; on fait de la prospection dans des zones venteuses et relativement inhabitées pour y installer des parcs éoliens à très grande échelle. L'équipe est sympa et le boulot intéressant, mais surtout, ce qui fait le sel du voyage, c'est l'hébergement dans de vieux manoirs hantés avec têtes de cerfs au mur, tapisseries et passages secrets. La semaine dernière, nous avons dormi à Achnacarry, un château au milieu des lochs tenu par un vieux monsieur avec qui j'ai discuté après le repas. Quand je lui ai parlé de tes travaux, il m'a dit qu'Achnacarry avait été, dans son enfance, un haut lieu du pétrole. J'ai dû avoir l'air dubitatif, car il est parti une bonne heure fouiller au grenier et m'a ramené un petit carton, « à lire pour m'endormir ». Tu t'en doutes, je n'ai pas pu fermer l'œil.

Pour faire court, quelques mois seulement avant l'emballement de 1929 et le premier effondrement du prix du pétrole, tous les grands pétroliers se sont réunis ici même, en secret, avec l'idée de figer totalement le marché pour s'assurer une jolie rente perpétuelle (une sorte de cartel donc). Sans succès. Dans le carton on trouve de tout : des plans de table, des brouillons d'accord, même les allergies des différents invités, une vraie mine d'or pour ta thèse. En attendant, pour te mettre l'eau à la bouche, je t'ai recopié une note rédigée par un conseiller de Deterding, l'organisateur de cette petite kermesse. C'est un compte-rendu pour l'héritier de Shell, mais la partie vraiment sidérante, c'est le « scénario catastrophe » à la fin, c'est comme si cet Atherton avait eu une boule de cristal. Enfin, « catastrophe », tout est affaire de perspective.

J'ai hâte d'en discuter avec toi, je rentre dimanche par le train en fin d'après-midi.

Amitié,

Carlos

OBJET : ÉCHEC DES DISCUSSIONS À ACHNACARRY

CONFIDENTIEL

17/09/1928

De : E. ATHERTON, attaché auprès de H. DETERDING, directeur général,
Royal Dutch Shell Company (RDSC)
Destinataire : W. SAMUEL, Président, RDSC

M. Samuel,

Comme vous le savez, du jeudi 13 septembre au dimanche 16 septembre, H. DETERDING (ci-après HD) a invité quelques collègues à se joindre à lui pour un week-end de chasse au château d'Achnacarry (Écosse). Les convives ont répondu à l'appel (liste complète en annexe), la réputation du «Napoléon du pétrole» le précédant.

En marge d'un agréable rendez-vous cynégétique, le week-end devait être l'occasion d'évoquer le projet de mise sous cloche du marché mondial du pétrole, que HD vous a présenté en juin. (cf. rapport interne Plan As-Is, perspectives et intérêts). Pour rappel, celui-ci consiste à figer, dans son état actuel, le prix du baril de pétrole ainsi que la répartition des parts de marché, afin de limiter tout effet de concurrence délétère à la rentabilité de notre entreprise.

Depuis plusieurs mois, ce projet crucial pour la survie de notre activité fait l'objet d'une préparation minutieuse par HD, en coordination secrète avec ses homologues Sir J. CADMAN (Anglo-Persian) et W. C. TEAGLE (S.O. New Jersey). La rencontre à Achnacarry avait pour objet d'exposer la stratégie à nos principaux concurrents et de les convaincre du principe d'un tel accord. Rien n'a été laissé au hasard pour transformer nos rivaux en camarades : HD a su faire preuve d'une hospitalité à la hauteur du cadre millénaire dans lequel s'est tenue la rencontre, tout en veillant à la totale discrétion de l'événement.

Je suis cependant au regret de vous annoncer que, malgré tous nos efforts, les négociations ont à ce stade échoué. En effet, plusieurs producteurs moyens semblent intrinsèquement opposés au figeage «tel-quel» du marché, et la frayeur provoquée par la guerre des prix pour l'accès au marché indien au printemps n'a pas suffi à les faire changer d'avis - ils croient encore en leur chance. L'un des facteurs déterminants de cet échec a été l'absence de C. GULBENKIAN. Lors du grand partage du pétrole ottoman en mai de cette année - via l'accord «de la ligne rouge» - M. GULBENKIAN avait impressionné HD par ses qualités de persuasion. Aussi comptait-il fermement sur lui pour marteler son adage «mieux vaut une petite part d'une grande tarte que l'inverse», et faire voir à chacun, même au plus petit de nos invités, son intérêt. Hélas le fantasme Arménien semble avoir été dépassé par son hypocondrie et a refusé de venir en Écosse au prétexte d'une épidémie de grippe aviaire.

Au vu de l'échec des discussions d'Achnacarry, HD ne cache plus son inquiétude quant à une véritable déstabilisation du marché du pétrole, voire à un effondrement. L'épisode indien qui nous a opposés à S.O. New Jersey a été un signal d'alarme, provoquant des pertes graves pour nos deux entreprises et nous forçant à repousser indéfiniment des investissements urgents. La compétition nous ruine. Nos collègues semblent cependant déterminés à rester nos concurrents et à ne tirer aucune leçon des premières secousses. D'ailleurs, au cours d'échanges

informels, des bruits sur les ambitions respectives de W. L. MELLON (Gulf Oil) et du Col. R.W. STEWART (S.O. Indiana) en Amérique latine nous sont plusieurs fois parvenus, présageant d'une crise imminente et à nouveau désastreuse. Il se pourrait donc bien que l'industrie du pétrole, si elle persiste dans sa trajectoire d'expansion brutale et chaotique, entre très vite dans une lutte mortelle avec elle-même, qui l'affaiblira tant qu'elle ne pourra plus réaliser les investissements nécessaires à sa survie.

Mais là où le bât blesse réellement, c'est lorsque cette observation rencontre la théorie de HD sur le rapport ambivalent des États aux pétroliers. Nos collègues américains semblent persuadés du soutien inébranlable de Washington, mais il est permis d'en douter. Le pétrole est aujourd'hui fructueux, il rime avec croissance, enrichissement et élections gagnées, mais cela pourrait évoluer. Si les prix s'effondraient sous le poids d'une concurrence trop dure, le pétrole n'aurait plus la rareté qui fait sa valeur : il se changerait en eau et perdrait de la sorte son poids politique. Quel gouvernement accepterait alors de payer l'immense coût diplomatique si nous devons, comme par le passé, recourir à la persuasion et à la force pour accéder à un gisement hors de nos frontières?

L'indifférence des États est une chose, leur courroux en est une autre. Vous avez lu les premières études internes sur les effets atmosphériques de la combustion pétrolière. Ces données semblent, de prime abord, fantaisistes, voire réjouissantes. Ainsi, en brûlant du pétrole, nous n'aurions bientôt plus froid à Londres? HD assure cependant qu'elles doivent être traitées avec le plus grand sérieux et la plus grande discrétion : si le pétrole perd sa lucrativité, et donc son attractivité économique et politique, qui nous protégera si l'opinion venait à se détourner du pétrole nouvellement jugé sale, ou pire, dangereux? Et, faute d'avoir pu nous renforcer grâce à une rente, par quels moyens nous protégerons-nous nous-mêmes?

Synthétisons. Imaginez le cocktail suivant :

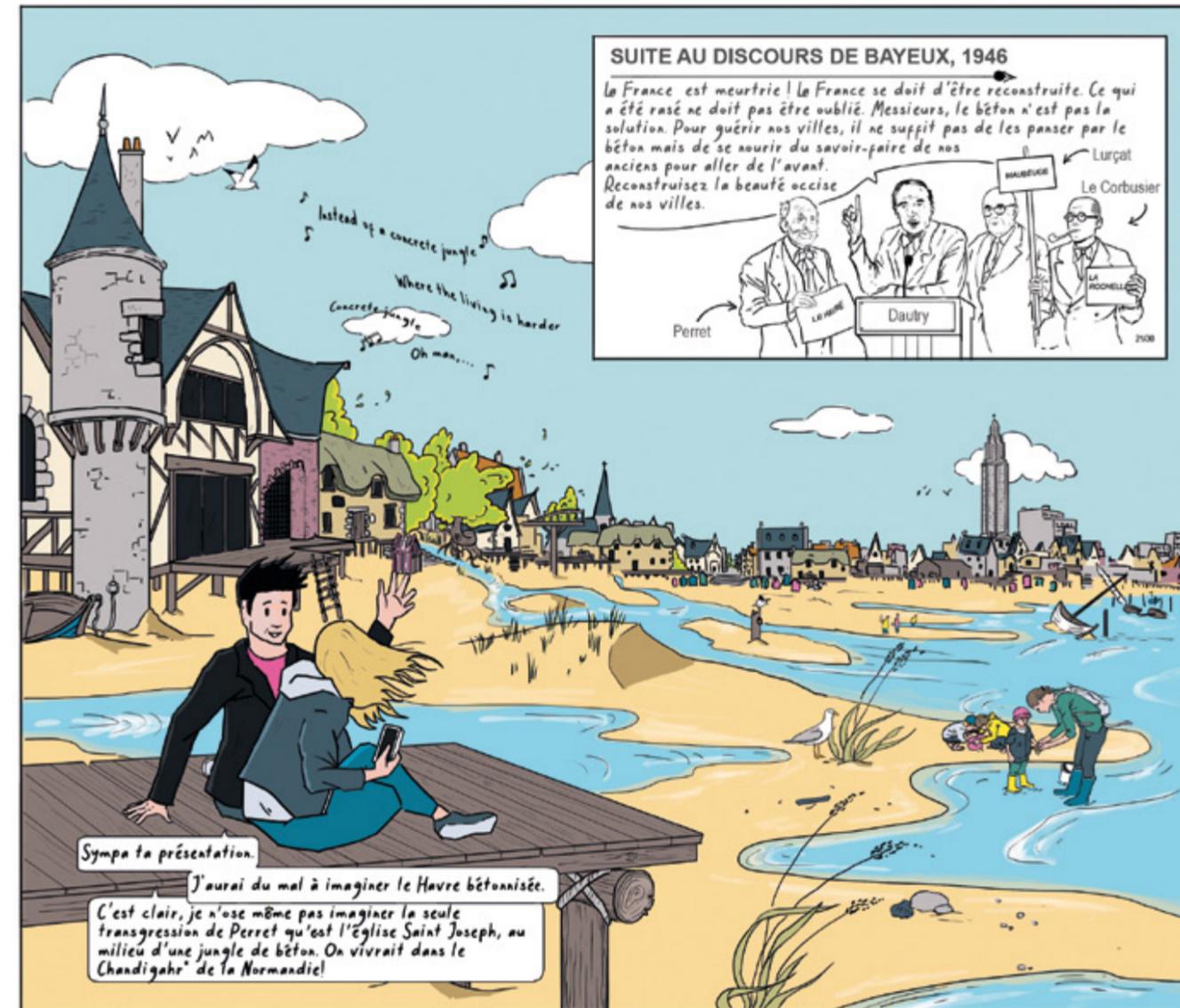
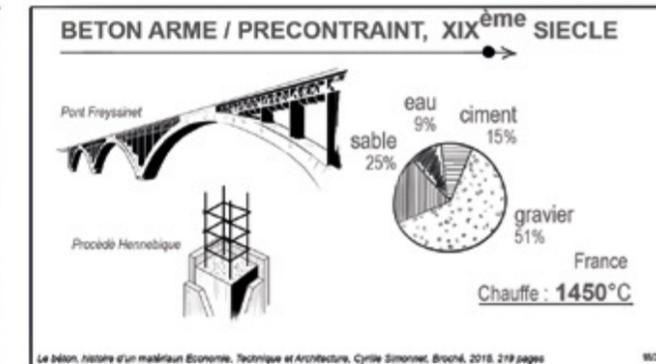
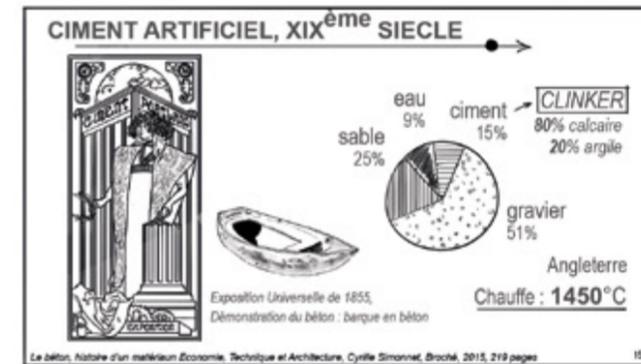
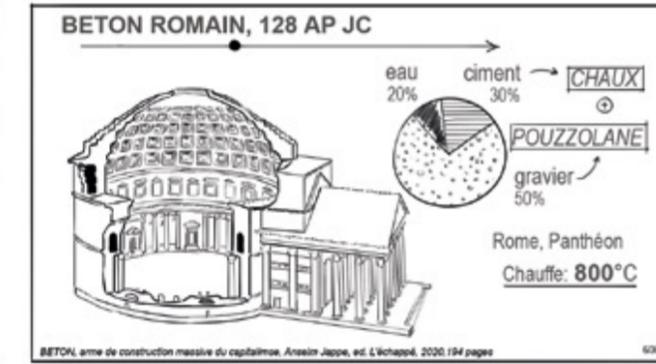
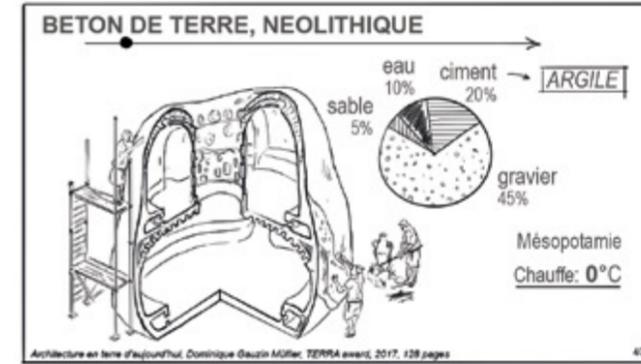
- Pétrole peu cher, donc peu rémunérateur, les investissements se tarissent et les nouveaux gisements à l'étranger demeurent inatteignables, du fait d'un manque de soutien politique.
- Parallèlement, émergence potentielle d'approvisionnements énergétiques plus rémunérateurs, car non soumis à la concurrence (cf. notamment les recherches en cours sur les usages industriels de l'uranium).
- Prise de conscience du caractère dangereux de la combustion pétrolière, sans possibilité pour l'industrie d'influer dans les débats de façon significative.

