

CHABERT ROBOREL DE CLIMENS Aénor
N°16568
Master 2

REDUIRE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION EN S'INSPIRANT DES SYSTEMES DU VIVANT

MEMOIRE DE MASTER
janvier 2022



Séminaire ACTIVITES ET INSTRUMENTATION DE LA CONCEPTION
Mme. Anne TUSCHER - M. François GUENA - M. Joachim SILVESTRE

REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier mes directeurs de mémoire : Mme Anne Tüscher, M. Joaquim Silvestre et M. François Guena pour leur encadrement, leurs conseils, et leur temps passé.

Je souhaite également remercier Natascha Heil pour avoir partagé son savoir sur le biomimétisme.

Je remercie enfin toutes les personnes avec qui j'ai eu l'occasion de débattre sur mes recherches, leurs avis et leurs réflexions m'ont aidé à construire mon propos.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	6
1. Les matériaux de construction actuels face aux enjeux environnementaux ...	9
1.1.-Le contexte environnemental actuel	9
Les impacts environnementaux	9
La raréfaction des ressources	11
Les stratégies développées.....	12
1.2. Définition de l'énergie grise et de l'ACV	15
L'énergie grise et l'analyse du cycle de vie	15
Axe de recherche : l'impact des matériaux sur l'environnement et les outils pour le calculer.....	15
1.3. Etude de cas : le bloc de béton	20
2. S'inspirer du vivant : le biomimétisme.....	29
2.1. Une approche biomimétique pour les matériaux	29
L'origine du biomimétisme	29
Définition du biomimétisme.....	29
Enjeux et principes d'application	32
2.2. Etude de cas	33
La moule.....	33
La coquille de l'ormeau	35

2.3. Comparaison des propriétés des matériaux.....	38
2.4. D'un cycle de vie linéaire a une économie circulaire	39
Le cycle non viable de l'écologie industrielle, producteur de déchets	39
L'économie circulaire	40
La démarche « cradle to cradle »	41
3. La réduction de l'impact environnemental des matériaux.....	45
3.1. Les pistes d'optimisation du béton.....	45
Appliquer les principes d'économie circulaire	46
Ciment inspiré du processus de biominéralisation	51
Augmentation de la durabilité grâce au béton auto-cicatrisant.....	55
3.2. Des matériaux innovants s'inspirant directement du vivant.....	58
Les briques Biomason.....	58
Les briques de mycélium.....	60
« Dune », le projet de Magnus Larsson.....	63
CONCLUSION.....	65
TABLE DES FIGURES ET LEUR SOURCE	67
BIBLIOGRAPHIE	71

INTRODUCTION

Les années 70 voient apparaître des nouvelles préoccupations architecturales, comme celle d'une architecture respectueuse de l'environnement. En quelques décennies, l'habitat auto-construit, bon marché, agréable et autonome s'est transformé en habitat importé, cher, déqualifiant et énergivore.

Avant la révolution industrielle, l'importation des matériaux se faisait localement. Mais les circuits courts ont été remplacés par des échanges internationaux, longs mais bons marchés.

Face aux nouveaux enjeux environnementaux, l'architecte doit pouvoir concevoir en minimisant l'utilisation d'énergie et l'impact environnemental des constructions, notamment en utilisant les bons matériaux, au bon endroit.

L'énergie nécessaire au bon fonctionnement d'un bâtiment n'est, à mes yeux, pas la préoccupation environnementale première. Celle-ci évolue tous les ans, contrairement à l'empreinte carbone des matériaux.

Ces derniers, hormis s'ils sont biosourcés, émettent une empreinte carbone à l'année 0, qui évolue peu à l'année X. L'émission est donc interchangeable, contrairement aux systèmes énergétiques qui peuvent évoluer, tout comme notre comportement. Les générations futures ne pourront pas modifier la matière installée, mais au mieux prolonger leur durée de vie.

L'importance consacrée dans ce mémoire est donc celle de la matière, immobilisée à vie.

Pour étudier l'impact de la matière sur l'environnement, la méthode de l'analyse du cycle de vie de la matière est multicritère, et permet de questionner autant la chimie des matériaux que leur provenance géographique. Les étapes d'extraction, de transport, de transformation et d'assemblage ont des degrés de complexité différents. Cette approche holistique est intéressante car elle ne s'arrête pas à l'analyse mais contribue à la diminution des impacts environnementaux d'un matériau ou d'un système. L'enjeu de cette analyse est de réduire la consommation de ressources naturelles, d'eau, de limiter la pollution atmosphérique et la quantité de déchets.

Les matériaux utilisés dans les constructions actuelles sont des résultats d'opérations effectuées

sur la matière naturelle, issue des règnes minéral, végétal, et animal. Les matériaux comme le bois ou la pierre restent très proches de la matière première, et leur impact environnemental semble au premier abord moins important que celle du béton.

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons uniquement sur l'analyse du béton, matériau le plus utilisé dans la construction aujourd'hui.

Après avoir analysé les étapes de son cycle de vie, nous essaierons de comprendre pourquoi ce matériau n'est pas environnementalement viable dans le futur et comment pouvons-nous améliorer certaines étapes de son cycle de vie, pour le rendre plus respectueux de l'environnement, en s'inspirant des systèmes développés dans la nature.

Le biomimétisme est une nouvelle approche qui se développe dans plusieurs domaines. Elle nous questionne sur notre pratique de l'architecture.

« Ce n'est pas le matériau qui fait un bâtiment vertueux, mais plutôt la manière raisonnée dont il est employé »

Pascal Gontier.¹

L'objectif est de questionner l'utilisation du matériau, la manière dont il est employé et comment il disparaît.

L'ancienne et populaire maxime d'Antoine Lavoisier « rien ne perd, rien ne se crée, tout se transforme » résonne au niveau biomimétique.

« Construire, c'est avant tout détruire, sur une portion de nature, toute trace de vie, pour y déposer dans un ordre géométrique précis des matériaux morts. Le rôle primordial de l'architecte est donc de combiner savamment les différentes matières inertes qu'il aura choisi de juxtaposer. Les arbres abattus ne seront utilisés que s'ils ont été réduits au préalable à l'état de parallépipède rectangle et traités chimiquement contre toute possibilité de perpétuer leur cycle de vie. Les matériaux naturels tels que la terre, le sable, la chaux seront cuits à très haute

¹ GESLI N F., PLOYE F., d'ERCEVILLE H., MAURY C., « Analyse du cycle de vie ». *Les cahiers techniques du bâtiment*, numéro 349, Mars 2016

température pour les mêmes raisons et deviendront brique, verre, béton inerte. »²

Luc Schuiten

Depuis quelques années, des matériaux « vivants » se développent et s'inspirent directement ou indirectement des systèmes du vivant. Ces matériaux, toujours au stade de prototype, pourraient à terme remplacer certains ouvrages faits de superpositions de matières inertes.

La question de recherche est la suivante :

Comment peut-on diminuer l'impact environnemental des matériaux de construction en s'inspirant des systèmes dans la nature ?

Pour répondre à cette question, ma réflexion s'appuie sur des documents récents (moins d'une vingtaine d'années), notamment des rapports de synthèse. Une partie d'entre eux ont été publiés par des institutions françaises, comme le CEEBIOS (Centre d'excellence en biomimétisme), l'ADEME (Agence de la Transition Ecologique) ou le CERIB (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton).

Les problématiques abordées dans ces publications résonnent avec les idées de start-ups qui s'approprient des stratégies de la nature, telles que l'utilisation de ressources locales, mutualisées, compatibles avec le vivant ou biodégradables. En m'intéressant à ces nouveaux matériaux, j'ai dû ouvrir mes recherches à l'internationale, car une grande partie des laboratoires de recherches / brevets déposés traitant ces sujets viennent des Etats-Unis.

La croisée de ces données permet de construire les cycles de vie de matériaux et de déterminer l'origine de leurs impacts environnementaux.

Mon mémoire se divisera en trois parties .

La première partie du mémoire définit le contexte environnemental actuel, puis l'énergie grise, étroitement lié à l'analyse du cycle de vie d'un matériau (ACV), ou d'un bâtiment.

Mon axe de recherche se concentre sur les impacts environnementaux des matériaux et les outils existants pour les calculer. Je traiterais comme étude de cas le bloc de béton, matériau le plus utilisé dans la construction, pour comprendre chaque étape de son cycle de vie et l'origine de son impact environnemental.

La deuxième partie est consacrée au biomimétisme, et aux applications de cette démarche dans le domaine des matériaux.

Après avoir expliqué ce qu'est une approche biomimétique, ses enjeux et ses principes d'application, je prendrai comme exemple deux matériaux créés par la nature, les coquilles de la moule et de l'ormeau, en étudiant leur cycle de vie, et en les comparant à celui du béton. La dernière sous-partie traitera du passage d'un cycle de vie linéaire à une économie circulaire.

La troisième partie fait l'objet de la réduction des impacts environnementaux des matériaux de construction et de la transformation de leur « cycle de mort », en appliquant les principes mis en place dans la nature. Je me concentrerai d'abord sur les pistes d'optimisation du béton, durant la phase de fabrication, la phase de vie et la phase de fin de vie puis je mettrai en lumière des matériaux en développement depuis quelques années, s'inspirant directement du vivant.

² SCHUITEN L., LOZE P., *Archiborescence*, Editions Mardaga, 2006

1. LES MATERIAUX DE CONSTRUCTION ACTUELS FACE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

1.1. LE CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ACTUEL

Les impacts environnementaux A l'échelle planétaire

L'effet de serre

Depuis les années 80 se pose une réflexion sur l'altération de l'atmosphère de la planète suite à nos activités humaines, sans que l'ampleur soit quantifiée.

« La combustion croissante de carburants fossiles (charbon, gaz et pétrole) doit nécessairement faire croître la quantité de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère ». Cela « renforcera l'effet de serre, entraînant un réchauffement à la surface du globe ».³

Svante Arrhenius, chimiste suédois, 1895

L'effet de serre permet la vie sur terre en piégeant les rayonnements infrarouges permettant de maintenir une température constante de -18°C à +15°C, mais l'effet de serre additionnel, c'est-à-dire son augmentation nocive à cause de l'homme, est un danger. Il y a en effet deux sortes de gaz à effet de serre :

- naturel : la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone
- anthropique : le dioxyde de carbone émis par l'homme, le méthane lié à l'agriculture, les halocarbures liés aux gaz réfrigérants, le protoxyde d'azote, l'ozone.

Ils sont déjà présents dans l'atmosphère mais l'homme vient augmenter leur production.

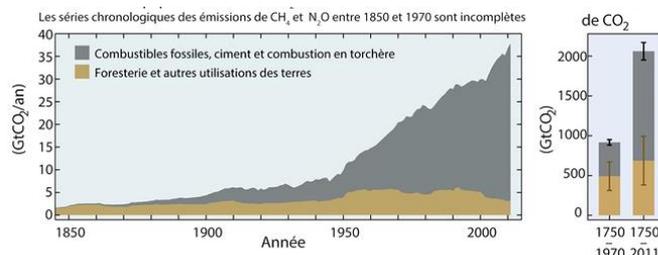


Fig. 1.1.a) Emissions anthropiques mondiales de CO₂.

D'après la figure 1.1. a), cette augmentation presque exponentielle des émissions de CO₂ depuis la révolution industrielle est due à l'utilisation de combustibles fossiles, au ciment, et aux combustions en torchère. La libération de dioxyde de carbone dû à la production du ciment est détaillée dans la troisième partie de ce chapitre.

Entre 1950 et 2000, les émissions de CO₂ ont été multipliées par 4,5⁴

Le CO₂ dégagé lors de l'utilisation de combustibles fossiles est responsable à 55% de l'accroissement de l'effet de serre, les CFC (Chloro Fluoro carbonés) à 25% et le méthane à 15%, le protoxyde d'azote (N₂O), le SF₆ et l'ozone formé expliquent les 5% restants.⁵ Chacun de ses gaz à effet de serre a un pouvoir de réchauffement global (PRG), qui lui est propre.

Le potentiel d'effet de serre additionnel d'un produit sur l'ensemble de son cycle de vie est quantifié par un indicateur, s'exprimant en kilogrammes équivalent dioxyde de carbone.

Il correspond à ce qui est appelé l'« empreinte carbone ».

Cette augmentation a comme conséquence des événements climatiques intenses, et la hausse des températures moyennes annuelles. D'après la figure 1.1 b⁶, la température a augmenté de 0,8°C entre 1850 et 2010.

³ KANDEL R., Le réchauffement climatique : « Que sais-je ? » n°3650, 03/2019, éditeur Presses Universitaires de France.

⁴ World Business Council for Sustainable Development, revue annuelle, 1997

⁵ PEUPORTIER B., *Eco-conception des bâtiments, Bâtir en préservant l'environnement*, Les presses, écoles des mines Paris, avril 2003.

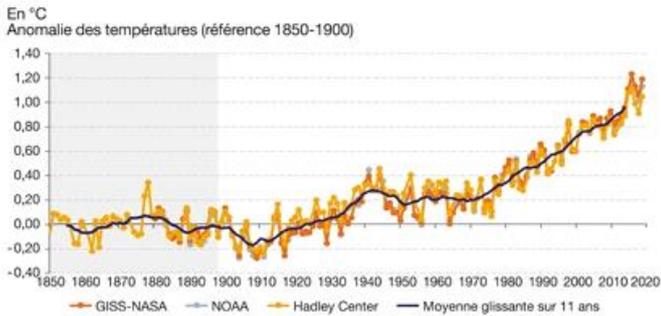


Fig. 1.1.b) Augmentation des températures annuelles depuis 1850.

Un autre phénomène lié est l'augmentation du niveau de la mer (+ 19cm depuis 1900, dont 9 cm depuis 1993.⁷ Les îles et zones côtières sont menacées.

Ce dérèglement climatique est entraîné par une raréfaction de l'ozone stratosphérique, une pollution photochimique, et une acidification de l'air.

La destruction de la couche d'ozone

L'ozone (O₃) est présent sans l'atmosphère terrestre en quantité limitée, avec un maximum de concentration entre 10 et 50 km d'altitude.⁸ Cette molécule filtre la presque totalité des rayons ultraviolets de type B, qui provoquent des atteintes de la peau, des yeux, et du système immunitaire. Elle est formée photo chimiquement dans la stratosphère. Depuis les années 1980 et à chaque printemps, due aux activités humaines, un trou temporaire a été observé au-dessus de l'Antarctique.

La couche d'ozone subit des variations « saisonnières » mais ces dernières se sont amplifiées, dues aux composés azotés, chlorés, ou bromés, induits par certaines pratiques domestiques, industrielles ou agricoles.

Le changement climatique et la destruction de la couche d'ozone sont étroitement liés. Les gaz à effet de serre sont responsables de l'augmentation de la

⁷ CSTB, MOOC RE 2020 « Préparez-vous à la nouvelle réglementation environnementale ». Consulté le 20/12/21.

⁸ MAHIEU E. et al., « La destruction de la couche d'ozone », 2007. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/35015/1/EEW2006-2007_AIR2_mahieu.pdf. Consulté le 23/11/21.

température à la surface de la Terre, qui entraîne un refroidissement de la stratosphère, ce qui favorise la destruction de l'ozone.⁹

Une diminution de 10% de la colonne d'ozone stratosphérique conduirait chez l'homme, au niveau mondial, à :

- une augmentation des cancers de la peau évaluée à 300 000 cas supplémentaires par an ;
- 1,6 à 1,75 millions de nouveaux cas de cataracte chaque année ;
- un possible affaiblissement du système immunitaire des individus.¹⁰

Les rayons UV-B ralentissent également la croissance de certains végétaux (riz, maïs, essences forestières) et affectent les organismes vivants marins.

Enfin, l'augmentation de ces rayons induit des risques de dégradations des constructions et de leurs matériaux.

L'appauvrissement de la couche d'ozone est quantifié par un indicateur en kg CFC-11 eq., le chlorofluorocarbures CFC-11 étant un gaz interdit dangereux pour la couche d'ozone.

L'acidification

Les activités humaines dégagent du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote, qui se transforment en sulfates et en nitrates dans les nuages, et qui retombent avec l'eau de pluie.

L'acidification est l'augmentation de l'acidité d'un sol, d'un cours d'eau ou de l'air en raison des activités humaines. Ce phénomène modifie les équilibres chimiques et biologiques et affecte les écosystèmes.¹¹

Par exemple, ces polluants altèrent la couche de cire protectrice des arbres et lessivent le calcium et le magnésium, présents dans la composition de la chlorophylle. Ils modifient également la composition du sol en détruisant les racelles et lessivant les éléments nutritifs du sol, ce qui atteint la végétation.

L'acidification a également des conséquences sur les océans, en affectant la capacité du plancton océanique à se renouveler. Le plancton est à la base de l'écosystème marin. Il produit de l'oxygène

⁹ Ibid.

¹⁰ Ibid.

¹¹ ActuEnvironnement.com, https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/acidification.php4. Consulté le 12/11/2021.

nécessaire à l'équilibre océanique et atmosphérique. L'acidification des océans affecte également les coraux, qui lors de leur destruction, entraînent avec eux un écosystème de poissons, d'algues, et d'organismes endémiques. Les scientifiques estiment également des conséquences à long terme sur la vie marine.

L'acidification des sols et de l'eau est quantifiable par un indicateur en kg SO₂ eq., le dioxyde de soufre faisant partie des trois substances (avec les oxydes d'azote NO_x et l'ammoniac NH₃) contribuant au phénomène d'acidification.

L'eutrophisation

L'eutrophisation est due à un déséquilibre écologique lié à des apports trop importants en phosphore (y compris sous forme de phosphate PO₄³⁻) et en azote (nitrate NO₃⁻).

En conséquence se développe une biomasse localement trop importante, qui excède les capacités du milieu à la consommer ou à l'exporter, entraînant une dégradation de ce milieu avec une notion de nuisance pour l'Homme.¹²

L'eutrophisation est quantifiable en kg (PO₄)⁻³ eq.

La raréfaction des ressources

A la question du dérèglement climatique s'ajoute celle de la raréfaction des ressources. L'analyse du cycle de vie débute par l'extraction de ressources naturelles.

Les ressources sont classées en trois catégories, selon leur origine et capacité de renouvellement :

- **les ressources minérales et fossiles (abiotiques)**, aussi appelées **non renouvelables** : elles se sont formées pendant des millions voire milliards d'années lors de processus géologiques. Les quantités sont limitées et les stocks diminuent. C'est le cas des combustibles fossiles (charbon, gaz, pétrole), des minéraux (roches) et des minerais (métaux, uranium).¹³

Le pétrole (34%), le charbon (27%) et le gaz naturel (21%) sont aujourd'hui les principales sources d'énergie primaire utilisées dans le monde.¹⁴ La France importe actuellement la totalité du pétrole, du gaz, du charbon et même de l'uranium qu'elle consomme.¹⁵

L'épuisement des ressources naturelles est exprimé en kg équivalent antimoine (kg eq. Sb). Il représente l'extraction de minéraux et de carburants fossiles en fonction des réserves disponibles et de leur consommation actuelle.

L'antimoine est une ressource considérée comme épuisable à l'échelle humaine et a une valeur de 1 par convention. Une valeur supérieure à 1 pour une ressource indique que l'on consomme une ressource plus rare que l'antimoine.

La quantité d'énergies non renouvelables utilisée s'exprime en MJ.

- **les ressources organiques (biotiques)** : elles résultent des mécanismes de la vie et sont d'origine naturelle (forêts, océans) ou du travail des Hommes (agriculture...). Elles sont produites grâce aux sols, à l'eau et à l'énergie du soleil. On les considère comme renouvelables car leurs stocks ne sont limités que par la capacité de la Terre à produire de la matière vivante. Ces derniers dépendent donc des quantités prélevées par l'Homme et du temps de reconstitution.