On pourrait alors raisonnablement aboutir à une interdiction de l'exploitation pétrolière, abandonnée sans regret par la puissance publique pour plaire à l'opinion.

Bien entendu, il s'agit là d'un scénario catastrophe que HD n'a pas abordé à Achnacarry, ne souhaitant pas exciter les vautours en donnant des signaux de faiblesse. Néanmoins, l'échec actuel des discussions alimente sa préoccupation : nous devons être vigilants à ne pas perdre trop de plumes dans les conflits des mois à venir et tâcher sans relâche de nous coordonner avec nos concurrents. Autrement, notre trop grand appétit risque de nous conduire à une crise de foie, et si le vent tourne, nous serons trop faibles pour que quiconque se préoccupe de nous guérir.

Et si... Et si nos littoraux n'avaient pas été bétonnés ? C'est l'uchronie que nous avons imaginée en rebattant les cartes de l'expansion et de la profusion du béton dans la société moderne. Le béton est un matériau utilisé depuis longtemps. Il a évolué avec le temps et les nouvelles techniques, s'artificialisant au fil des âges. Il a permis de construire des bâtiments de plus en plus hauts et aux formes de plus en plus excentriques. Grâce à son faible coût économique et à sa rapidité de mise en œuvre, il a été utilisé en masse pour la reconstruction d'après-guerre. À cette époque, les conséquences désastreuses de ce matériau sur l'environnement étaient connues mais négligées face à l'urgence de la crise du logement. Les villes nouvelles sont des villes de béton : Saint-Dié-des-Vosges, Dunkerque, Le Havre... Nous avons alors imaginé que le béton ne serait plus qu'un matériau utilisé pour quelques ouvrages spécifiques. Les autres bâtiments seraient construits en suivant les techniques de construction artisanales vernaculaires avec des matériaux locaux. Les consignes données par Raoul Dautry, ministre de la Reconstruction et de l'urbanisme d'après-guerre, à l'attention des grands architectes de l'époque (Le Corbusier, Auguste Perret, etc.), auraient incité à construire traditionnellement. La scène se tient au moment du discours de Bayeux en 1946. Charles de Gaulle y énonce alors les consignes de la Reconstruction, considérant qu'il est nécessaire de construire des bâtiments durables et de préserver les savoir-faire traditionnels et régionaux de la construction française. On voit Le Havre, une ville de bord de mer, où les bâtiments à colombages en pierre seraient construits sur pilotis pour préserver la plage. Seule l'église Saint-Joseph, symbole de l'architecture en béton de Perret, se détacherait du paysage.

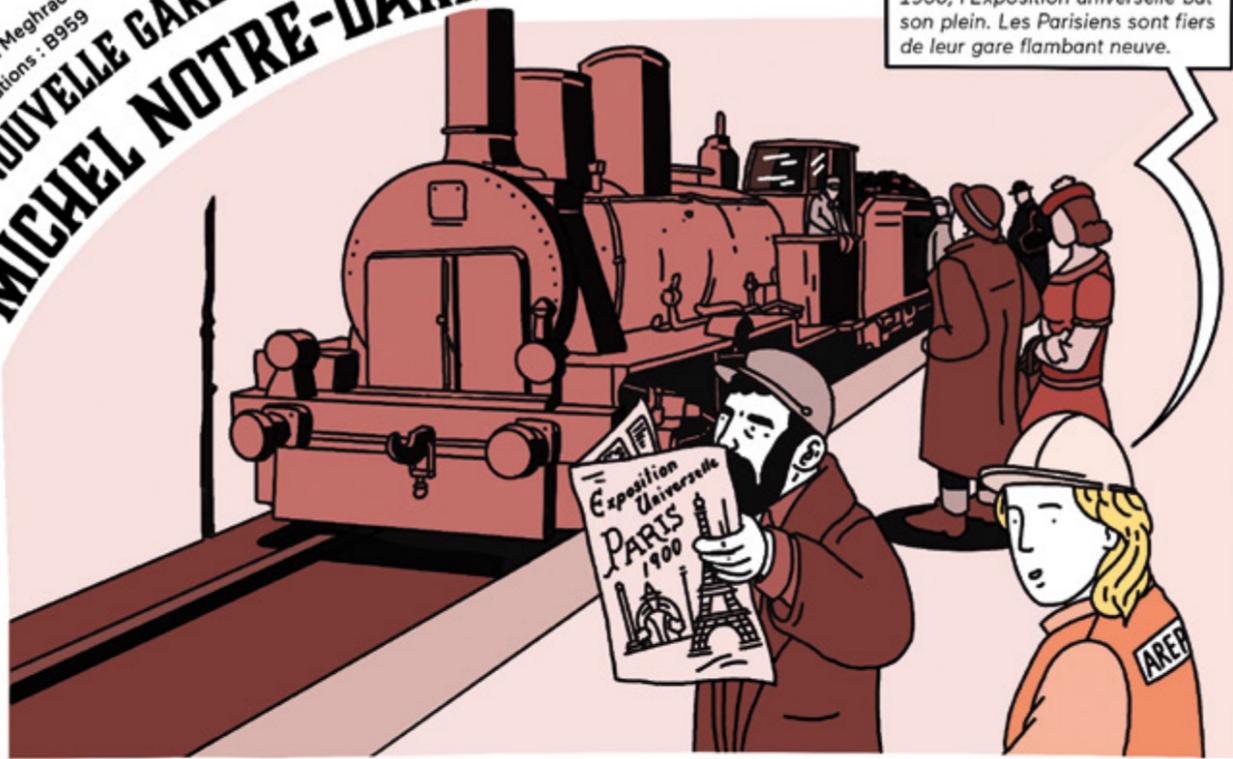
Lauréats n°2 Agathe Bonduaux (représentante de l'équipe) et Vincent Mesnard (INSA Strasbourg)



* Chandigarh, ville nouvelle en béton construite après l'indépendance de l'Inde, et dessinée entre autre par Le Corbusier.

textes : Lila Meghraoui
illustrations : B959

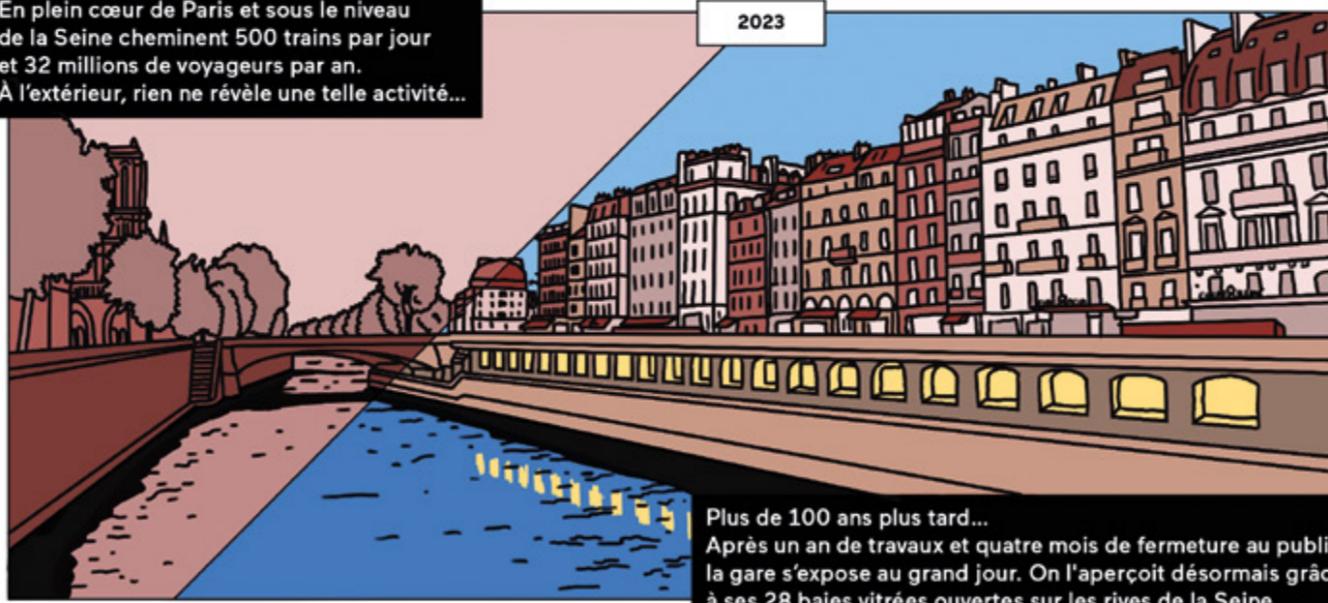
LA NOUVELLE GARE SAINT-MICHEL NOTRE-DAME



1900, l'Exposition universelle bat son plein. Les Parisiens sont fiers de leur gare flambant neuve.

En plein cœur de Paris et sous le niveau de la Seine cheminent 500 trains par jour et 32 millions de voyageurs par an. À l'extérieur, rien ne révèle une telle activité...

2023



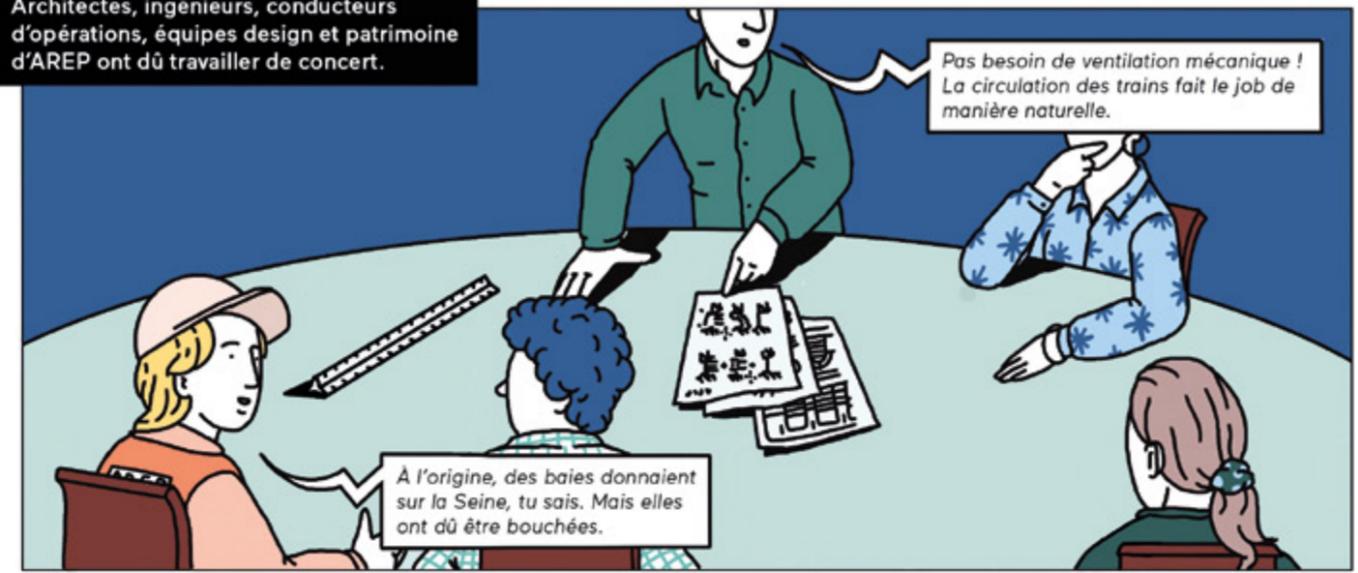
Plus de 100 ans plus tard... Après un an de travaux et quatre mois de fermeture au public, la gare s'expose au grand jour. On l'aperçoit désormais grâce à ses 28 baies vitrées ouvertes sur les rives de la Seine.

Plus lumineuse, plus accessible aussi. Mais la nouvelle gare ne s'est pas faite en un jour...



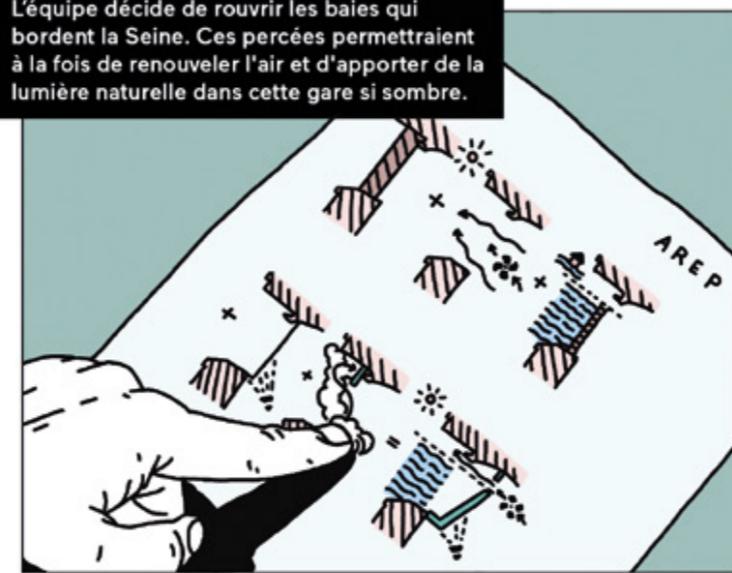
Suivez-moi, je vous fais le tour du propriétaire !

Architectes, ingénieurs, conducteurs d'opérations, équipes design et patrimoine d'AREP ont dû travailler de concert.



L'équipe décide de rouvrir les baies qui bordent la Seine. Ces percées permettraient à la fois de renouveler l'air et d'apporter de la lumière naturelle dans cette gare si sombre.

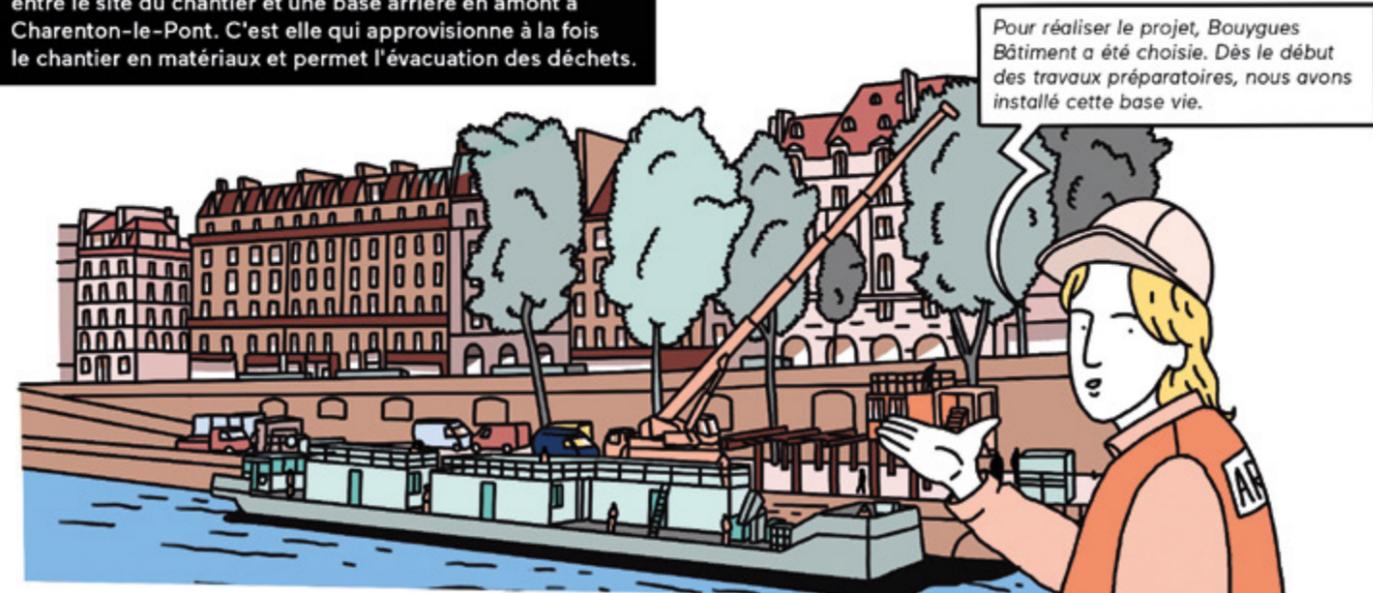
Les baies sont conçues pour faire face à une possible crue.

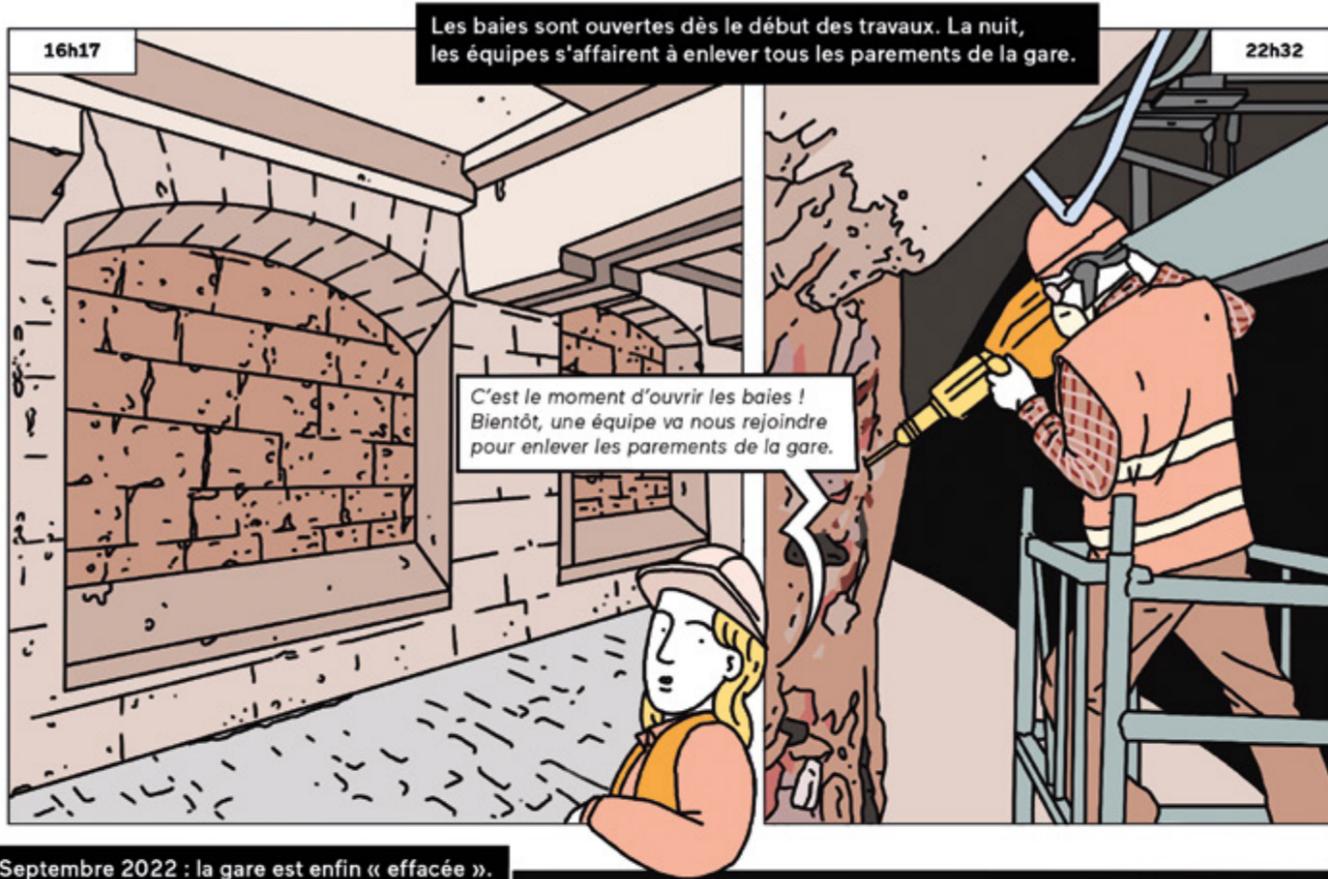


Bon, les baies servent aussi à protéger le sommeil des riverains.

Pour assurer la logistique, une péniche assure la liaison entre le site du chantier et une base arrière en amont à Charenton-le-Pont. C'est elle qui approvisionne à la fois le chantier en matériaux et permet l'évacuation des déchets.

Pour réaliser le projet, Bouygues Bâtiment a été choisie. Dès le début des travaux préparatoires, nous avons installé cette base vie.





16h17

Les baies sont ouvertes dès le début des travaux. La nuit, les équipes s'affairent à enlever tous les parements de la gare.

22h32

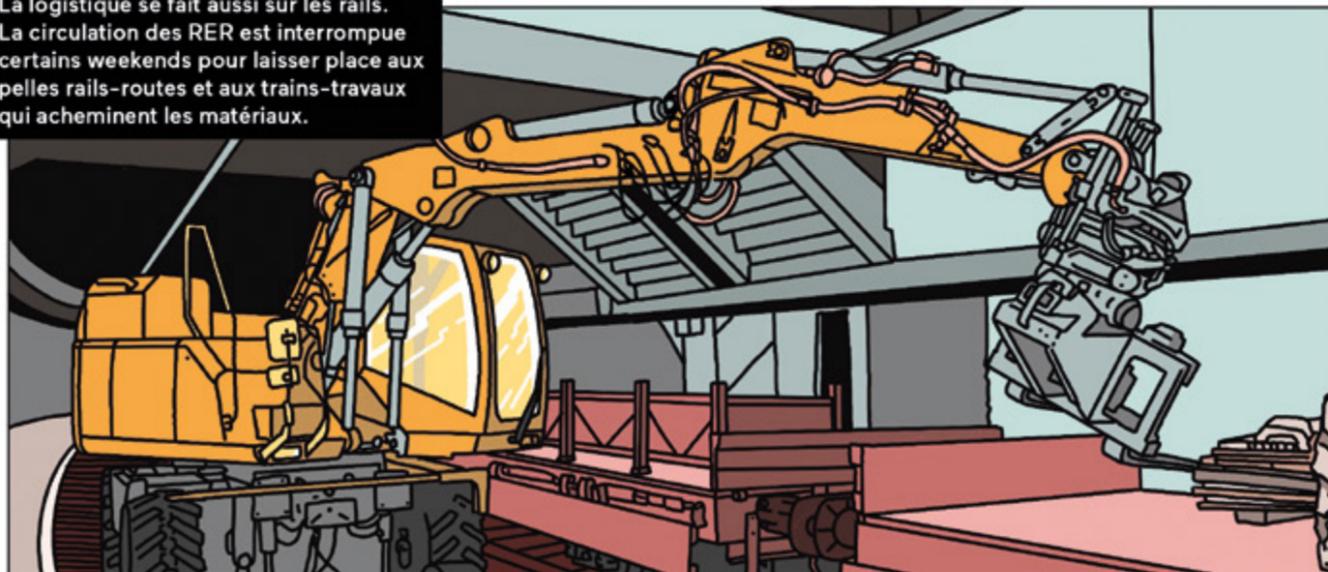
C'est le moment d'ouvrir les baies !
Bientôt, une équipe va nous rejoindre pour enlever les parements de la gare.

Septembre 2022 : la gare est enfin « effacée ».



Les trains circulent, mais ne s'arrêtent pas.

La logistique se fait aussi sur les rails. La circulation des RER est interrompue certains weekends pour laisser place aux pelles rails-routes et aux trains-travaux qui acheminent les matériaux.

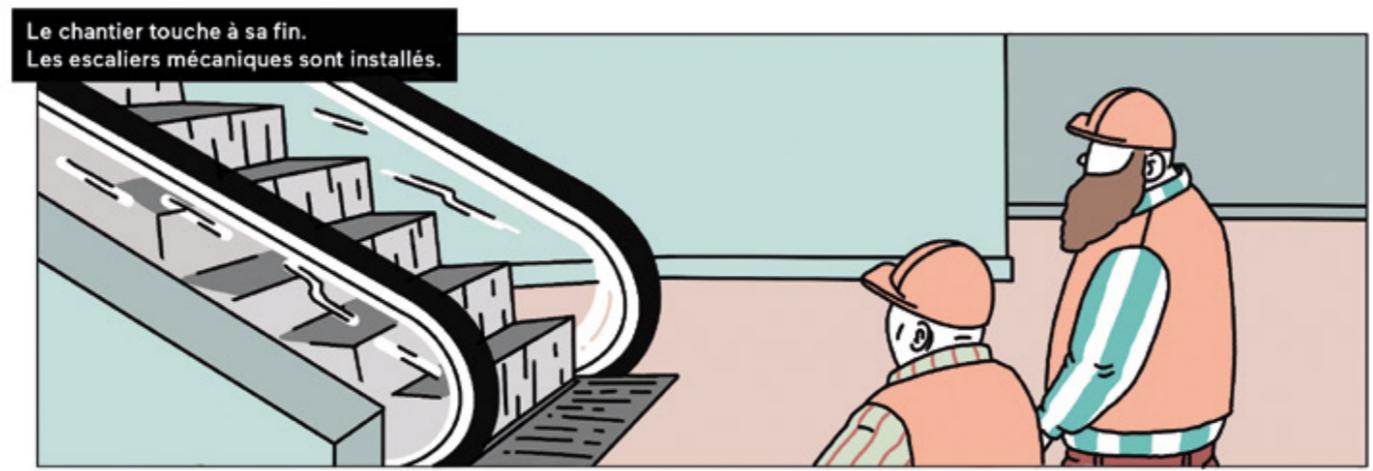


La façade vitrée de la mezzanine est posée.



Le travail de curage fait apparaître des pierres historiques et de la brique.

C'est émouvant.



Le chantier touche à sa fin. Les escaliers mécaniques sont installés.



Avril 2023 : la nouvelle gare Saint-Michel Notre Dame ouvre ses portes.

POST Junior

page 104

Le cycle de la canette
en aluminium



page 106

L'histoire
du gratte-ciel



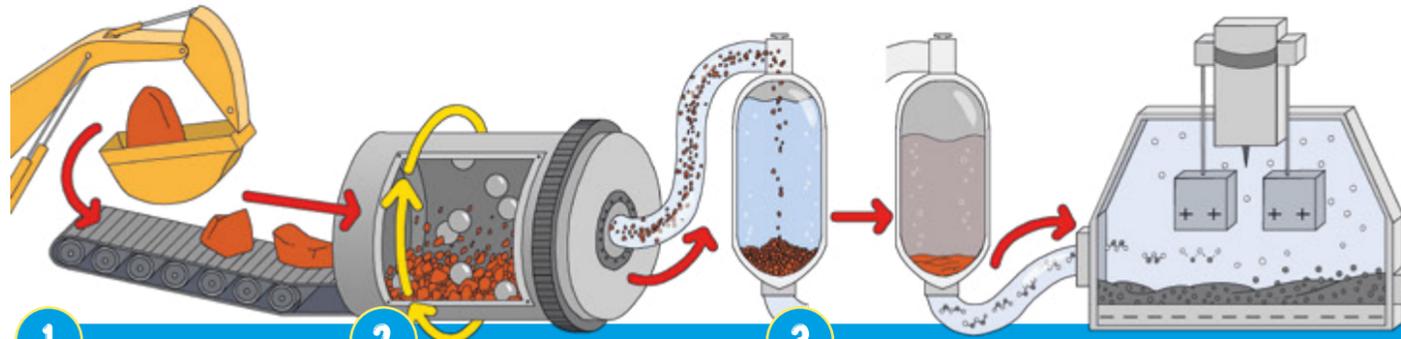
page 108

Fausse bonne idée:
chauffer l'extérieur
pour refroidir l'intérieur



Le cycle de vie d'une canette

texte NORA BOUAZZOUNI illustrations EMMA ROULETTE



1

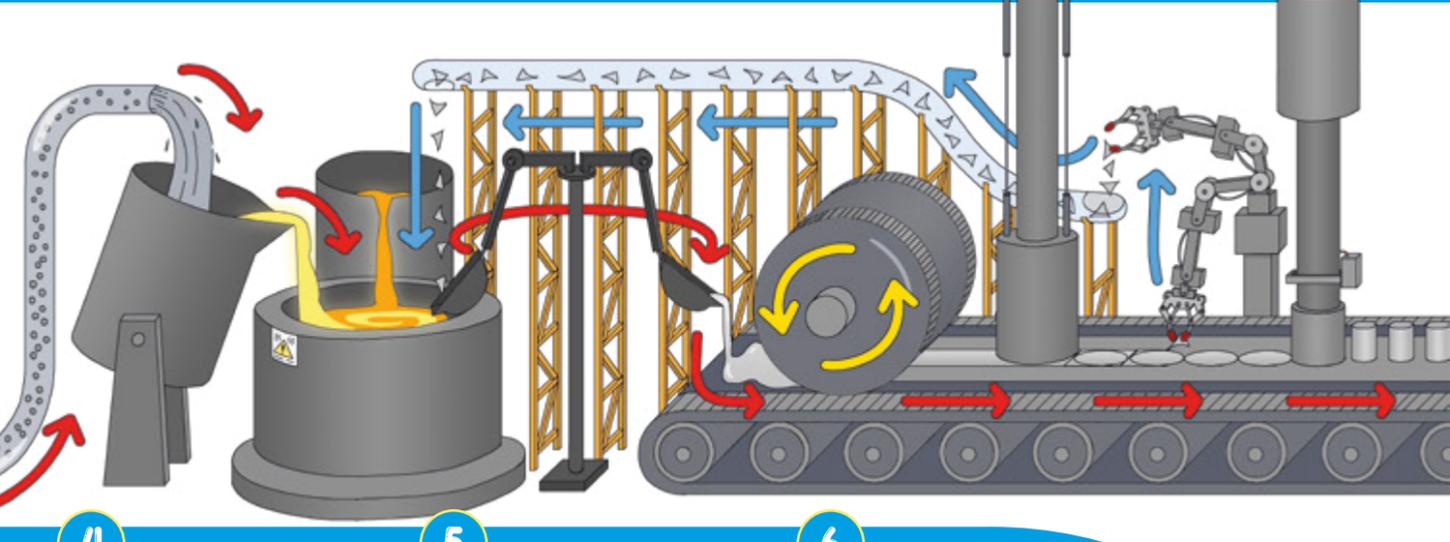
L'aluminium n'existe pas sous forme pure dans la nature, mais est contenu dans un minerai rouge appelé bauxite. C'est à partir de la bauxite qu'on extrait l'alumine, une poudre blanche, matériau de base de l'aluminium.