¹² CAMUS G. « L'eutrophisation », Juin 2014. Consulté le 12/11/21. <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/l-eutrophisation>

¹³ LES CAHIERS DU DEVELOPPEMENT DURABLE, « Des ressources menacées d'épuisement ». Consulté le 13/11/21. <http://les.cahiers-developpement-durable.be/vivre/t1-p1-cha2-ressources-menacees/>.

¹⁴ Agence Internationale de l'Énergie, World Energy Outlook 2009

¹⁵ COMMISSION ENERGIE EELV, « Raréfaction des ressources », Consulté le 12/11/21. <https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/pourquoi/rarefaction-des-ressources/>.

- **les ressources inorganiques** : elles comprennent l'énergie issue du soleil, du vent ou les sols, les eaux, et l'air. La quantité de ces ressources est fixe, mais leurs qualités diminuent suite aux impacts de l'activité humaine.

L'épuisement de ces ressources naturelles engendre une fragmentation et une déstabilisation des écosystèmes, une extinction d'espèces animales et végétales, une contamination des écosystèmes terrestres et aquatiques, et un épuisement des ressources irremplaçables.

A l'inverse, les matières les plus abondantes sont l'oxygène (46%), le silicium (27%), l'aluminium, le fer, le sodium, le potassium, et le magnésium.

Les stratégies développées

Le dérèglement climatique

Deux stratégies peuvent être développées pour lutter contre le réchauffement climatique :

- l'atténuer (politique publique d'atténuation)
 - s'adapter car certains impacts ne pourront pas être évités dans les prochaines décennies.
- Plus on diminue les émissions de gaz à effet de serre, plus les besoins d'adaptations seront facilités par la suite.

Les négociations internationales

Comme le monde la figure 1.1.c), des conventions cadres ont été mises en place depuis 1987. Le CCNUCC, en 1992, a mis en place le principe de précaution, selon lequel les activités qui menacent de causer une atteinte importante ou irréversible peuvent être limitées, voire interdites, même si leurs effets ne sont pas établis avec une certitude scientifique absolue.

Le **protocole de Kyoto**, prolongé en 2012, est le premier à fixer des objectifs de réduction de CO₂ au niveau international.

L'**Accord de Paris** signé lors de la COP21 à Paris annonce comme objectif de limiter le réchauffement climatique à 2°C d'ici 2100, et de tout mettre en œuvre pour un objectif de limitation de réchauffement climatique à 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels. Ces accords engagent les pays signataires, mais n'indiquent pas de moyens concrets.

L'Accord de Paris évoque l'objectif d'« équilibre » entre émissions et absorptions des gaz à effet de serre « au cours de la deuxième moitié du siècle ». La majorité des pays se sont engagés à cette neutralité

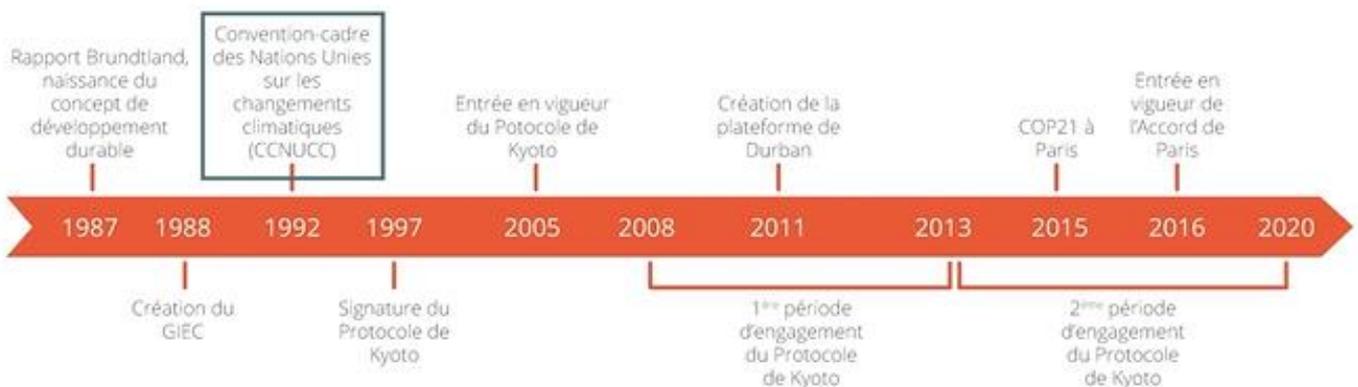


Fig. 1.1. c) Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique

carbone pour 2050 (la France, l’Australie). D’autres pays comme la Chine et la Russie, visent 2060.

La protection de la couche d’ozone

Pour contrer la destruction de la couche d’ozone, la **convention de Vienne** en 1985, le **protocole de Montréal** en 1987 et la **convention de Londres** en 1990 élaborent un calendrier pour éliminer progressivement de la production les substances appauvrissant la couche d’ozone. Par exemple, L’utilisation des CFC en France est interdite depuis 1996. Les HCFC seront interdits à la consommation en 2030.¹⁶

Depuis la mise en œuvre du protocole de Montréal, les émissions planétaires cumulées des principales substances appauvrissant la couche d’ozone ont diminué de plus de 90 % entre 1988 et 2003. C’est un de seuls accords internationaux à avoir eu des résultats probants au niveau international.

En France et à l’échelle du bâtiment

En 2007 se tient le **Grenelle de l’Environnement**, où se rassemblent l’Etat, les collectivités locales, les partenaires sociaux et ONG. Le bâtiment et l’habitat est l’un des 6 secteurs pris en compte. L’objectif finale est la division par quatre des émissions de gaz à effet de serre d’ici 2050. Le bâtiment et les transports représentent 40% du total des émissions ¹⁷. Concernant l’énergie et d’après la figure 1.1.d), le poste résidentiel-tertiaire correspond à 46% de la consommation finale énergétique en France.

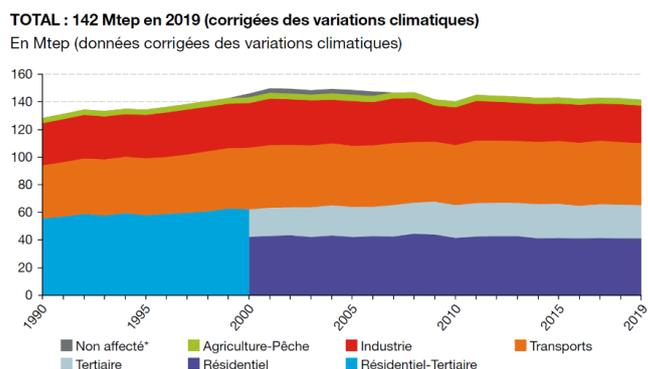


Fig. 1.1.d) Consommation finale énergétique par secteur

Les axes développés sont la réduction de la consommation d’énergie, la prévention des émissions de gaz à effet de serre et la promotion des énergies renouvelables.

La loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) et la loi portant évolution du logement de l’aménagement et du numérique ont introduit des mesures de prise en compte de l’impact du dérèglement climatique des bâtiments.

Pour accélérer la mise en œuvre de l’Accord de Paris, la France a mise en place la **Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC)**, une feuille de route pour conduire la politique d’atténuation au réchauffement climatique, avec comme cap la neutralité carbone des 2050 en France et la réduction de l’impact carbone de chaque habitant.

La neutralité carbone consiste à séquestrer autant de gaz à effet de serre que l’on en émet pour stabiliser leur niveau de concentration dans l’atmosphère et ainsi, limiter l’augmentation de la température globale de la planète en deca de 2 degrés.

¹⁶ PEUPORTIER B., *Eco-conception des bâtiments, Bâtir en préservant l’environnement*, Les presses, écoles des mines Paris, avril 2003.

¹⁷ « Le Grenelle de l’environnement : quels engagements ? » Juillet 2019. Consulté le 30.11.21. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/268585-le-grenelle-de-lenvironnement-quels-engagements>.

En 2018, l’empreinte carbone d’un(e) français(e) s’élevait à 11,2 tonnes CO₂/eq, l’objectif étant d’arriver à 2 tonnes de CO₂/eq.

Pour répondre à ce cadre législatif, en 2018, un groupe d’experts a identifié les différentes pistes pour quantifier les stockages de carbone, dont la méthode de l’ACV dynamique, retenue pour la RE2020 (réglementation française thermique 2020), qui s’inscrit dans un contexte large de politiques internationales. Pour sa mise en place, on bénéficie de l’expérimentation E+C-, lancée volontairement en 2016, où chaque maître d’ouvrage a pu participer. Des exigences de performances supérieures à la RT2012 ont été testées sur un grand nombre de bâtiments, pour adapter les futures exigences RE2020 à la réalité du terrain et à l’aspect économique. Par rapport au label E+C-, s’ajoute une analyse de cycle de vie dynamique. Cette réglementation est donc évolutive. Carbone et énergie grise seront désormais évalués au même titre que polluants et déchets.

D’après la figure 1.1.e) Les émissions d’un bâtiment relèvent de son exploitation (dû à sa consommation d’énergie et sa consommation d’eau) et de sa construction (figure 1.1e)¹⁸. 5% des émissions nationales sont dues à la construction des bâtiments. 1 à 1,5 tonnes est l’émission eq CO₂/m² d’un bâtiment neuf. 50 à 75% de ce poids carbone est lié aux produits de construction et équipements.

Pour résumer, dans la RE 2020, il ne s'agira plus de s'assurer d'une consommation d'énergie, mais également de la prise en compte de l'impact carbone des produits de construction.

La transition énergétique se transforme en transition environnementale.

Elle entrera en vigueur au 1^{er} janvier 2022 pour les bâtiments de logements, d’enseignement et les bureaux. Pour les maisons individuelles et logements collectifs, il y aura très peu de changements jusqu’à 2025 hormis l’adaptation aux nouveaux calculs d’impact carbone du bâtiment.

Les efforts à faire sur la réduction de l’empreinte carbone des constructions apparaîtront dès 2025.



Fig. 1.1 e) Emissions de gaz à effet de serre dans la construction d’un bâtiment

¹⁸ Retour d’expériences issus des ACV réalisées selon la méthode statique E+C-.

1.2. DEFINITION DE L'ENERGIE GRISE ET DE L'ACV

L'énergie grise et l'analyse du cycle de vie

L'énergie grise définit la quantité d'énergie nécessaire pour produire un matériau ou un bien industriel, de sa naissance jusqu'à sa mort. Elle est donc présente à chaque étape du cycle de vie d'un matériau de construction : lors de la conception, de l'extraction des matières premières, du transport, de la transformation des matières premières, de la fabrication du produit fini, de la commercialisation du service, de la mise en œuvre, de l'élimination ou du recyclage.

Le carbone gris est la résultante en émissions de carbone. Est simplement exclue du calcul l'énergie consommée par l'utilisation du produit.

L'énergie grise s'exprime en kWh, unité principalement utilisée pour connaître l'énergie électrique, mais elle peut aussi se référer aux émissions de gaz à effet de serre, en obtenant une valeur correspondant aux émissions de CO₂.

Le bâtiment étant le secteur le plus gourmand en énergie et le deuxième produisant le plus de gaz à effet de serre, déterminer l'impact écologique d'un matériau est devenu un enjeu primordial dans la construction.

Le concept d'énergie grise se développe dans les années 70 et des systèmes de certifications volontaires (DGNB, BREEAM, HQE en France) mis en place dans les vingt dernières années ont progressivement incité les industriels français à calculer selon une Analyse du Cycle de Vie (ACV), impacts environnementaux qui ne se limitent pas qu'à l'énergie et au carbone.

L'ACV, selon la norme ISO 14040 est une "*compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie*". Par ailleurs, il est fait l'hypothèse en analyse du cycle de vie que toute consommation de ressources ou émission de polluants conduit à un impact.

Quel est l'enjeu ? Il s'agit d'estimer le coût énergétique et environnemental d'un matériau ou d'un ouvrage, sur l'ensemble de son cycle de vie.

Axe de recherche : l'impact des matériaux sur l'environnement et les outils pour le calculer

Les approches existantes tel que le bilan de flux, l'empreinte écologique ou le bilan carbone sont monocritères. Or résumer à une seule dimension les impacts environnementaux risqueraient d'entraîner un transfert de pollution, d'où l'intérêt d'utiliser une méthodologie multicritère, telle que l'ACV (Analyse du Cycle de Vie).

La méthodologie ACV, une aide au choix des matériaux

L'ACV est une méthode environnementale cadrée par les normes ISO 14040 et ISO 14044.

Les matériaux ont de nombreuses propriétés qui sont divisibles en catégories :

1. **Propriétés mécaniques** (résistance en compression, en traction, module d'élasticité, fluage, fatigue...)
2. **Propriétés physiques, thermiques et acoustiques** (masse volumique, conductivité thermique, inertie thermique, absorption acoustique ...)
3. **Propriétés chimiques** (corrosion, bio détérioration, dégradation, dissolution, résistance au feu...)
4. **Propriétés de fabrication** (consistance, étalement, écoulement) -- liées aux conditions de mise en œuvre du matériau
5. **Propriétés environnementales** (impacts environnementaux via l'ACV), évaluées à court et long terme

Le choix d'un matériau est également multi objectif :

- **Critère fonctionnel**, lié aux propriétés mécaniques, physiques, thermiques ou chimiques
- **Critère technologique**, lié aux propriétés de fabrication
- **Critère économique**, lié au coût et à la disponibilité du matériau
- **Critère personnel**, lié à l'esthétique, aux habitudes et contexte régional

- Critère environnemental, lié à aux impacts sanitaire ((non-toxicité / nocivité) et environnemental.

L'axe de recherche du mémoire se portera donc exclusivement sur les propriétés environnementales du matériau. L'ACV ne s'applique pas sur les aspects sociaux-économiques.

Dans la RE2020, l'ACV est dynamique : elle prend en compte la temporalité des émissions et les effets de stockage temporaire du carbone. Plus une émission a lieu tôt, plus elle a d'impact sur le réchauffement climatique. Cela revient à pondérer les émissions de gaz à effet de serre selon leur année d'émissions.

Pour chaque matériau de construction, l'inventaire de cycle de vie peut atteindre plusieurs centaines, voire milliers de flux de consommation de ressources et d'émissions de polluants.

La méthodologie est découpée en plusieurs étapes (figure 1.2. a):

1.

Définir les objectifs et les champs d'étude : l'ACV se rapporte à une **unité fonctionnelle** qu'on définit (performance quantifiée associée à un flux de référence).

Ex : mur porteur pour 1m² de paroi, isolant avec un R défini pour 1m² de paroi, une route supportant une charge de X N pour 1ml de route.

OU on définit une **unité déclarée** (quantité d'un produit de construction utilisée comme unité de référence se rapportant aux applications typiques des produits.

Ex : tonne de granulat, 1m³ de béton, 1m² de mur ...
Les autres éléments dans la définition des objectifs sont la durée de vie et les frontières du système.

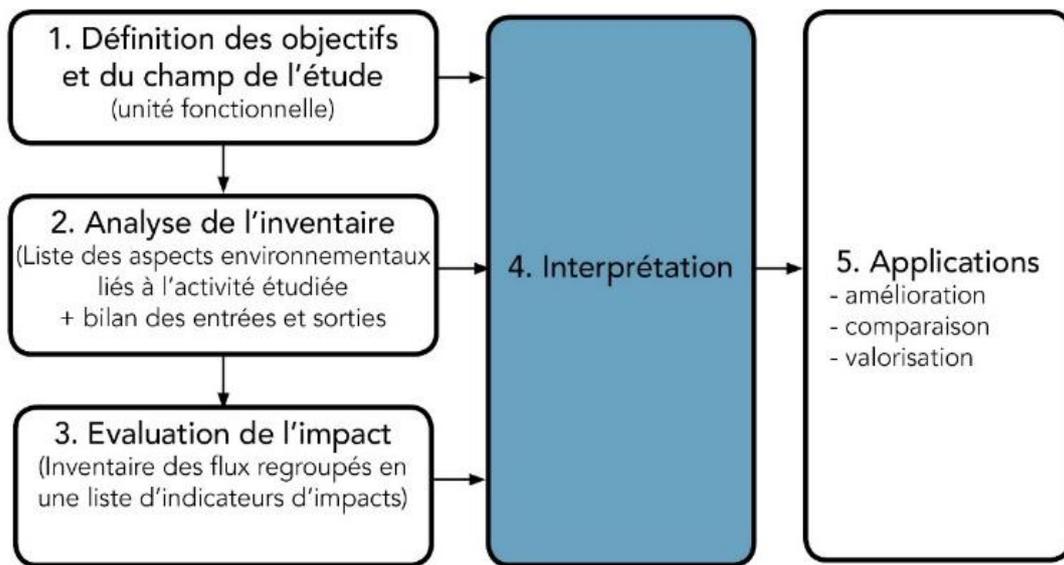


Fig. 1.2 a) Les étapes de la méthodologie ACV

2. Analyse de l'inventaire : on établit une liste des aspects environnementaux liés à l'activité étudiée

Ex : consommation de fioul, rejet de CO₂, consommation de sable...

On fait le bilan des entrées (tout ce qui est consommé) et des sorties (émissions de substances générées, pollution, production de déchets) pour chaque étape (figure 1.2. b).

Les flux peuvent être estimés de plusieurs manières différentes : à partir de valeur de la littérature, ou collecté sur le site de production. Les informations sont disponibles dans les bases de données d'inventaire de Cycle de vie des composants (ICV). Une fois l'inventaire fait, vient l'étape de calcul.

3. Évaluation de l'impact : les inventaires de flux (entrants et sortants) sont regroupés en une liste d'indicateurs d'impacts potentiels (figure 1.2. c)

Dans la RE2020, cette liste est composée de 27 indicateurs environnementaux, dont :

- utilisation de l'énergie
- acidification
- utilisation de matière secondaire
- appauvrissement de la couche d'ozone
- épuisement des ressources abiotiques fossiles ou non fossiles
- formation d'ozone photochimique
- utilisation de combustibles secondaires
- réchauffement climatique
- déchets
-

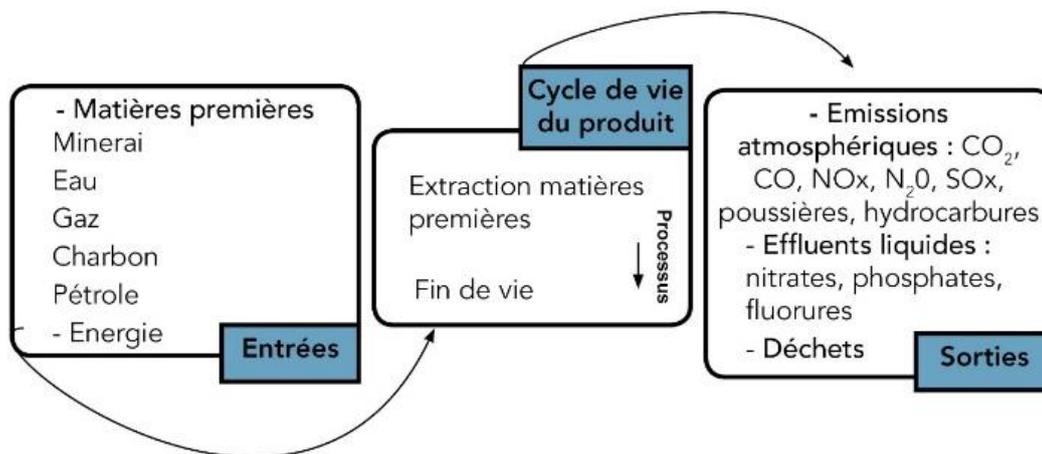


Fig. 1.2 b) Bilan des entrées et des sorties pour chaque étape de l'ACV

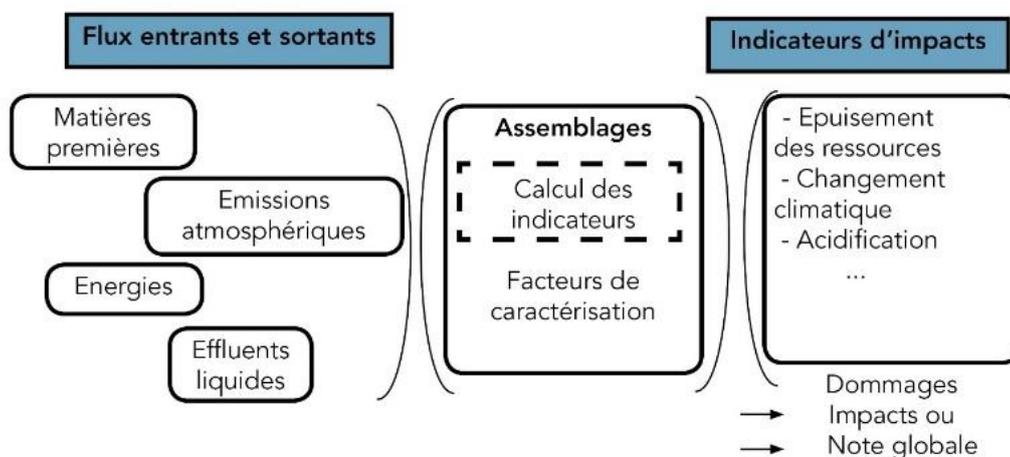


Fig. 1.2 c) Regroupement des flux en une liste d'indicateurs d'impacts.