2

Pour obtenir l'alumine, on broie d'abord la bauxite, puis cette poudre est dissoute dans de la soude chauffée à haute pression. L'aluminate de sodium obtenu est filtré, déshydraté, puis refroidi: il devient de l'oxyde d'aluminium, l'autre nom de l'alumine.

3

L'alumine subit ensuite une électrolyse: on la verse dans un bain de cryolite (un minéral composé de fluorure de sodium et d'aluminium) à plus de 950 °C. La cuve est traversée par un courant électrique de haute intensité, qui permet de séparer les différents éléments: l'aluminium, ion positif, qui se dépose sur l'électrode négative, est récupéré sous forme liquide.



4

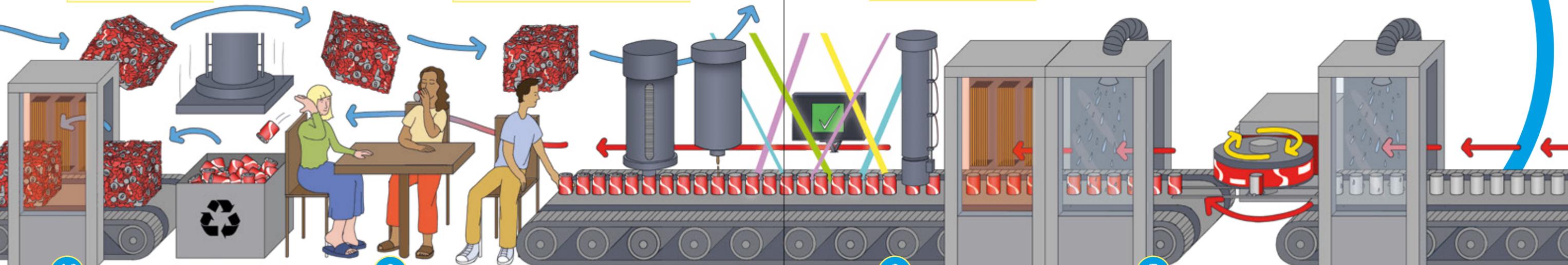
L'aluminium liquide est envoyé en fonderie, où l'on y ajoute éventuellement d'autres éléments (magnésium, silicium...) afin de créer des alliages en fonction des propriétés souhaitées: plus résistants, plus malléables...

5

L'aluminium est ensuite coulé sous différentes formes: lingots, plaques, feuilles, barres, fils... que les entreprises vont transformer. Pour fabriquer une canette, on utilise des rouleaux d'aluminium.

6

Les feuilles très fines du rouleau sont découpées en disques, puis embouties pour former des coupelles. Les coupelles sont étirées et embouties à nouveau jusqu'à obtenir la hauteur voulue. Le fond est modelé en forme de dôme inversé pour résister à la pression intérieure.



10

Les canettes recyclées sont compactées en gros cubes qui sont chauffés pour brûler les matières organiques (les peintures par exemple). Une canette n'est donc jamais recyclée «à 100 %». Une fois fondu, l'aluminium est moulé en plaques, qui sont ensuite laminées en rouleaux: les feuilles pourront à nouveau être transformées en canettes.

9

La canette est remplie: après la boisson, on ajoute de l'azote liquide pour chasser l'air, augmenter la durée de vie du produit et faire monter la pression interne, ce qui rend l'emballage plus rigide. Enfin, le couvercle est posé, ou «serti», pour rendre la canette étanche à l'oxygène. Les canettes sont prêtes! En France, seuls 70 % de ces canettes seront recyclées.

8

L'ouverture de la canette est réduite pour préparer la pose du couvercle, puis des dispositifs lumineux vérifient l'absence de microtrous, de défauts de fabrication ou de décoration.

7

Les canettes sont ensuite nettoyées et prétraitées, puis pressées contre un rouleau encreur qui peut imprimer jusqu'à quatre couleurs en même temps. Elles reçoivent un vernis protecteur transparent, avant de traverser le four où l'encre est séchée. Un revêtement spécial est ensuite vaporisé sur les parois intérieures et les canettes repassent au four pour séchage.

L'invention du gratte-ciel

texte NORA BOUAZZOUNI

illustration KATIE SCARLETT GRIFFIN

Aujourd'hui, 54 % de la population mondiale vit en ville (66 % en 2050)



Contre 46 % en zone rurale



Si les premières villes importantes font leur apparition environ 7 000 ans avant notre ère, l'histoire de l'urbanisation de notre planète est quelque peu mouvementée. La chute de l'Empire romain et les grandes invasions ralentissent le phénomène en Occident. Les villes reprennent temporairement leur pouvoir (d'attraction) sur la campagne à partir du XIV^e siècle. La crainte des pandémies éloignera un temps les nouveaux urbains. Aujourd'hui, plus de la moitié des 7,8 milliards d'habitants qui peuplent la Terre vit en ville ou dans des zones urbaines, contre 15 % en 1900. L'ONU estime d'ailleurs que d'ici 2050, cela concernera presque sept personnes sur dix, soit 2,5 milliards d'humains supplémentaires. Alors, comment loger tout le monde ?

La question se pose depuis la révolution industrielle, au XIX^e siècle, des pays dits « du Nord » (Grande-Bretagne, France, Allemagne, États-Unis et Canada, suivis par le Japon et la Russie), où les machines remplacent peu à peu une partie du travail manuel, puis l'exode rural, qui voit les populations des campagnes venir vivre ou travailler en ville.

Les gratte-ciel naissent aux États-Unis dans des villes nouvelles, notamment à Chicago, frappée en 1871 par un grand incendie qui libère des espaces considérables. C'est sur des parcelles bien définies, issues du plan en damier typiquement américain (dont les rues

rectilignes se croisent à angle droit et dessinent des carrés) que s'érigent ces premières tours. Elles marquent également un désir d'émancipation culturelle d'architectes américains formés à Paris et la manifestation de la puissance économique du pays.

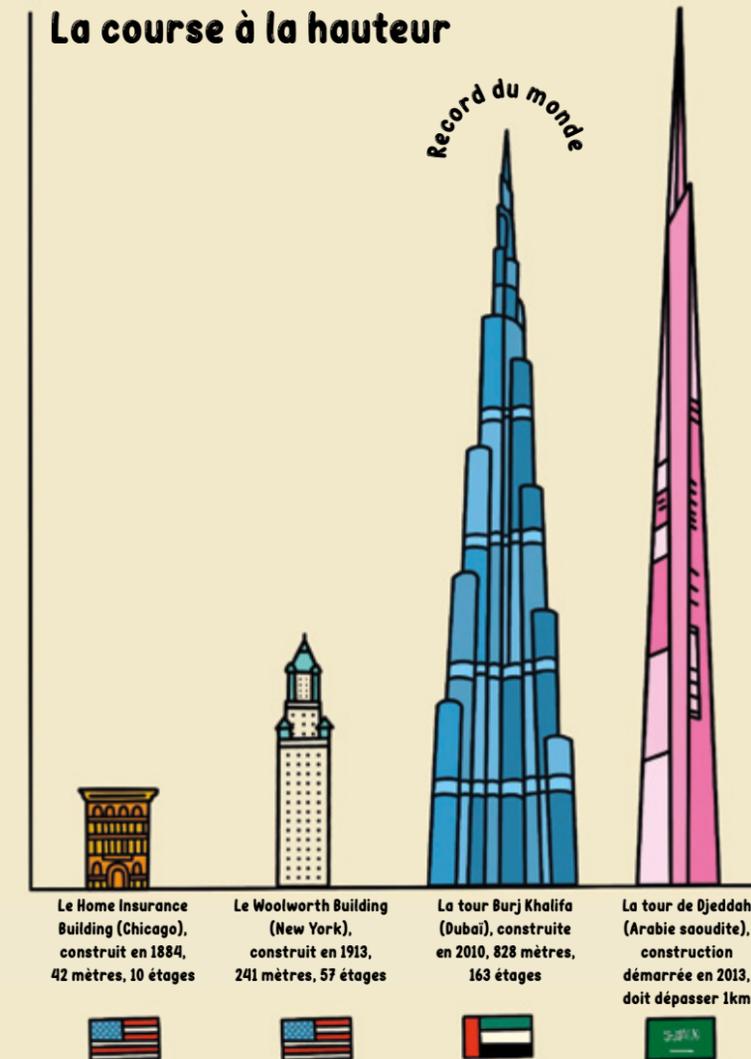
Et toi, tu démesures combien ?

Ces premiers immeubles géants, qui abritaient des bureaux, ne nous paraissent plus si impressionnants aujourd'hui. Le Home Insurance Building, construit à Chicago en 1884, mesurait 42 mètres et comportait dix étages. Bien plus grand, le Woolworth Building et ses 57 étages culminent à 241 mètres : achevé en 1913, c'est l'un des plus anciens gratte-ciel du quartier de Manhattan, à New York, et l'un des cinquante plus hauts du pays. Depuis 2010, c'est la gigantesque tour Burj Khalifa, érigée à Dubaï (Émirats arabes unis) qui détient le record du monde, avec ses 828 mètres et 163 étages, qui abrite appartements, bureaux et même un hôtel de luxe avec plusieurs restaurants. Mais l'Arabie saoudite ambitionne de détrôner son voisin en relevant un défi de taille : dépasser le kilomètre de hauteur avec la tour de Djeddah, dont la construction a débuté... en 2013.

Si l'altitude exponentielle de ces immeubles a été rendue possible, au fil des siècles, par les progrès technologiques – invention de l'ascenseur, développement de l'éclairage électrique, du chauffage, de la climatisation, production industrielle de l'acier – cette course à la hauteur est devenue une démonstration de force qui ne résout pas les problèmes de surpopulation urbaine. Ces mégatours, symboles de la puissance économique, technologique et politique d'un pays, ont bien l'avantage d'occuper moins de surface au sol, mais leurs inconvénients dépassent largement leurs atouts.

En plus de leurs coûts de construction et de maintenance très élevés, de leur forte

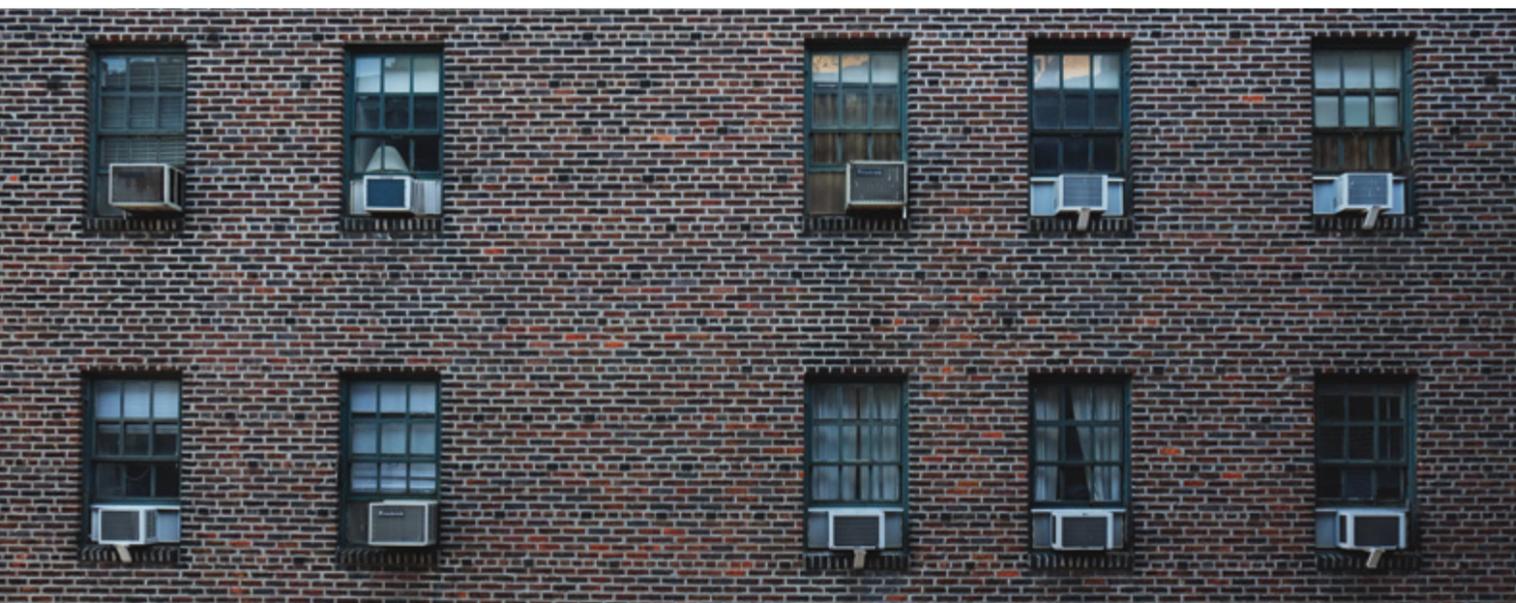
La course à la hauteur



empreinte carbone, due à l'extraction, la transformation et le transport des matériaux, et de leurs loyers onéreux, les gratte-ciel attirent les entreprises au détriment des habitants. Ils ne règlent donc pas le problème du logement dans les villes à forte densité, concentrent les emplois, saturent les transports en commun, augmentent la mortalité des oiseaux et cachent le soleil aux voisins. Ces gigantesques structures sont surtout très énergivores (électricité, chauffage, ventilation, climatisation) et leur noyau central est un gaspillage d'espace rendu inhabitable. En effet, plus la tour gagne en hauteur, plus la base et le noyau doivent être larges. Les spécialistes estiment d'ailleurs que les immeubles de faible hauteur sont plus performants en termes d'espace et de carbone.