Les indicateurs sont multipliés par des facteurs de caractérisation (figure 1.2. d).

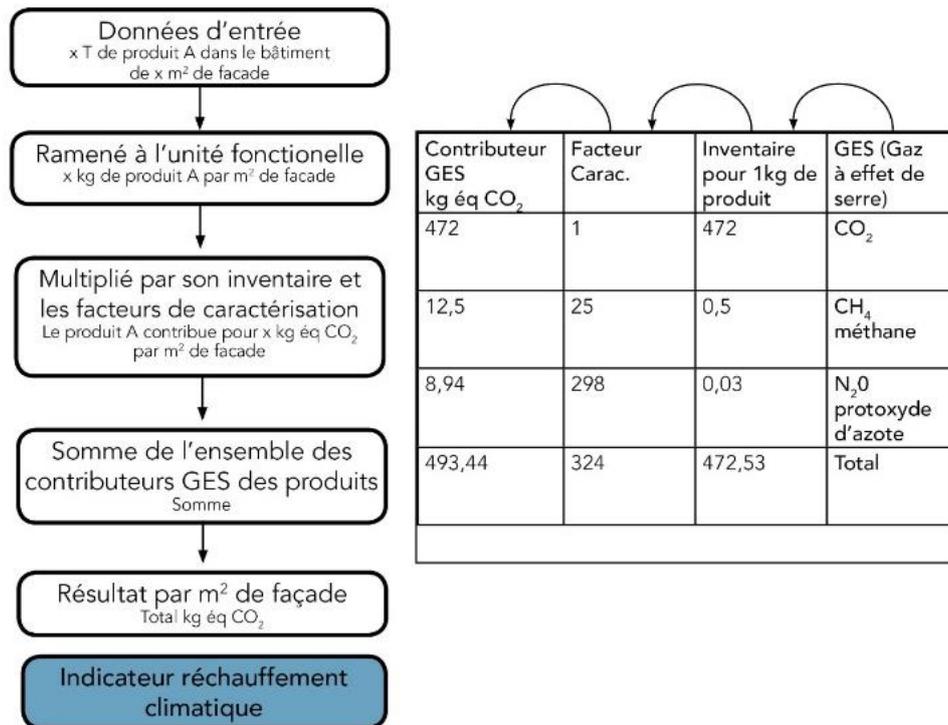


Fig. 1.2 d) Principe du calcul d'un indicateur environnemental. Exemple pour le réchauffement climatique

Ces derniers permettent d'exprimer l'importance relative des émissions (ou des consommations) d'une substance pour un indicateur d'impact environnemental.

La durée de vie de ces gaz va de 10 ans pour le méthane à 120 ans pour le CO₂. C'est pourquoi les équivalences varient en fonction de la durée considérée dans l'analyse : sur 100 ans, 1kg de méthane équivaut à 25 kg de CO₂ ; sur 500 ans, il ne vaut plus que 7kg de CO₂.¹⁹

4.

Interprétation : l'analyse des données est l'étape la plus importante. L'outil ne se contente pas d'identifier les principales sources d'impacts environnementales mais aussi de les éviter ou d'arbitrer les déplacements de pollutions liés aux différentes alternatives envisagées.

Sur la base de ces indicateurs, le choix d'un matériau dès l'étape de la conception pourra se faire grâce à des graphiques, comparant les matériaux entre eux, sur la base d'une même unité fonctionnelle.

Ces valeurs d'indicateurs, étant normés, permettent une méthode simple de comparaison, mais non simpliste. Aujourd'hui, des valeurs normées sont trouvables sur la base INIES pour les matériaux de construction classique (comme le bloc de béton étudié dans la prochaine partie), mais pas encore pour les matériaux expérimentaux explicités dans le dernier chapitre.

Dans notre cas d'études, nous nous concentrerons sur l'analyse de neuf impacts environnementaux (figure 1.2.e), sans valeur quantitative mais avec des ordres de grandeur.

¹⁹ PEUPORTIER B., *Eco-conception des bâtiments, Bâtir en préservant l'environnement*, Les presses, écoles des mines Paris, avril 2003.

Indicateurs environnementaux	Principaux contributeurs	Unités
Réchauffement climatique	Dioxyde de carbone (CO ₂) Méthane (CH ₄) Chlorofluorocarbures (CFC) Protoxyde d'azote (N ₂ O)	kg éq. CO₂ 1 kg CH ₄ = 25 kg éq. CO ₂ 1 kg N ₂ O = 300 kg éq. CO ₂
Appauvrissement de la couche d'ozone	Chlorofluorocarbures (CFC, HCFC) Composés susceptibles de réagir avec l'ozone stratosphérique	kg éq. CFC₁₁ 1 kg CH ₃ Cl = 0,02 kg éq. CFC ₁₁
Acidification des sols et de l'eau	Dioxyde de soufre (SO ₂) Oxyde d'azote (NO _x) Ammoniac (NH ₃), acide chlorique, et autres substance pouvant se transformer en acides.	kg éq. SO₂ 1 kg NO ₂ = 0,5kg éq. SO ₂ 1 kg NH ₃ = 1,6kg éq. SO ₂
Eutrophisation	- phosphore (contenu dans les phosphates (PO ₄) ³⁻ , PO _x) - azote (contenu dans l'ammonium NH ₄ ⁺ , les nitrates et les nitrites, NO _x) - carbone (contenu dans les matières organiques)	kg éq. (PO₄)³⁻ 1 kg P = 3,06 kg éq. (PO ₄) ³⁻ 1 kg N = 0,42 kg éq. (PO ₄) ³⁻
Epuisement des ressources abiotiques	- ressources naturelles non renouvelables énergétiques (gaz, lignite, pétrole, charbon,...) - ressources naturelles non renouvelables non énergétiques, exemple : métaux utilisés dans le bâtiment (cuivre, zinc, aluminium...)	kg éq. Sb (antimoine) 1 kg or = 52kg éq. Sb 1kg mercure = 0,0922kg éq. Sb 1kg fer = 0,000000524kg éq. Sb
Energies non renouvelables utilisées		MJ
Eau	- quantité d'eau douce utilisé	m³
Déchets éliminés	- déchets dangereux - déchets non dangereux - déchets radioactifs	kg
Déchets valorisés	- déchets destinés à la réutilisation - déchets destinés au recyclage - déchets destinés au réemploi	kg

Fig. 1.2. e) Indicateurs environnementaux retenus pour l'étude des matériaux

1.3. ETUDE DE CAS : LE BLOC DE BETON

Le béton est le matériau universel de notre époque. 6 milliards de m³ de béton sont produits par an dans le monde.

Le béton est la deuxième matière la plus consommée du monde après l'eau. Il représente 5 à 10 fois la consommation de métaux, 10 à 30 fois celle de carton ou de plastique.²⁰

En France, pour la fabrication du béton, 400 millions de tonnes de granulats et 20 millions de tonnes de ciment sont consommées chaque année.

Le béton est donc utilisé massivement. Sa première zone de pertinence est celle des ouvrages d'art : peu d'alternatives existent, à part le métal, qui n'a pas une empreinte carbone très intéressante.

Il n'y a pas non plus de matériaux de substitution efficaces pour les fondations.

Les domaines de pertinence du béton sont nombreux : sa facilité de mise en œuvre, son économie et sa durabilité. Mais c'est un matériau qui a mauvaise presse. Son usage hégémonique reflète l'image de banlieues, d'habitations bon marché et de chantiers de très grande envergure.

Le béton est donc un matériau qui doit se réinventer, pour être utilisé à bon escient et que son impact environnemental soit réduit.



Fig. 1.3.a) Bloc de béton creux, composé d'alvéoles, avec deux extrémités creuses, garnies de joints verticaux. Celui étudié est posé au mortier à joints épais, la technique la plus répandue.

Le bloc béton est un élément de base de la construction, utilisé pour monter un mur, réaliser une cloison, ou encore un sous-sol. Le bloc de béton creux est le plus couramment utilisé dans la construction d'un bâtiment (figure 1.3.a).

Pour présenter un exemple concret d'un produit en béton, les étapes du cycle de vie et les chiffres présentés ci-dessous sont extraits d'une fiche de déclaration environnementale et sanitaire collective (FDES), concernant un bloc de béton creux de granulats courants, d'une durée typique de 100 ans²¹.

Les fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES), encadrées par la norme NF EN 15804+A1 sont des documents normalisés qui présentent les résultats de l'Analyse de Cycle de Vie. Les FDES constituent un outil multicritère majeur permettant d'aider les professionnels dans leurs choix pour rendre un bâtiment plus durable.

La figure 1.3 b) représente le cycle de vie de ce bloc de béton, avec un code couleur adopté pour tous les cycles de vie présentés dans le mémoire :



La suite du propos consiste à détailler ces étapes du cycle de vie, en analysant les flux d'énergies et de ressources entrants et sortants, en calculant les déchets produits et en comprenant d'où viennent les quantitatifs des indicateurs environnementaux exposés dans la FDES.

²⁰ Planetoscope.com, «La production mondiale de béton ». Consulté le 13/11/21 <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-.html>.

²¹ La présente déclaration a été réalisée par le Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton (CERIB), à l'initiative de la Fédération de l'Industrie du Béton (FIB). Les informations qui y sont contenues sont

fournies sous la responsabilité du CERIB et de la FIB selon la norme NF EN 15804+A1 et son complément national NF EN 15804/CN.

Approvisionnement en matières premières

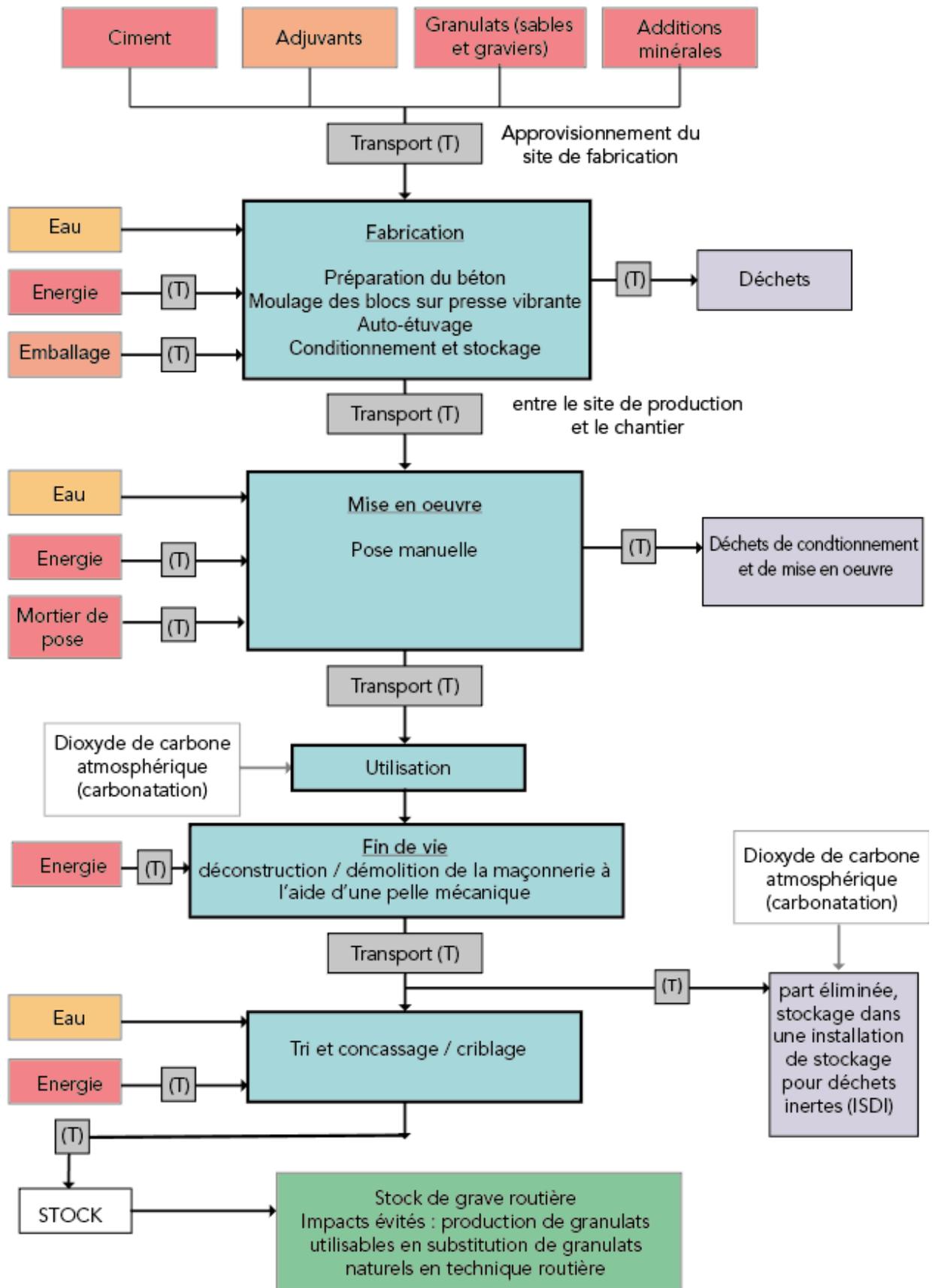


Fig. 1.3. b) Cycle de vie du bloc de béton

Approvisionnement en matières premières

L'épuisement des granulats

Les granulats sont utilisés à 1/3 pour le béton et au 2/3 pour les travaux publics.

Les granulats extraits les plus durs, les plus propres, et les plus stables, sont utilisés pour le béton. Pour faire des remblais et des couches de formes, tous les granulats sans pathologie sont utilisables. Seules les couches routières sur lesquels roulent les voitures (entre 2 et 10 cm d'épaisseur) ont besoin de granulats encore plus pointus que le béton.

Les granulats représentent environ deux tiers de la masse du béton.

Il existe deux types de ressources :

- **les roches meubles** (granulats alluvionnaires) : ce sont des roches massives qui ont été divisées par la nature en grains plus ou moins gros, et qui ont ensuite été déplacées par l'eau.

- **les roches massives** : l'homme a la capacité de les diviser si la nature ne l'a pas fait, ce qui permet d'obtenir du sable et du granulat. Les carrières de ces roches massives sont très importantes en France et bien réparties sur le territoire.

Le problème de la ressource de ces deux roches est différent.

Aujourd'hui, en France, les granulats alluvionnaires sont sous tension. Des gisements existent, et sont exploitables, mais ils sont épuisables. Par ailleurs, il est interdit d'en prendre dans le lit des rivières.

Par exemple, le sable de la Loire a été consommé par les bétonniers puis a été d'interdit d'extraction, car cette pratique aurait transformé le fleuve en une grande mare dans de la boue.²²

Si on voulait donc continuer à en consommer autant que maintenant, ce serait impossible car on arrive à la limite de ce que la nature peut produire. Notre consommation est plus rapide que sa production.

La roche massique représente la planète. En effet, la surface la plus abondante du corps terrestre est le silicium. La silice, comme le basalte, sont présents sous nos pieds en profondeur. Il y a donc autant de roches massiques que nécessaires mais elles ne sont pas facilement accessibles.

Pour des raisons environnementales et administratives, il est de plus en plus difficile d'ouvrir de nouvelles carrières. Ces dernières sont exploitables une dizaine d'années. Ces granulats sont donc aussi sous tension, car chercher des carrières plus lointaines amènent à des problèmes de transport.

On peut donc en conclure que les stocks des roches alluvionnaires sont finis. Sur les matériaux de carrières, la tension sera moindre car la ressource est presque illimitée mais les problèmes se poseront localement. En région parisienne, par exemple, il n'est pas facile d'avoir des matériaux de carrières. Faire voyager les matériaux a un coût économique et écologique très important.

Après être extraits, les granulats sont souvent livrés prêts à l'emploi par camion (pas de concassage sur le lieu de production). Ils sont déversés dans des cases couvertes et transportés à l'aide de dispositifs mécaniques (bandes transporteuses).

L'épuisement du sable

Le sable est une ressource extraite, entre autres, des roches massives. C'est la deuxième ressource naturelle la plus utilisée dans le monde, après l'eau (15 milliards de tonnes extraites par an).

Elle est indispensable à la construction et à une partie de la production industrielle. Le sable silicieux sert de matière première à plusieurs activités industrielles, dont le béton. La verrerie, tout comme la cosmétique, utilisent aussi du sable mais en quantité minime, négligeable par rapport aux ouvrages de **génie civil**.

En France, on consomme 50 millions de tonnes de sable par an pour le béton.

Les carrières, les rivières, les plages et maintenant les fonds marins sont exploités, malgré un dessalement nécessaire pour éviter la corrosion des aciers dans le béton armé.

Ces extractions massives ont un impact sur les écosystèmes fragiles des rivières et littoraux.

La crise de l'eau

Dans le rapport annuel de 2015, l'Organisation des Nations Unies (ONU) prévient l'urgence de changer notre mode de consommation de l'eau, sinon, « l'e

²² DE LARRARD F. Conférence « Le recyclage, une solution à la raréfaction des sables ? » 01/2020. Consulté le 26/12/21. www.x-environnement.org/reunions-debats/interventions/231.

monde devra faire face à un déficit hydrique global de 40% » dès 2030.²³

Les prélèvements excessifs dans les aquifères souterrains accentuent les risques de glissement de terrain et favorisent les entrées de sel, qui rendent l'eau, à long terme, inconsommable.

L'eau est nécessaire pour le gâchage du béton et le lavage des toupies des camions malaxeurs et des machines utilisées dans les stations de recyclage. 3,65 litres d'eau sont nécessaires pour le gâchage du mortier de pose d'1 m² de mur de blocs de béton.²⁴

La crise en approvisionnement de ces matières premières donne au béton le statut de ressource épuisable.

La production de ciment et son impact sur l'environnement

Le problème du ciment est d'avantage son impact carbone que les ressources disponibles.

La production de ciment pèse 2,9 % des émissions françaises de gaz à effet de serre. Un niveau qui atteint 6 % à l'échelle mondiale.²⁵

Le ciment Portland est produit à partir de calcaire et d'argile principalement (extraits de carrière), de marne et/ou de schiste.

Ces roches sont concassées, jusqu'à une taille inférieure à 150mm.

Elles sont ensuite broyées ; à cela s'ajoute de faibles proportions de matières naturelles (bauxite, oxyde de fer, schiste, argile, ou sable), ou de déchets minéraux, pour fournir tous les constituants minéraux nécessaires à la production de clinker.

Le mélange est homogénéisé puis chauffé grâce aux flux de gaz chauds sortant du four. La décarbonatation débute, réaction qui détache les molécules de CO₂ contenues dans le calcaire, le transformant en chaux.

Le cru préchauffé pénètre ensuite dans un tube qui tourne et qui atteint 1450°C, chaleur générée par les combustibles fossiles et déchets brûlés. Cette dernière termine la fin de la décarbonatation et provoque la transformation du cru en clinker.