La climatisation mécanique : fausse bonne idée

texte NORA BOUAZZOUNI



Et si je vous disais que la climatisation a été inventée il y a environ 3 000 ans, au Moyen-Orient ? À cette époque, les architectes iraniens ont mis au point un système de ventilation naturelle et de refroidissement appelé *badgir*, qui signifie «attrape-vent». Des conduits verticaux ressemblant à des tourelles et dont les fentes verticales captent le vent. Celui-ci descend vers l'habitation, tandis que l'air chaud, plus léger, remonte via un second conduit pour s'échapper. C'est la différence de pression qui crée de l'air frais. Parfois, un bassin se trouve sous le *badgir*, pour abaisser davantage la température ou maintenir l'eau au frais. Cette technologie «passive» (c'est-à-dire qui ne consomme pas d'énergie), encore utilisée en Iran, a été adoptée par les Romains de l'Antiquité, mais aussi au Canada (pour réchauffer l'air durant l'hiver) et en Provence, sous le nom de «puits canadien» ou «puits provençal».

Aujourd'hui, le changement climatique et la hausse des températures suscitent un regain d'intérêt pour ces solutions à très faible empreinte environnementale. En 2018, l'architecte indien Monish Siripurapu s'est inspiré d'une technique antique utilisée par les Égyptiens pour créer un système de climatisation écologique, récompensée par le programme des Nations unies pour l'environnement. Son principe: faire couler de l'eau sur de gros tubes en argile disposés les uns au-dessus des autres, façon alvéoles d'une ruche. L'air qui passe au travers se trouve donc naturellement refroidi. Son installation a permis de faire baisser de 15 degrés la température intérieure d'une usine de matériel électronique.

Le cercle vicieux de la climatisation moderne

Mais pourquoi ne pas tout simplement s'offrir un peu d'air frais grâce à l'invention de Willis H. Carrier, ingénieur américain qui créa la climatisation moderne en 1902? Aujourd'hui, la planète ne compte pas moins de 1,6 milliard de climatiseurs électriques, dont 50 % aux États-Unis et en Chine.

Eh bien, parce que c'est d'abord une technologie très énergivore: la climatisation représente environ un cinquième de la consommation

Aujourd'hui, la planète ne compte pas moins de 1,6 milliard de climatiseurs électriques, dont 50 % aux États-Unis et en Chine.

électrique des bâtiments dans le monde, soit 10 % de la consommation électrique mondiale. Et avec le réchauffement climatique, l'Agence internationale de l'énergie estime que leur nombre pourrait passer à 5,6 milliards d'ici 2050, devenant ainsi la première source de consommation d'électricité dans le monde. Ensuite, parce que la climatisation nourrit un cercle vicieux.

Le fonctionnement d'un climatiseur ressemble à celui d'un réfrigérateur: un fluide frigorigène, en circuit fermé, subit différents changements de température et de pression pour passer de l'état gazeux à l'état liquide, et ainsi refroidir l'air. Mais pour remplir sa mission, il doit évacuer la chaleur créée. Le principe est donc de rafraîchir l'intérieur... en réchauffant l'extérieur. La climatisation participe ainsi à l'apparition des fameux îlots de chaleur urbains observés dans les grandes villes. Plus il fait chaud dehors, plus on installe de climatiseurs à l'intérieur. Un cercle vicieux.

Pire: les fluides réfrigérants contenus dans les climatiseurs (HFC) sont particulièrement nocifs pour l'environnement. En cause, leur effet de serre. L'Agence de la transition écologique estime qu'en France, «la climatisation est aujourd'hui responsable de près de 5 % des émissions d'équivalent CO₂ du secteur bâtiment». Et avec la multiplication des épisodes caniculaires, ça ne va pas aller en s'arrangeant. Chez les particuliers, le taux d'équipement en climatiseurs a presque doublé, passant de 14 % en 2016-2017 à 25 % en 2020.

Points de vue

page 112

Raphaël Ménard,
*«Comme en peinture,
l'architecture se bonifie
souvent avec le repentir»*

page 116

Regards croisés

page 122

Lettre à un pote
qui s'en fout

page 124

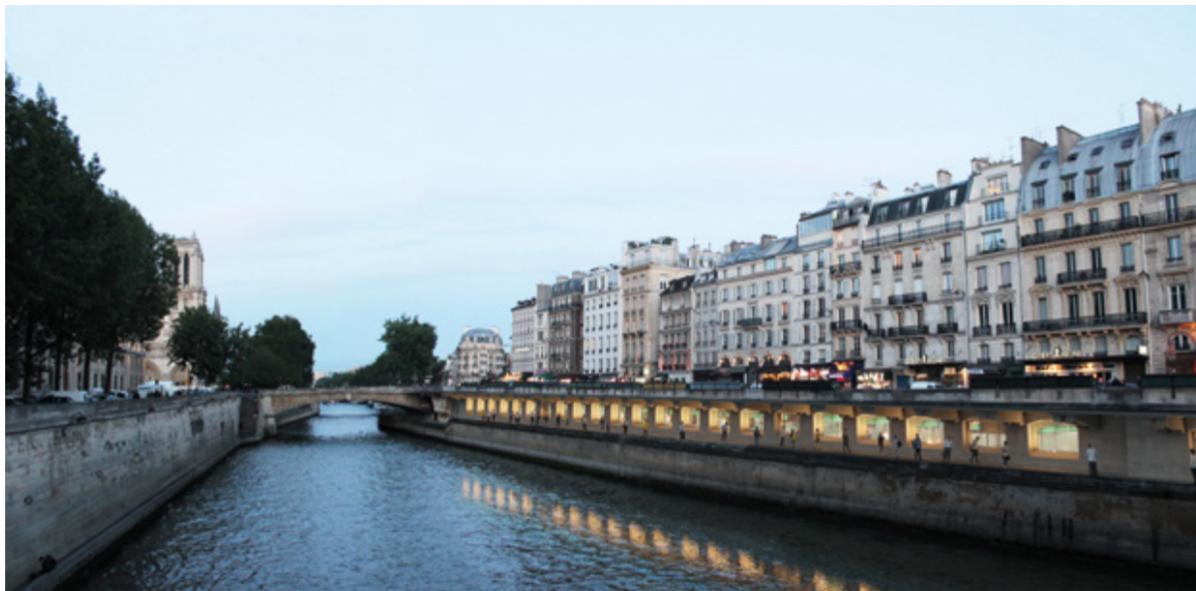
Sabine Barles,
*«Le recyclage tel qu'il existe
est plutôt du sous-cyclage»*

Raphaël Ménard

« Comme en peinture, l'architecture se bonifie souvent avec le repentir »

propos recueillis par Romane Mugnier

Avant de poser à des experts quelques questions, la rédaction de POST a discuté avec Raphaël Ménard, architecte et ingénieur, président du directoire d'AREP. L'occasion de prendre de la hauteur, d'ébaucher une brève histoire des pratiques des architectes et des urbanistes face aux alertes environnementales – bien plus médiatisées à partir des années 1950, mais aussi de projeter la profession dans des scénarios souhaitables.



Modernisation de la gare de Saint-Michel Notre Dame, 2023

On l'a évoqué plus haut dans la revue (voir *Brève histoire des alertes scientifiques et environnementales*, p. 28), une certaine prise de conscience de la crise environnementale trouve ses origines très tôt dans le monde savant, jusqu'à culminer dans les années 1970 avec le Rapport Meadows. Qu'en est-il du côté des pratiques des architectes et des urbanistes ?

Comment ont-elles évolué ?

C'est davantage un «chapelet de prises de conscience» qu'une «révélation soudaine» de la criticité et de la multiplicité des crises environnementales. Chez les architectes et les urbanistes, l'histoire récente retient un bon nombre de pionniers. Entre les années 1950 et 1970, de la publication du *Printemps silencieux* de Rachel Carson au roman *Ecotopia* d'Ernest Callenbach, des architectes avaient amorcé d'autres pratiques «on the wild side»: Steve Baer dans l'Ouest américain avec ses zones (nouvelle forme de dôme, ndlr), la rédaction collective du «Whole Earth Catalogue», ce manuel «do it yourself» en anticipation des crises à venir. Dans son *Go West!*, l'architecte et historienne de l'art Caroline Maniaque raconte bien cette histoire de la contre-culture.

Pour simplifier, malgré cette épopée, l'«architecture mainstream» s'est mise dans la roue du contre-choc pétrolier des années 1980, et a vu déferler étalemment urbain, quartiers de tours, gigantisme, jusqu'au bling-bling architectural. À savoir, une architecture et un urbanisme sans limites, dans leur extension spatiale, comme leur consumma-

tion de ressources. À la fin des années 1980, suite au rapport Brundtland inventant le «développement durable», l'introduction du HQE (la certification Haute qualité environnementale) a engendré quelques avancées au tournant des années 2000, avec parfois une approche trop technique dans la façon de faire projet, avec son jargon, ses référentiels, son catéchisme technique, ne permettant pas une adhésion complète de l'ensemble des acteurs. Il est certain que le mouvement s'est accéléré avec l'Accord de Paris de 2015, l'ambition collective du «net zero» à horizon 2050, traduite maintenant par une «pesée carbone» de certains projets et des stratégies urbaines (comme «Paris change d'ère» ou nos travaux chez AREP comme pour «Luxembourg en transition»). Il y a encore beaucoup de pédagogie à faire, mais ce «déploiement carbone» progresse.

Autre brique encore à cette prise de conscience: l'adaptation amplifiée par le constat de la vitesse du réchauffement climatique et des effets majeurs d'un monde qui n'est «qu'à» +1.2°C depuis 2020. Nous n'en sommes qu'au balbutiement d'une prise en compte systémique de ces enjeux, malgré le *buzzword* de la résilience... Et pour finir, l'effondrement de la biodiversité. Au-delà de cette prise de conscience effrayante, trop peu de confrères s'en saisissent et pourraient par exemple s'inspirer du très beau travail de recherche et de projets de l'agence Chartier-Dalix.

Est-il possible de moderniser tous nos bâtiments français

anciens pour qu'ils absorbent les enjeux post-carbone, sans perdre une partie de notre patrimoine ?

Je crois d'abord que l'idée du patrimoine n'est pas celle de l'«ancien plongé dans le formol», d'une perfection figée pour la nuit des temps. Le déjà-là est très rarement dans son jus originel. Le patrimoine que nous connaissons a déjà subi une multitude de transformations; les grandes gares de la fin du XIX^e ont subi par exemple une grande diversité d'évolution afin de s'adapter aux usages.

Comme en peinture, l'architecture se bonifie souvent avec le repentir. Et puis comme disait l'architecte Auguste Perret, «l'architecture, c'est ce qui fait de belles ruines». Donc il faut aussi laisser faire la patine du temps, saluer les qualités émotionnelles et esthétiques de l'entropie, comme pour le bon vin! Il est vrai que le rythme s'accélère: avec l'injonction post-carbone, le patrimoine est soumis à un stress de mutation particulier. Comme dans l'histoire naturelle, le stock construit est sujet à une tension colossale, j'appelle ça «l'adaptation esthétique». Sur le volet atténuation (et plus généralement de la rénovation thermique), cela mérite évidemment du discernement, du cas par cas, selon les usages, les climats... Je milite dans le débat public pour un nouveau regard sur les toits, de leur nécessaire mue, et tout particulièrement pour davantage protéger les habitants et les villes des risques caniculaires.

Il ne s'agit de ripoliner tout en blanc comme dans un village grec, mais de faire évoluer subtilement l'albédo moyen de nos toitures

« Ces dernières années, une multitude de signaux positifs ont émergé, en faveur de la sobriété et de la réparation post-carbone. »

anciennes. Cette délicatesse, ce soin réclame évidemment du temps pour convaincre, étudier, construire avec les bons corps de métiers et donc des moyens plus élevés qu'une approche générique, et parfois brutale, d'une isolation par l'extérieur des colombages alsaciens par exemple.

Flambée du prix des matériaux et des terrains et hausse des taux d'intérêt obligent, la construction de maisons individuelles aurait reculé d'un tiers en 2022, s'inquiétait ce printemps 2023 la Fédération française du bâtiment.

Pour réduire l'artificialisation des sols, faut-il interdire les maisons individuelles, ou plutôt mettre un terme à la construction neuve et se concentrer sur la rénovation ?

À titre personnel, je serais en faveur d'un tel moratoire, mais c'est sans doute une réponse facile d'un habitant parisien... Il y a d'abord une pédagogie collective à amplifier. Je pense au documentaire diffusé il y a quelques mois sur France 5, «Le rêve pavillonnaire, les dessous d'un modèle» démontant la dynamique à l'œuvre depuis les années 1950, illustrant le cauchemar des occupants et la «prison mobilière» de ces lieux. Cette décolonisation des imaginaires, c'est celle aussi de l'hubris des architectes et des maîtres d'ouvrage, de futurs propriétaires souhaitant laisser leur marque, construire «leur» maison pour aménager «leur» jardin...

Alors que certains continuent de vouloir faire tourner la toupie à béton et prétexter le manque de logement, je les invite à (re)lire *La ville stationnaire* de Philippe Bihouix, Sophie Jeantet et Clémence de Selva qui rappelle en quelques pages très efficaces le gisement de la sous-occupation des logements. Et pour revenir à cette idée de

l'interdiction, nul doute qu'elle serait aisément détournée, en prétextant la création de deux logements dans une maison unique. Je pousserais davantage en faveur d'un crédit d'impôt incitant les propriétaires fonciers, publics et privés, à la désartificialisation.

Quels leviers seraient nécessaires pour que nos habitudes et nos aspirations en termes de logement et d'architecture, rejoignent les enjeux environnementaux et sociaux ?

Cela passe d'abord par la sobriété et l'intensité des usages. Dans un article publié sur le site *The Conversation*, «Petits pays renouvelables», je pouvais à l'innovation fiscale, avec un principe de bonus-malus récompensant (ou non) les emprises résidentielles individuelles. Cette «force de rappel» permettrait d'utiliser moins de ressources, moins d'énergie, moins d'émissions et hiérarchiserait aussi les priorités de transformation post-carbone vers les lieux et les espaces les plus intensément utilisés.