La transformation se finalise par un refroidissement brutal par air soufflé. D'autres matières finement

broyées peuvent être ajoutées pour adapter les propriétés du ciment.

Ce mélange est ensuite broyé avec du gypse pour régulariser le temps de prise du produit final.

Ce dernier est stocké dans des silos puis expédié.²⁶

Ce processus a donc quelques impacts positifs, et beaucoup d'impacts négatifs sur l'environnement.

Du point de vue de la gestion des déchets, l'effet peut être bénéfique, car les usines de ciment réutilisent ou détruisent des déchets dangereux.

Les poussières produites de fours peuvent servir à neutraliser les effluents acides des mines, à stabiliser les déchets dangereux, ou à reboucher des revêtements d'asphalte.²⁷

Les impacts négatifs sont plus nombreux.

Les rejets de charges des fours (pH élevé, matières en suspension, solide dissous) et les eaux de refroidissement (chaleur résiduelle) sont des sources de pollution de l'eau.

Les lixiviats qui s'écoulent des matériaux entreposés et des aires d'évacuation des déchets peuvent polluer les eaux superficielles et souterraines.

Les émissions carbonées du ciment ont deux sources²⁸ :

- celles liées à la réaction chimique lorsqu'on chauffe du calcaire, qui permet d'obtenir du clinker.

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$ (chaud)

- et celles liées à l'énergie nécessaire pour atteindre la température du four. 1/3 de l'énergie nécessaire provient de la combustion de déchets ultimes, 2/3 proviennent de la dégradation d'énergie fossiles non renouvelables.

Dans chaque usine, la quantité de CO₂ produite peut varier selon l'efficacité du procédé de fabrication utilisée, de la qualité des matières premières et de la proximité de l'usine de la source d'approvisionnement en matériaux bruts.

In fine, La production du ciment Portland émet en moyenne entre 800 et 1000 kilos de CO₂ par tonne.

Ce processus de fabrication requiert une énergie de 4900 MJ par tonne de ciment produite, soit 900 MJ par tonne de béton.

Les étapes du cycle de vie du ciment sont résumées dans la figure 1.3.c), avec les flux entrants et les flux sortants.

²³ VALO M., « La crise de l'eau illustrée en 5 graphiques ». 2019. Consulté le 27/12/21. https://www.lemonde.fr/ressources-naturelles/article/2015/03/20/la-crise-de-l-eau-illustree-en-5-graphiques_4597592_1652731.html

²⁴ CERIB, Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire du bloc en béton à joints épais. Mai 2017.

²⁵ PIN R., « Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne » <https://www.actu-environnement.com/ae/news/Bilan-carbone-ciment-filiere-changer-33280.php4>

²⁶ INFOCIMENT « La fabrication du ciment ». Consulté le 08/01/22. <https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>

²⁷ DIRECTIVE OPERATIONNELLES DE LA BOAD « Industrie du ciment ». Consulté le 08/01/22. https://www.boad.org/wp-content/uploads/upload/ethique/do_37_industrie-ciment.pdf

²⁸ CAIRN.INFO « Rappel sur le marché des droits à polluer ». Novembre 2012. Consulté le 08/01/22. <https://www.cairn.info/revue-idees-economiques-et-sociales-2008-3-page-57.htm>

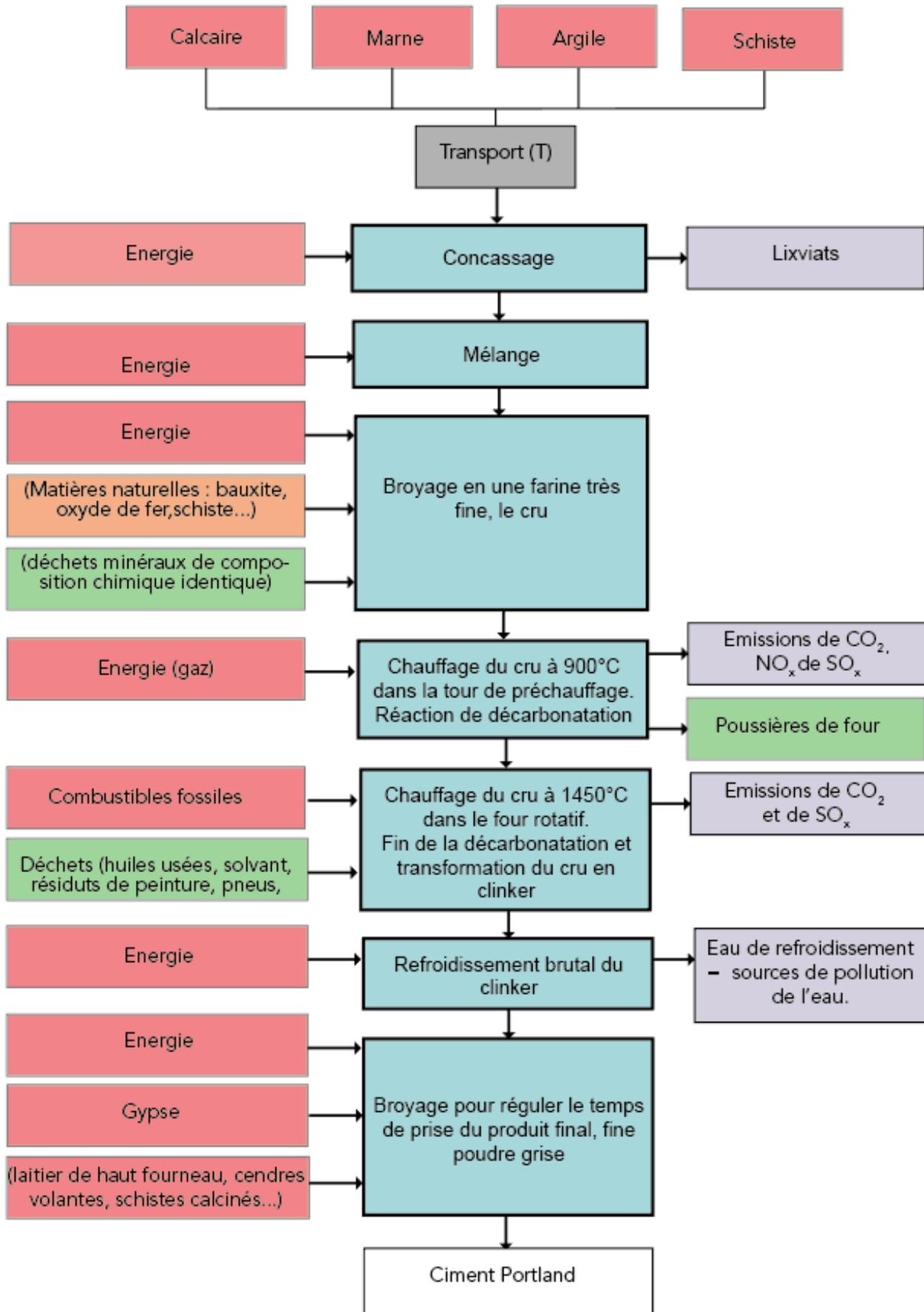


Fig 1.3.c) Cycle de vie du ciment Portland

Indicateurs environnementaux	Unités
Réchauffement climatique	13,2 kg éq. CO ₂
Appauvrissement de la couche d'ozone	1,06 x 10 ⁻⁶ kg éq. CFC ₁₁
Acidification des sols et de l'eau	4,37 x 10 ⁻² kg éq. SO ₂
Eutrophisation	7,85 x 10 ⁻³ kg éq. (PO ₄) ³⁻
Épuisement des ressources abiotiques	2,29 x 10 ⁻⁶ kg éq. Sb
Energies non renouvelables utilisées	248,2 MJ
Eau	8,98 x 10 ⁻² m ³
Déchets éliminés	66 kg
Déchets valorisés	155 kg de granulats concassés

Fig 1.3.d) Quantitatif des indicateurs environnementaux pour 1m² de paroi de blocs de béton.

De par ces cycles de vie et les flux entrants et sortants définis par les figures 1.3.b) et c), le bloc de béton a des conséquences sur l'ensemble des impacts environnementaux décrits précédemment. Ses impacts sont quantifiés (figure 1.3.d) et nous allons les analyser.

La fabrication du béton

73% de la consommation d'eau a lieu pendant la phase de production du bloc de béton (figure 1.3.e), notamment pour la production du ciment et des granulats (eau de nettoyage des installations et eau du béton).

La phase de production représente 60% de la part du changement climatique sur le cycle de vie totale. Plus de la moitié de la totalité provient de la production de ciment (figure 1.3.f).

La part de l'acidification atmosphérique résultant de l'étape de production représente 54% sur le cycle entier. Cela est dû à la production de ciment majoritairement (figure 1.3.g).

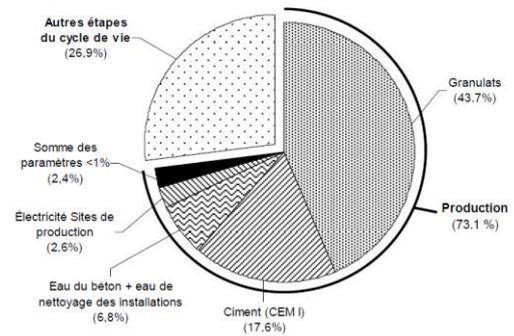


Fig 1.3.e) Contribution des paramètres de production à l'indicateur consommation d'eau

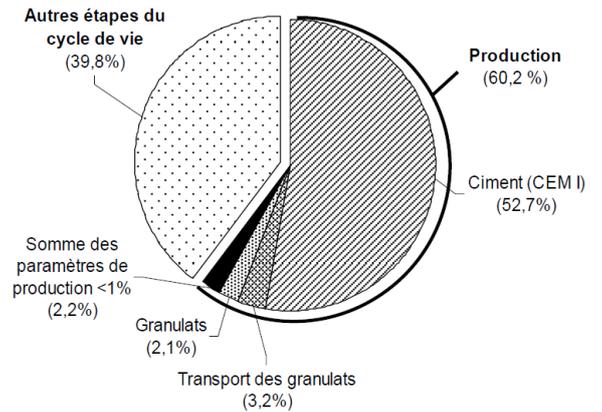


Fig 1.3.f) Contribution des paramètres de production à l'indicateur changement climatique

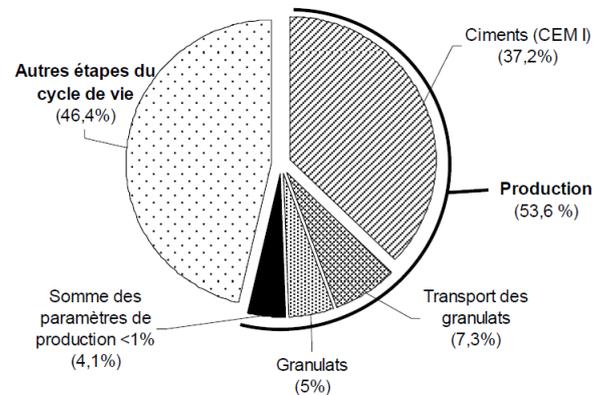


Fig 1.3.g) Contribution des paramètres de production à l'indicateur acidification

La part de l'épuisement des ressources (énergétiques ou non énergétiques) lors de la production représente 55 % de la totalité des ressources consommées durant la durée de vie entière des blocs (figure 1.3.h).