Dans le champ politique et des luttes, je constate aussi que les mouvements qui luttaient contre le nucléaire, contre la chasse à la baleine, etc. des années 1970-1980, se portent aujourd'hui davantage sur des luttes ayant trait à l'usage et au mode d'occupation des sols (les ZAD par exemple), par le blocage des cimenteries (Extinction Rebellion), ou encore Dernière rénovation, avec des actions radicales visant à alerter sur l'urgence de mue du bâti. L'architecture et l'urbanisme n'ont jamais été autant politiques. Et dans un registre plus opérationnel, je pense aussi au travail d'acculturation et de pédagogie produit par le récent plaidoyer de l'Ordre des architectes. Notons enfin, l'initiative du ministère de la Culture (programme

RESEDA), palmarès national récompensant les projets sobres et vertueux des étudiants en architecture.

Selon vous, les urbanistes, les architectes et autres acteurs du bâtiment et de la construction, sauront-ils être moteurs d'une sorte de sobriété architecturale ?

De gré ou de force, ils le seront... C'est la transposition des limites dans la discipline architecturale. Comme les hydrocarbures, l'architecture connaîtra aussi son «pic». Beaucoup de confrères y sont très bien préparés. Je pense par exemple à la très belle interview de Philippe Prost dans *Le Moniteur*¹. Les règlements mutent également, Paris vante son futur PLU bioclimatique comme un PLU de transformation et non de construction.

Ces dernières années, une multitude de signaux positifs ont émergé, en faveur de la sobriété et de la réparation post-carbone: les Pritzker à Lacaton et Vassal, à Kéré... Certes, il y a encore quelques soubresauts de la Modernité avec celui récemment accordé à Chipperfield ou le dernier palmarès de l'Équerre d'Argent, mais le mouvement est en route. En tout cas, l'air du moment est très stimulant, avec beaucoup de confrères explorant une autre modernité, la transformation savante de pierres, de terres, de fibres végétales, de réemploi.

Mais pour amplifier le phénomène, il faut assurément un autre cadre, revoir complètement les modèles économiques. Des honoraires non corrélés au volume de travaux, mais récompensant l'usage et les vertus environnementales et sociales. Nous ébauchons cette transformation du modèle chez AREP, auprès de l'un de nos maîtres d'ouvrage, la SNCF,

par un contrat comprenant par exemple des clauses de bonus-malus sur l'empreinte carbone des projets que nous concevons. Mais pour amplifier et avancer au bon rythme, il faudra assurément un nouveau cadre par l'État (et par l'Europe) pour rendre nos architectures sobres et nos territoires soutenable.

1. Philippe Prost, «Adapter, modifier, on sait faire!», architecte, *Le Moniteur*, 27 janvier 2023



More Sun Spots, Steve Baer, Baer Books, 2012, 382 pages



Ecotopia, Ernest Callenbach, traduit de l'anglais par Brice Matthieussent, Harmonia Mundi Livre, 2018, 304 pages

Regards croisés

Vers une sobriété systémique ?

texte Romane Mugnier

La sobriété, inscrite depuis 2015 à l'article 1 de la loi sur la transition énergétique, exige de maîtriser la demande d'énergie, de diversifier les sources d'approvisionnement, d'augmenter la part d'énergie renouvelable, de préserver la santé humaine et l'environnement, et de mettre en avant un nouveau modèle « socialement inclusif, soutenant le potentiel d'innovation et garant de la compétitivité des entreprises ». Les métropoles et les villes moyennes sont les mieux positionnées pour rendre la sobriété systémique. Et pourtant... Sommes-nous prêts ? Trois réponses pour étendre la réflexion.

Vincent Le Rouzic

Directeur des études à la Fabrique de la cité

Il convient d'articuler quatre niveaux de sobriété : sobriété foncière (éviter l'artificialisation des sols), sobriété de conception architecturale (choix des maté-

riaux, isolation, forme), sobriété d'usage (par exemple : le chauffage à 19 °C), mais aussi sobriété systémique (échelle du territoire). À rebours de certains discours sur les « métropoles barbares » ou « l'urbanocène », les villes moyennes et les métropoles sont bien positionnées pour faire

émerger une sobriété systémique : la densité de ces territoires favorise par exemple la viabilité économique des transports en commun. Concernant la sobriété foncière, cela fait au moins vingt ans qu'elle est à l'agenda des politiques publiques, sans arriver jusqu'à présent à enrayer l'im-

pressionnant phénomène quantitatif d'artificialisation des sols. Dans ce domaine, le gouvernement a pris des dispositions très cohérentes en combinant l'objectif zéro artificialisation nette avec par exemple le programme Action cœur de ville, destiné à revitaliser les centres des villes moyennes. Les logements y sont souvent anciens et plus tout à fait adaptés aux aspirations des Français. Pendant les confinements, un certain nombre de gens se sont sentis très à l'étroit dans leur logement, ce qui a mis en lumière la question de la taille des logements pour l'augmenter dans la construction neuve¹. Le modèle du pavillon des années 1960-1970 avec un grand jardin est derrière nous, mais ça ne veut pas dire qu'il s'agit de la fin de la maison individuelle. 80 % des Français aspirent à vivre dans ce type de logement. C'est une constante depuis quarante ans. Toutefois, les Français sont sensibles à la question de l'artificialisation des sols et prêts à passer aux *tiny gardens*. On est probablement à une époque un peu charnière de réinvention de la maison individuelle.

Lucie Melas

Sociologue, membre du collectif Résonance urbaine

Tous les étés, on a une nouvelle prise de conscience, avec les mégafeux, les inondations, les hausses de température. Cette prise de conscience est très importante chez les habitants, souvent bien plus que chez les politiques et les techniciens. Ils sont moteurs du changement. Dès lors qu'on prend le temps de les interroger, de les intégrer dans les processus de coconstruction, de nouvelles idées émergent pour réduire la dépendance à la voiture, végéta-

liser, limiter l'étalement urbain, améliorer la gestion des déchets, produire de l'énergie renouvelable ou encore faciliter la rénovation énergétique des bâtiments. On est très loin du « bureau des plaintes » comme le pensent beaucoup d'élus. Les habitants se questionnent sur leur habitat : comment imaginer des espaces réversibles, intégrer le travail à la maison, créer des jardins partagés... Il est essentiel de travailler sur des processus de productions collectives, et d'impliquer les acteurs locaux, les élus, les techniciens et les habitants pour bâtir des choses ensemble. L'approche sociologique est souvent minimisée alors qu'elle permet de révéler des problématiques et des logiques d'action parfois invisibles. On ne demande pas aux habitants d'être des architectes ou des urbanistes, mais il faut les écouter. Ils ont une très bonne connaissance du terrain puisqu'ils y vivent.

Natan Leverrier

Chef de projet chez Carbone 4

Pour que les bâtiments soient à la hauteur des objectifs fixés à 2050, il faut que la moyenne de tous les bâtiments existants et ceux nouvellement construits soient proches de l'étiquette B. Il est donc primordial de prendre en compte le critère carbone dès le début du projet et de cesser de le voir comme une contrainte. Je ne peux imaginer que la profession des architectes ne soit pas le fer de lance de ces nouveaux enjeux. Mais ce qu'on constate au quotidien, c'est un manque de connaissance, une faible maîtrise des indicateurs et des missions qui échouent alors aux mieux formés sur ces sujets – souvent les bureaux d'études. Il faudra aussi

sortir des énergies fossiles et se diriger vers du décarboné, une des solutions étant d'exclure le gaz des projets neufs et de le retirer petit à petit de l'existant. La pompe à chaleur serait une alternative mais elle pose de nombreuses questions techniques. Quand il fait très froid, elles peuvent perdre énormément en rendement, et pourraient ne pas chauffer les bâtiments à plus de quinze degrés (voire pas du tout).

Dans un contexte de réchauffement climatique, avec un nombre réduit de jours à moins de zéro degré, serait-on capable d'accepter ces coupures ? La gestion des bâtiments collectifs et privés est aussi à questionner. Les copropriétés capables de lancer des travaux d'ampleur sont rares. Or il va falloir que tous les bâtiments le fassent. Le secteur de la construction étant un des plus gros émetteurs de gaz à effet de serre, les logements privés seront aussi concernés, ils ne pourront plus choisir de faire ce qu'ils veulent. Les politiques publiques d'éradication des passoires thermiques vont dans ce sens, on ne peut désormais plus louer ou augmenter le loyer de ces logements. C'est sans doute insuffisant, mais c'est déjà une forme de contrainte au droit de propriété. Des associations comme Droit au logement ou la Fondation Abbé Pierre avancent ainsi la volonté de développer un droit au logement, qui fonctionne de la même manière qu'une sécurité sociale. Pour une sobriété systémique, on doit passer par une réglementation publique. •

1. Rapport Girometti-Leclercq : référentiel sur la qualité du logement, 2021.

Regards croisés

L'haussmannien pourra-t-il s'adapter ?

texte Romane Mugnier

Parmi les 30 millions de résidences principales que compte le pays, 5,2 millions sont considérées comme des passoires thermiques (classées F ou G). À Paris, près de 200 000 logements sont concernés. Problème: les rénovations de nombreux bâtiments historiques sont complexes et les métropoles peinent à se montrer résilientes. Comment supporter le dérèglement climatique intense, tout en prenant en compte l'accès de plus en plus limité aux énergies fossiles? Une importante réflexion doit être menée.

Olivier Barancy Architecte

Dans la capitale, lorsqu'on souhaite améliorer l'état d'un bâtiment, il y a un conflit entre la Ville de Paris qui vérifie que le projet est conforme au règlement, et les Bâtiments de France, qui s'occupent du patrimoine. Avant 1948, on a des immeubles construits en matériaux traditionnels, c'est-à-

dire en pierre, en brique, en bois. Ils ont une forte inertie thermique et des appartements traversants. En revanche, ils ont des faiblesses au niveau des courettes de ventilation, mais elles sont assez simples à isoler. Il n'est toutefois pas question d'isoler la façade sur rue par l'extérieur.

Entre 1948 et 1974 – en somme, la période des « Trente glorieuses » – c'est très différent. On a des bâti-

ments plus grands, plus hauts, en béton armé, avec de très grandes baies vitrées, sans isolation, construits assez vite et assez mal. Tous ces immeubles peuvent être isolés par l'extérieur, il n'y a pas de blocage de la part des Bâtiments de France. À partir du choc pétrolier de 1973-1974, on commence à mettre en place une réglementation thermique qui se durcit tous les cinq ans. Chaque

bâtiment est donc à étudier au cas par cas. L'architecture raisonnée, pour moi, c'est une architecture basée sur le diagnostic qu'on ne doit plus démolir. On doit entretenir, on doit améliorer. Éventuellement surélever et donc densifier, pas à Paris, mais dans les autres villes. Ainsi, le neuf doit devenir une exception.

Aujourd'hui, on redécouvre la paille, la terre, on revient à des fondamentaux. Les architectes doivent s'intéresser à la manière dont on a construit pendant des années pour être un peu plus humbles, un peu plus lucides face à la crise environnementale. L'ordre des architectes commence à bouger en France, mais il faudrait enseigner le bâti existant dans les écoles d'architecture.

Christine Leconte Architecte et urbaniste, présidente du Conseil national de l'ordre des architectes

On compte environ 5 millions de passoires thermiques en France qu'il faudrait rénover pour amener à un niveau de confort acceptable, été comme hiver, sans trop consommer. Il ne faut surtout pas faire de généralité, nous n'allons pas les rénover toutes de la même manière! Certaines atteindront le niveau BBC rénovation, d'autres peut-être que non, mais l'effort sera fait.

L'essentiel est de baisser globalement nos consommations liées au bâtiment. Aujourd'hui, un architecte doit s'inscrire au sein des attentes du siècle et prendre en compte, dans ces projets, les défis sociétaux (vieillesse de la population, mal-logement...) et environnementaux. On ne peut plus décorrélérer les deux. Cela se traduit par des changements de pratiques: moins démolir, plus

réparer, utiliser des matériaux de circuit court, moins carbonés, réemployer, travailler à des bâtiments mutables, offrir des alternatives à l'étalement urbain, etc. Le modèle de la métropole est-il résilient? Rien n'est moins sûr. Et la métropole n'absorbe même pas le besoin en logement actuel.

Aujourd'hui, il faudrait se poser la question de l'équilibre des territoires en France métropolitaine pour absorber les enjeux post-carbone. De leur coopération. Comment avons-nous envie de vivre ensemble? C'est la vraie question que nous devons nous poser. Peut-être irons-nous jusqu'à dédensifier certains lieux, et retrouver un équilibre plus fin entre toutes les villes françaises. En tout cas, nous devons accentuer le lien avec la nature, développer les mobilités décarbonées en priorité, penser à loger tout le monde décemment. Cela ne peut pas se passer sans une vision nationale.

Sophie Tartière Socio-urbaniste, membre de La Condition urbaine

Les bâtiments haussmanniens, par la densité qu'ils proposent, peuvent répondre en partie aux enjeux post-carbone, à minima en termes d'occupation du sol et de préservation des sols perméables. Néanmoins, cette densité, et cette forte minéralité qu'elle induit, ne répond pas aux îlots de chaleur que connaissent les villes. Les arbres, à ce titre, sont une réponse incontournable, mais ils sont encore trop souvent mal traités, rabattus au rang de « mobilier urbain ».

La période de confinement a montré combien le lien avec l'extérieur, le « dehors », est important. Mais également le lien social. Aussi, les villes ou espaces périurbains

innovent et proposent aujourd'hui de nouveaux modèles, des espaces extérieurs partagés où se retrouver, des espaces intérieurs mutualisés qui permettent de faire des économies, en mesure de concurrencer le modèle de la maison individuelle. Beaucoup de promoteurs et bailleurs modifient aussi leur méthodologie en faisant participer le plus tôt possible les futurs habitants. La métropole est un modèle résilient, mais Paris commence à devenir inaccessible pour les classes moyennes et les ménages avec enfants qui, de fait, se reportent sur la proche banlieue qui tend ainsi à se gentrifier.

Au-delà de l'accessibilité financière, ces banlieues proposent également aujourd'hui des aménités que le centre des métropoles n'est plus en mesure d'apporter: parcs, jardins, espaces solidaires, espaces culturels, événements pour tous, etc. La fracture entre les métropoles et les espaces ruraux est de plus en plus flagrante. On a cru nos villages morts. Pourtant, là aussi, des innovations fleurissent partout et montrent la capacité de ces territoires à se réinventer. Les marchés sont un exemple très facile et fréquent de cette « renaissance » (qui n'est d'ailleurs pas propre aux territoires ruraux). Si certains territoires ont « réussi » leur mutation, c'est souvent au prix de la diversification sociale. Néanmoins, comme le disait récemment le sociologue Renaud Epstein, on ne peut pas dire, comme l'entend Emmanuel Macron, que la politique de la ville et les actions de renouvellement urbain sont un échec. Ces territoires permettent à de nombreux ménages modestes d'avoir un toit et parfois de migrer vers la métropole ou d'autres territoires dès qu'ils en ont les moyens. Ils sont donc indispensables. •

Regards croisés

Doit-on arrêter de construire ?

texte Romane Mugnier

Le secteur du bâtiment représente 43 % des consommations énergétiques annuelles françaises et génère 23 % des émissions de gaz à effet de serre du pays. Avec la loi climat qui impose de diviser par deux l'artificialisation des terres d'ici 2030, une question se pose: devrait-on cesser de construire du neuf, se concentrer sur la rénovation de l'existant, densifier et trouver de nouveaux usages à certains bâtiments? Malgré un consensus autour des enjeux environnementaux, l'ambition d'une réduction drastique de l'urbanisation se heurte à des problématiques techniques, économiques, politiques et sociales.

Cynthia Ghorra-Gobin
 Rédactrice en chef
 de L'Information géographique
 et directrice de recherche
 émérite au CNRS

Zéro artificialisation des sols, c'est un peu irréaliste à brève échéance. Il faut que la construction continue, et ce, tant qu'on n'a pas résolu le problème de la demande sociale. Beaucoup de gens en France ne sont pas logés, et la question des réfugiés commence à devenir dramatique. Dans les grandes villes, les appartements ne sont plus adaptés aux usages contemporains. Les logements ne peuvent plus être aussi grands, il faut changer ces modèles, proposer une mutualisation des espaces comme dans les habitats participatifs.

Je ne suis pas pour l'arrêt total des constructions neuves. Par contre, la fin des maisons individuelles me semble inévitable. Le périurbain doit évoluer vers un minimum de densité. Sans les politiques publiques qui ont favorisé ces logements individuels, on n'aurait pas eu l'étalement urbain. Les réseaux et les routes pour accéder à ces zones périurbaines ont été financés par l'État et les collectivités locales. Désormais, il est plus que nécessaire de penser à l'échelle de l'agglomération, de la métropole, du bassin d'emploi. Malheureusement, les gens au pouvoir défendent le *statu quo*, car c'est beaucoup plus simple que d'imaginer des alternatives. Ils se réfugient derrière une notion de sobriété qui est trop vague. Au niveau de l'énergie, c'est compris, mais on se repose trop sur les comportements individuels en oubliant l'importance de l'engagement collectif. La sobriété est un apprentissage. Et si on souhaite qu'elle soit systémique, il n'y a

pas que la construction qui est concernée, il faut envisager une mobilité douce, d'autres approvisionnements alimentaires, et surtout ne pas se reposer sur les comportements individuels. •

Antoine Picon
 Directeur de recherches
 à l'École des Ponts ParisTech
 et professeur à la Graduate
 School of Design
 de l'université Harvard

En France, l'artificialisation n'est pas si dramatique que ça, contrairement aux légendes urbaines. Effectivement, ça défigure parfois de façon dramatique des territoires, mais on parle là de qualitatif. En terme quantitatif, l'artificialisation n'est pas flagrante. Ne serait-ce que parce que vous avez des zones entières qui entrent en déshérence et dans lesquelles la nature reprend ses droits. Dans un pays comme la France, à croissance démographique plutôt lente, si on ne peut imaginer un moratoire complet, il faut au moins qu'il y ait un ralentissement du rythme des constructions.

Mais mettre fin aux constructions neuves me paraît absolument irréaliste. D'autant qu'avec le réchauffement climatique, on va devoir accueillir des réfugiés par millions dans quelques décennies. Dans une société où tous les Français en général plébiscitent le logement individuel, les élites veulent tous les loger dans du collectif dense. Le moins que l'on puisse dire, c'est qu'il y a une fracture sociale un peu préoccupante. Il faudrait peut-être se demander sous quelles conditions, proposer des logements individuels ou semi-individuels de meilleure qualité, malgré tout un peu plus denses, plutôt que de vouloir absolument radicaliser

à un point qui, de toute façon, rendra la mesure assez vite inopérante parce que les gens vont continuer à miter le territoire. Cependant, il me semble à peu près évident qu'il faut éviter de casser systématiquement les choses pour en reconstruire d'autres et se poser les questions du réemploi. Mais vous imaginez la violence sociale que serait l'interdiction de maisons individuelles? Tant qu'on n'aura pas trouvé des modes d'urbanisation séduisants, on va se heurter à un mur. •



L'Information Géographique,
 Armand Colin
 Revues



La matérialité de l'architecture,
 Antoine Picon,
 Parenthèses,
 2018, 142 pages

122

Lettre à un pote qui s'en fout

textes Bastien Marchand et Donatien Frobert

Ciao Pietro,

J'espère que tu vas bien depuis la Bourgogne. Pas trop eu de bouchons en revenant sur Lyon ? De notre côté, hormis les trajets au wagon bar pour occuper les loulous, rien à signaler. Voici la cagnotte pour l'anniversaire de ma sœur, on pense lui offrir un équipement GPS: depuis que je l'ai initiée, elle ne jure que par le trail ! C'est addictif, cette connexion avec la nature... Au fait, tu vas au mariage de Simon au Japon ?

À tout vite, Claire

Ciao Clara,

Bien rentrés ! C'était vraiment chouette de rencontrer ta petite tribu. Merci pour le lien, bonne idée de cadeaux ! On va au mariage, mais juste cinq jours, pour garder assez de congés cet été, et ça évite à Mina de rentrer crevée avant sa rentrée. C'est express, mais avec mes miles, on se payera des places en business pour dormir pendant le vol. Et toi ?

Bisous, Pierre

Coucou, non, j'ai décliné... Je ne trouve pas responsable de voler à l'autre bout du monde pour si peu de temps. Ça m'aurait fait plaisir, mais malheureusement, ce sera sans nous. Tu fais l'enterrement de vie de garçon, je présume ?

Bises, Claire

C'est dommage, parce que les efforts que tu fais, c'est justement pour te permettre ce genre « d'écarts », non ? Et en classe éco, j'ai lu que ça « pèserait » moins lourd dans ton budget carbone 😊 Et oui, je vais à l'EVG. On est dispersés aux quatre coins du monde, donc ce sera Dubaï. Ski sur les pistes intérieures le matin, puis jet-ski entre les îles artificielles... Le futur haha !

Bises, Pierre

Salut Pierre,

Ah oui, vous y allez fort... Mais je ne comprends pas, c'est bien tes parents qui ont une maison dans le Var, dans les villages alimentés en eau potable par des camions citernes à cause de la sécheresse ? Ça ne te fait pas réfléchir ? Franchement, je ne sais pas comment vous faites pour continuer à vivre en mode YOLO: moi, même un psy ne vient pas à bout de mon éco-anxiété.

Claire

Hello,

Oui, on y va chaque printemps, mais chez eux ça va, on a encore de l'eau. En vrai, il vaut mieux, sinon on ne remplit pas la piscine. Après, Mina est hyper impliquée à l'école avec les gosses: cours sur l'environnement et affiches à la cantine contre le gaspillage, c'est déjà bien de sensibiliser toute une génération !

Moi j'avoue, je me donne encore trois ans et après je deviens écolo, mais j'ai envie de profiter avant qu'il y ait des interdictions. Et puis franchement, tant que les Américains polluent autant, ça ne change rien qu'on s'habille en chanvre recyclé, on n'est pas à un barbecue près.

Bises, Pierre

Pierre, désolée, mais tu raisones à l'envers ! Il faut justement choisir maintenant pour ne pas subir demain... Tu essayes de te donner bonne conscience à travers les actions de Mina — top, certes, mais insuffisantes — pour éviter de te poser trop de questions.

C'est déprimant d'avoir ce genre de discussion, en fait. Avec le tonton complotiste, j'y suis habituée, mais avec des amis de mon âge, conscients des problèmes et des solutions... Moi, je consomme local, je dois expliquer à mes enfants pourquoi on ne va plus au zoo, le futur me déprime, et en plus je suis la rabat-joie de service ? Épuisant.

Claire

Claire,

OK, tu fais tout ça. Mais combien de fois tu as pris l'avion quand tu étais étudiante ? Et hum, les rockeurs dont tu chins les vinyles, pour leurs tournées, ils avaient leur propre Boeing... avec une cheminée dedans ! Woodstock, pareil, tes hippies ont surtout saccagé des champs et fait tourner des groupes électrogènes pendant trois jours pour que des gamins trippent en gobant des produits chimiques ! Si c'est pas ironique ? C'était une autre époque, mais tu perpétues la tradition en faisant les festivals chaque année, non ? Je te taquine, mais autre chose: que pèse mon EVG un peu lointain à côté de ton appartement en plein Paris que tu loues à l'année à des touristes du bout du monde, tout ça pour une épargne que ta banque investit sûrement dans des pipelines ?

Pierre

Hé bien, ça balance ! OK, comme je te connais, je décèle un peu de mauvaise foi dans ton message. Bien sûr, je ne suis pas parfaite (je suis à 6 tonnes en vrai). J'ai bien conscience qu'on vit sur un patrimoine bâti, culturel, déjà-là et construit avec des méthodes pas toujours recommandables... Mais la seule solution, c'est de s'améliorer et de faire sa part. Bon, ce qui me rassure c'est que tu m'as l'air très calé sur le sujet, je retrouve le roi de la punchline ! On essaie de se croiser bientôt pour en discuter autour d'un verre ?

Avec plaisir ! Dans un coin sympa, promis, je trouverai une microbrasserie locavore ou on peut écouter Jefferson Airplane en 33 tours 😊

Pierre

Sabine Barles

« Le recyclage tel qu'il existe est plutôt du sous-cyclage »

propos recueillis par Christelle Gilabert

Moins regardés et moins discutés que leurs équivalents énergétiques ou alimentaires, quelle place occupent les matériaux de construction dans le fonctionnement des villes ? C'est la question que l'on a voulu poser à Sabine Barles, professeure d'urbanisme et d'aménagement à l'université Paris-I (Panthéon-Sorbonne) et ingénieure en génie civil, spécialisée dans l'étude du « métabolisme urbain ». Un concept à travers lequel elle analyse les flux d'énergie et de matière générés par les territoires urbains.



Le métabolisme urbain est un moyen de mesure de la comptabilité des flux d'énergies et de matières nécessaires au fonctionnement d'un territoire

En quoi le concept de « métabolisme urbain » permet-il d'apporter un éclairage différent dans notre appréhension de la matérialité des villes ?

S.B. Le métabolisme urbain permet d'avoir une approche systématique des circulations d'énergie et de matière, en connectant à la fois ce qui entre et ce qui en sort. C'est très important. Pendant longtemps, les recherches et politiques dédiées à l'environnement

urbain se sont essentiellement concentrées sur les matières rejetées par la ville sans jamais les mettre en lien avec celles qui ont été importées, mobilisées et consommées sur le territoire. Avec le métabolisme, il est possible d'articuler l'ensemble pour obtenir une vision globale des interactions entre sociétés humaines, villes et biosphère. Et de mieux appréhender les interconnexions entre les villes et leurs *hinterlands*, c'est-à-dire les

territoires qui les approvisionnent ou reçoivent leurs rejets. Par essence, le métabolisme urbain est en partie externalisé. Et du fait de la mondialisation, l'impact écologique d'une ville se situe bien plus à l'extérieur qu'à l'intérieur de son périmètre. C'est d'autant plus vrai pour celles qui sont implantées dans les « vieux » pays développés fortement désindustrialisés. Les villes exportent leur insoutenabilité. Le métabolisme nous donne cette lecture

spatialisée pour pouvoir situer où et comment se passent les choses.

Dans votre livre *Métabolisme et Métropole* (Popsu, 2021), vous écrivez que les matériaux de construction sont la «*matière principale de la ville*». Qu'entendez-vous par là ?

Les matériaux de construction représentent la principale source de consommation matérielle – sur le plan des ressources naturelles. Lorsque l'on considère la consommation annuelle d'une ville, les matériaux de construction dominent le tableau. C'est le cas non seulement à l'échelle

des villes mais également à l'échelle planétaire. Ils représentent la moitié de la consommation totale de ressources, loin devant les autres minéraux, la biomasse et les combustibles fossiles. À l'échelle urbaine, c'est tout aussi dominant bien que plus variable.

Pour les territoires matures, comme l'agglomération parisienne, qui sont déjà très équipés en infrastructures, en réseaux et en voiries, c'est environ 2 à 3 tonnes par habitant par an. Dans d'autres, cela peut aller de 8 à 12 tonnes par habitant par an comme les départements de l'Aube ou de

l'Ariège. Une proportion d'autant plus importante qu'il y a étalement urbain. Ensuite, les matériaux de construction pèsent considérablement en termes de flux, mais également de stocks. Actuellement, le stock de matériaux de construction sur Terre est même plus élevé que le stock de biomasse. Cela donne la mesure de ce qu'est la transformation du monde par les humains!

Quels sont les principaux risques auxquels les métropoles s'exposent dans la gestion de ces matériaux ?

« Les matériaux de construction représentent la principale source de consommation matérielle – sur le plan des ressources naturelles. »

Le premier risque concerne l'épuisement des ressources, même si ce n'est pas évident de prime abord. On a cette image de gisements qui seraient inépuisables, on pense que «*du sable et des pierres, on en trouve partout*». Or, les territoires urbains ne sont pas du tout autonomes et les gisements sont de plus en plus difficiles d'accès. On oublie une contrainte majeure qui est celle du transport. Ce sont des matières pondéreuses difficiles à transporter sur des milliers de kilomètres. Sans compter que toute extraction de matériaux de construction a des impacts environnementaux considérables. Cela conduit à des situations aberrantes sur le plan des coûts, de la logistique et de la destruction des milieux.

C'est peu questionné, malheureusement. On maintient une posture correctrice avec des renaturations de carrières, du réemploi de terres excavées, mais c'est un domaine où l'économie de matière n'est quasiment pas abordée. Un autre immense problème sur lequel nous n'avons pas de réponse est la sortie du béton. C'est un piège dans lequel on est tombé, car c'est une matière efficace en apparence. Or, elle consomme énormément d'énergie à la production, à la démolition et au recyclage.

On voit des petits frémissements surgir, sur le plan du changement de matériaux (recyclé, biosourcé), du recyclage, de la construction bas carbone ou de la rénovation énergétique. Mais globalement, on reste dans une activité de construction classique, fondée sur un modèle extractiviste et linéaire, sans aucune perspective de dématérialisation (c'est-à-dire de consommation moindre de matières, ndlr).

Au sujet de la dématérialisation, vous pointez régulièrement

les limites du recyclage. Pourquoi est-ce une solution limitée selon vous ?

Diminuer la pression sur les ressources grâce au recyclage ne peut fonctionner que lorsque l'on est dans des zones à fort renouvellement urbain. Pour recycler, il faut avoir matière à recycler, donc il faut démolir. Ce n'est qu'à partir de là que l'on dispose de sous-produits disponibles. Je n'appelle pas ça de la dématérialisation. Le mieux reste encore de ne pas avoir besoin de démolir ni de recycler en se posant d'autres questions : a-t-on vraiment besoin de nouveaux bâtiments ? Peut-on faire de la reconversion ?

Ensuite, on observe une augmentation du recyclage, mais les statistiques produites sont très biaisées. On compte dans les déchets du BTP ce qui provient de la déconstruction et de l'excavation des terres. Ces déblais représentent une grosse partie des déchets et disposent du plus fort taux de recyclage, essentiellement grâce au paysagement, au comblement de trous ou à la création de bosses. Mais ce n'en est pas vraiment. En dehors de ça, le recyclage tel qu'il existe est plutôt du sous-cyclage. C'est-à-dire que l'on donne une réutilisation à valeur bien moindre que l'usage initial. Comme pour du béton concassé pour des fondations de voiries. Cela évite un peu de prélèvement, mais, pendant ce temps, les bâtiments sont toujours construits avec du neuf.

En quoi agir sur les matériaux de construction peut-il être déterminant pour rendre le métabolisme de la ville beaucoup plus sobre ?

Au-delà du poids énergivore et destructeur de la filière, les matériaux de construction sont le support du métabolisme urbain. Ils l'organisent physiquement, puisqu'ils

sont constitutifs des infrastructures qui acheminent les flux d'énergie et tout le reste. Si les pouvoirs publics ont peu d'influence sur les flux, en revanche, ils en ont sur les infrastructures. Or, depuis le XIX^e siècle, dans l'histoire du développement urbain, les infrastructures ont été généreusement dimensionnées pour permettre un écoulement tout aussi généreux des flux dans toutes les directions, l'eau, l'énergie, les voitures... On a fait des routes plus larges, avec plus de files de circulations, des tuyaux d'eau plus gros pour que les gens puissent consommer autant qu'ils en avaient envie, etc. On a répondu, voire suscité la demande en élargissant l'offre. Une façon de réduire les flux est donc de repenser leur acheminement par les infrastructures. C'est un puissant moyen de réorganisation du métabolisme pour le rendre plus sobre, matériellement, énergétiquement et spatialement. Et également de tendre vers plus de circularité interterritoriale. Reconfigurer les infrastructures, c'est reconfigurer les flux. •



Métabolisme et métropole : La métropole lilloise, entre mondialisation et inter-territorialité, Marc Dumont et Sabine Barles, Éditions Autrement, 2021, 144 pages

Pour aller plus loin



Réparons la ville!
Christine Leconte et Sylvain Grisot, Éditions Apogée, 2022, 90 pages
Dans ce livre, les auteurs sont optimistes: puisque l'essentiel de la ville de 2050 est déjà là, il est temps d'en assumer l'héritage et d'engager sa transformation. Comment faire ? En réparant la ville pour la rendre adaptable à nos envies et besoins. En bâtissant une ville qui donne envie d'y vivre.



Paris face au changement climatique :
Les clés de l'adaptation climatique
Franck Lirzin, Éditions de l'Aube, 2022, 179 pages
Les villes sont en première ligne des bouleversements causés par le changement climatique, à la fois responsables et victimes. Mais sont-elles condamnées? Non. En prenant l'exemple de Paris, cet essai montre que les solutions existent, que les villes peuvent s'adapter et devenir des métropoles écologiques et bioclimatiques.



Plaidoyer contre l'urbanisme hors-sol et pour une architecture raisonnée
Olivier Barancy, Éditions Agone, 2022, 192 pages
L'architecte Olivier Barancy dénonce ce qu'il considère comme des simulacres de solutions urbanistiques, et propose des pistes pour sauvegarder la viabilité des villes.



Atlas mondial des matières premières : Incertitudes et défis
Bernadette Mérenne-Schoumaker, Éditions Autrement, 2020, 96 pages
Grands métaux industriels, hydrocarbures, métaux rares, produits agricoles, bois, eau douce... Comment mettre en place une économie des matières premières réellement durable et solidaire dans un contexte d'épuisement des ressources? Un ouvrage riche d'une centaine de cartes et d'infographies pour nourrir cette réflexion.



La bougeotte, nouveau mal du siècle? : Transports et liberté
Laurent Castaignède, Éditions Ecosociété, 2021, 166 pages
L'hypermobilité s'est répandue à l'ensemble des territoires et classes sociales grâce à la prolifération des transports motorisés. Mais cette bougeotte n'est pas sans conséquences. L'auteur en décrit les symptômes avant d'en retracer les origines, analyse ses principaux vecteurs et explore ses possibles remèdes.

Au fond de la mine,
LSD, La Série Documentaire, une série documentaire de Johanna Bedeau, réalisée par Marie-Laure Ciboulet, France Culture, mars 2023

La maison individuelle - Le rêve d'un «chez soi»,
un documentaire d'Ulrike Brincker, Arte, 2022

Le sable : enquête sur une disparition,
un documentaire de Denis Delestrac, Arte, 2013

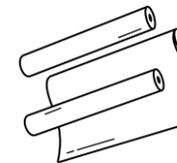
mineralinfo.fr
Le portail français des ressources minérales non énergétiques.

systext.org
Le site de l'association SystExt, une mine d'informations sur les systèmes extractifs, en particulier miniers, et leurs impacts humains, sanitaires, sociaux et environnementaux.

Énergies légères
Exposition au Pavillon de l'Arsenal, automne 2023
(commissariat: Raphaël Ménard).

Prière de toucher! L'Art et la Matière
Musée des Beaux-Arts de Bordeaux, jusqu'au 7 janvier 2024
L'exposition offre une découverte sensible des matériaux de la sculpture de l'Antiquité jusqu'à l'abstraction du xx^e siècle pour apprendre à toucher la matière comme on apprend à la regarder, en immersion au cœur des œuvres.

Secrets de la Terre
Musée des Confluences de Lyon, jusqu'au 31 décembre 2024
L'exposition met en évidence les propriétés physiques et chimiques des minéraux et explore leurs utilisations depuis la Préhistoire, tout en interrogeant leur raréfaction.



LE PAPIER

Freelife Cento Extra White Recycled
Papier 100 % recyclé et labellisé FSC®
Recyclé: provient de forêts gérées durablement selon une dizaine de critères environnementaux, économiques et sociaux.
Fabricant: Fedrigoni, usine localisée à Varone en Italie.

Le papier est composé de 2 types de fibres :

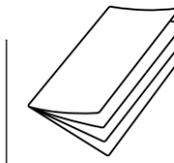
60 %

de pure cellulose (fibres «pre-consumer»)
issues du tri industriel
Les fibres sont issues de la récupération d'anciens papiers auprès d'imprimeries installées à proximité des usines Fedrigoni et de leurs propres déchets de production.

40 %

de fibres PCW (post-consumer waste)
issues du tri sélectif fait par les consommateurs
L'usine localisée à Château-Thierry (Aisne, 02) récupère des papiers triés par des foyers situés dans un rayon de 150 km autour du site. Ces fibres sont désencrées pour donner une nouvelle pâte à papier blanche: elles sont lavées dans un bain d'eau, de soude et de savon, avant d'être égouttées puis compressées et séchées.

Grammage papier:
Couverture: 350 g/m²
Pages internes: 120 g/m²



LA FABRICATION

POST est imprimé par Média Graphic, Scop (société coopérative ouvrière de production) située à Rennes.

Média Graphic est labellisée Imprim'vert (mise en place d'actions concrètes permettant de réduire les impacts de son activité sur l'environnement).

2 500

exemplaires imprimés

Composition d'un exemplaire :

Couverture:
1 cahier de 4 pages

Intérieur:
8 cahiers de 16 pages

Format des feuilles utilisées:
Couverture: 72 x 102 cm
Pages internes: 64 x 88 cm

Nombre de feuilles nécessaires pour 2 500 exemplaires :

Couverture:
1 600 soit 411 kilos

Cahiers intérieurs:
24 250 soit 1 640 kilos

Gâche papier :

100 à 300

feuilles par cahier en moyenne

Pourquoi de la gâche?
Pour imprimer les cahiers et obtenir le bon rendu colorimétrique pour chacun d'eux, on procède à un calage machine permettant de faire les ajustements nécessaires. Ces calages sont des sortes de tests d'impression qui nécessitent de «gâcher» quelques feuilles jusqu'à obtenir le rendu souhaité pour chaque cahier.



LES ENCRES

Média Graphic utilise des encres à base d'huile végétale et la technologie LED-uV qui permettent:
• une moindre consommation d'énergie;
• une réduction de la gâche papier grâce au séchage rapide (la feuille sort directement sèche, le temps de calage est réduit).



LA LIVRAISON

Distance entre le papetier (Varone) et l'imprimerie (Rennes):

1 300 km

Distance entre l'imprimerie (Rennes) et le point de livraison principal (Paris):

360 km

Poids d'un exemplaire:
493,72 g

Intervenants et contributeurs

Remerciements à celles et ceux qui ont contribué au second numéro de la revue POST, en particulier :

AREP

Raphaël Barry
Philippe Bihouix
Marie Boe
Lucas Bohnenkamp
Sandrine Carré
Laurent Chhim
Amandine Croutsche
Elise Dageons
Bachir Daoud-Bricki
Paul De Greslan
Morgane Delarc
Antonin Desplanques
Capucine-Marin
Dubroca-Voisin
Alix Estique
Donatien Frobert
Amélie-Maud Gonsot
Bertrand Goyard
Rémi Guers
Louise Jammet
Pascaline Joigny
Fabienne Labeille
Blandine Laplace
Nils Le Bot
Jean-Baptiste Lefeuve
Mathilde Lépine
Anaïs Lo Re
Lucie Marin
Raphaël Ménard
Sarah Moretti
Melina Mulin
Pierre Navaro-Auburtin
Isabelle Niess
Naelle Normand-Groult
Johan Papelard
Jérémy Pelletier
Félix Pouchain
Grégoire Robida
Laurence Saquer
Lora Saint-Omer
Jack Suddaby
Adeline Tavet
Sabine Thomas
Sophie Untersinger
Andrea Zanon

Contributeurs

externes et experts

Fredrik Albritton Jonsson
Professeur associé d'histoire,
Université de Chicago

Olivier Barancy
Architecte spécialiste
des immeubles anciens

Ugo Bardi
Chimiste, enseignant-chercheur au sein
du Département de Science
de la Terre de l'Université
de Florence

Sabine Barles
Urbaniste-prospectiviste,
ingénieure en génie civil,
enseignante-chercheuse
à l'Université Paris 1
Panthéon-Sorbonne
et membre de l'UMR
Géographie-Cités

Laurent Castaignède
Ingénieur, conférencier,
conseiller en impact
environnemental,
fondateur du bureau d'études
BCO2 Ingénierie

Julian Carrey
Physicien, enseignant-chercheur à l'INSA Toulouse
(Laboratoire de Physique
et Chimie des Nano-Objets),
membre de l'Atelier
d'Écologie Politique

Cynthia Ghorra-Gobin
Géographe, directrice
de recherche au CNRS,
rédactrice en chef
de L'Information
géographique

Christine Leconte
Architecte et urbaniste,
maître de conférence,
Présidente du Conseil national
de l'Ordre des architectes

Vincent Le Rouzic
Docteur en urbanisme,
directeur des études
à la Fabrique de la cité

Nathan Leverrier
Chef de projet Carbone 4,
cabinet de conseil
indépendant spécialisé dans
la stratégie bas-carbone
et l'adaptation au changement
climatique

Alexandre Marciel
Maire adjoint de la ville
de Toulouse, auteur
et conférencier

Lucie Melas
Sociologue urbaniste,
docteure en sociologie
urbaine, sociétaire
de Repérage Urbain
et membre du collectif
Résonance urbaine

Antoine Picon
Professeur d'histoire
de l'architecture,
directeur de recherches à
l'École des Ponts ParisTech
et professeur à la Graduate
School of Design
de l'université Harvard

Cyril Pitrou
Astrophysicien, chargé
de recherches au CNRS,
Institut d'Astrophysique
de Paris

Jean Souviron
Architecte, docteur
en art de bâtir et urbanisme,
ingénieur, maître
de conférences associé
à l'Énsa-PB

Sophie Tartière
Socio-urbaniste,
membre de
La Condition Urbaine

Anna Trespeuch-Berthelot
Maître de conférences
en histoire à l'Université
de Caen Normandie et
chercheuse associée au CHS

Ester van der Voet
Biologiste, conférencière,
chercheuse et éditrice
dans le domaine de l'écologie
industrielle, professeure à
l'université de Leyde au sein
de l'institut des sciences
de l'environnement

Xavier Verne
Directeur Numérique
responsable, SNCF

Helga Weisz
Écologiste industrielle,
climatologue et professeure
d'écologie industrielle
et de changement climatique
à l'Institut des sciences
sociales de l'Université
Humboldt de Berlin, directrice
du FutureLab «Social
Metabolism & Impacts»
au Potsdam Institute for
Climate Impact Research

Carl Wennerlind
Professeur d'histoire
au sein du Barnard
College de l'Université
de Columbia (New York)

POST est une revue qui explore le monde post-carbone, en particulier dans le domaine de l'architecture, de l'urbanisme, de l'ingénierie et du design. Fruit, entre autres, des recherches, réflexions et réalisations menées par AREP, agence pluridisciplinaire et internationale, elle ouvre largement ses pages aux contributions externes d'expérimentateurs, de praticiens, de penseurs et d'experts de nombreuses disciplines. Son ambition est de favoriser les interactions et les dialogues entre tous les acteurs qui tentent de donner à voir et faire advenir un futur soutenable.

19 €
ISBN 978-2-494447-02-8



AREP