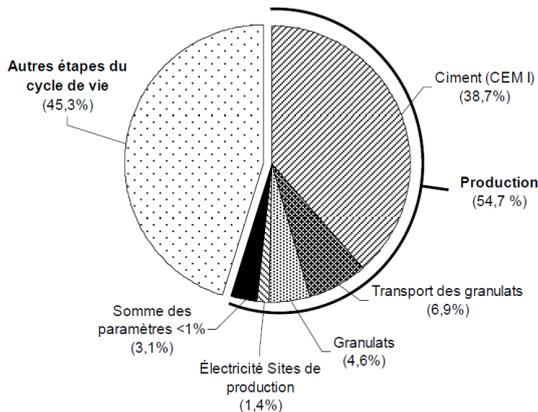


Fig 1.3.h) Contribution des paramètres de production à l'indicateur épuisement des ressources

La part de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique résultant de la production des blocs représente environ 82 % de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique sur le cycle de vie entier des blocs (figure 1.3.i). Le paramètre principal est la production des granulats.

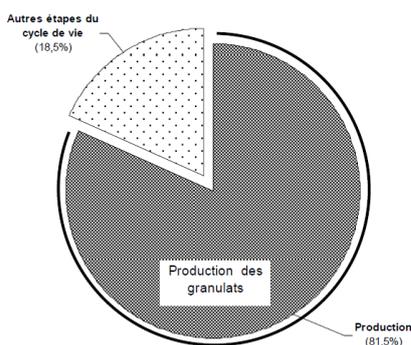


Fig 1.3.i) Contribution des paramètres de production à l'indicateur destruction de la couche d'ozone stratosphérique

Dès la fabrication des blocs, des déchets sont produits sur le site de construction.

Par exemple, pour la production d'un bloc de béton creux, les chutes de pose équivalent à 5,18 kg de bloc en béton et 1,5 kg de chutes de mortier.

Les déchets de conditionnement sont quantifiés par 300 grammes de bois (palette blocs) et 20 g de papier (sac mortier).

Mise en œuvre

La mise en œuvre d'un bloc nécessite également de l'eau et de l'énergie (quantité peu importante comparée à la fabrication). Cette mise en œuvre produit des déchets, soit pour un bloc de béton creux²⁹ :

- Chute de pose :
 - 3,63 kg de chutes de pose de bloc en béton recyclé
 - 1,55 kg de chutes de pose de bloc en béton et 1,5 kg de chutes de mortier éliminé
- Déchets de conditionnement :
 - 172 g de bois valorisé (palette blocs)
 - 129 g de bois éliminé (palette blocs)
 - 19 g de papier (sac mortier)

Utilisation

Pendant la durée de vie de l'ouvrage se produit la carbonatation, un phénomène naturel.

Le dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère pénètre dans le béton à partir de la surface du matériau et se réagit en formant un acide au contact des produits résultant de l'hydratation du ciment. Ce processus modifie progressivement la composition chimique et la microstructure.³⁰

Ce processus de carbonatation du béton permet donc de capter, pour un bloc de béton, 3,46 kg de dioxyde atmosphérique pendant sa durée de vie, soit 100 ans.³¹

Les blocs en béton, dans les conditions normales d'utilisation, ne nécessitent ni maintenance, ni réparation, ni remplacement, ni réhabilitation.

²⁹ CERIB, Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire du bloc en béton à joints épais. Mai 2017.

³⁰ Ibid.

³¹ Ibid.

Fin de vie

A l'étape de la fin de vie, le béton des granulats secondaires, produit par concassage des déchets, va poursuivre sa carbonatation durant son stockage et son utilisation. La surface d'échange de ce béton avec l'air ambiant est augmentée contribuant ainsi à accélérer le processus de carbonatation. Cependant les conditions d'utilisation du granulat vont influencer sur l'importance du phénomène. Le béton sera, à terme, complètement carbonaté.

Lorsque le mur est déconstruit, les déchets sont transportés vers un centre de tri.

70% des déchets sont orientés vers un centre de tri et concassés en vue d'une valorisation matière, soit 166kg de béton par m² de mur. Ces granulats recyclés sont utilisés le plus souvent en techniques routières et évitent ainsi la production de granulats naturels au-delà des frontières du système.

Aujourd'hui, la construction routière reste la seule filière satisfaisante pour le recyclage du béton. Cette solution n'est pas pleinement soutenable, actuellement et dans un avenir proche. Il y a de moins en moins de nouvelles routes à construire mais plutôt des routes à entretenir, or la ressource en granulats recyclés augmente, dû aux démolitions des ouvrages construits dans les années 50-60.

30% des déchets béton sont éliminés en installation de stockage de déchets, soit 66 kg de béton par m² de mur.

Toutes les étapes du cycle de vie sont intercalées par des périodes de transport. Le camion utilisé classiquement nécessite 38 litres de diesel au 100km à pleine charge et 25,3 litres de diesel au 100 km à vide.

En France, les poids-lourds contribuent à hauteur de 27 % des émissions de CO₂ des transports.

Durant tout le cycle de vie, une des qualités du béton est sa stabilité chimique. Il ne dégage aucun gaz ou composé toxique, même en cas d'incendie.

Le béton a un impact très faible l'acidification atmosphérique. Etant plutôt basique, il corrige l'eau légèrement acide dans les premiers temps d'usage, puis n'a rapidement plus aucun effet.

Pour conclure, ce schéma de cycle de vie avec ses explications nous montrent comment des matériaux naturels tels que la terre, le sable, la chaux, sont cuits à très haute température pour être réduite en matière inerte sous forme de parallélépipède rectangle, traité chimiquement, ce qui rend le cycle de vie très linéaire et très impactant sur l'environnement.

Dans la suite du mémoire, nous nous demanderons comment limiter le « Heat Beat and Treat » qui caractérise les traitements mécaniques, chimiques et thermiques lourds nécessaires à la production de béton, et comment, plus généralement, réduire l'impact environnemental de ce bloc ?

2. S'INSPIRER DU VIVANT : LE BIOMIMÉTISME

2.1. UNE APPROCHE BIOMIMÉTIQUE POUR LES MATÉRIAUX

L'origine du biomimétisme

Depuis leurs origines, les humains interagissent avec la nature et en ont utilisé des éléments. Au fil des époques, ils ont vu la nature comme une source d'inspiration pour ces besoins d'adaptations physiques et physiologiques similaires.

Au XV^{ème} siècle, Léonard de Vinci invitait à prendre des « *leçons dans la nature, car c'est là qu'est notre futur* ». ³²

Léonard de Vinci, à travers ces notes et croquis, a théorisé le biomimétisme. Il s'inspirait de la nature (l'écoulement des liquides) pour développer le progrès technique (les moulins à eau, pompe hydraulique). ³³

Il a aussi beaucoup observé les oiseaux et leurs battements d'ailes pour essayer d'adapter ce mouvement aux hommes, notamment en créant l'ornithoptère (figure 2.1.a), une machine semblable à des ailes d'oiseau activées par l'homme.

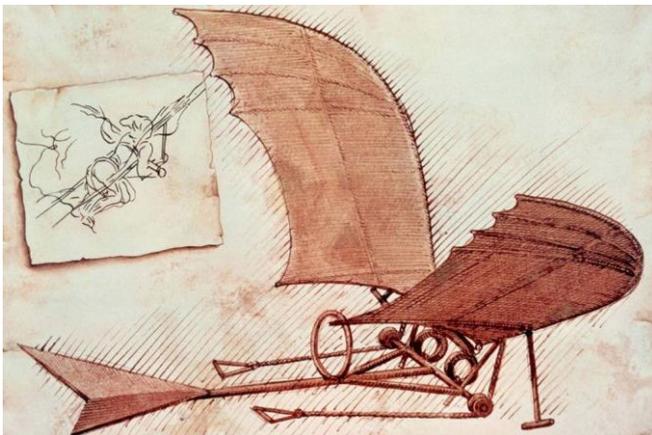


Fig. 2.1.a) Croquis de l'ornithoptère de Léonard de Vinci

Mais c'est seulement dans les années 1990 que le biomimétisme est théorisé et que le concept est repris par Janine Benyus, une scientifique américaine, en y ajoutant une dimension écologique.

Définition du biomimétisme

Le biomimétisme, vient du grec « bios » (vie) et « mimésis » (imitation). En 1997, Janine Benyus théorise le biomimétisme comme une approche qui cherche des solutions durables dans la nature, sans vouloir seulement en répliquer les formes, mais en identifiant les règles qui les gouvernent ³⁴.

« Le biomimétisme est une démarche qui consiste à aller chercher [son] inspiration, pour une innovation durable, dans la nature, où l'on trouve des stratégies à la fois performantes (...) et résilientes pour synthétiser et dégrader des matériaux, se fixer ou se déplacer, stocker ou distribuer l'énergie, traiter l'information, organiser les réseaux et les échanges, et bien d'autres choses encore ».

Stratégie nationale de transition écologique vers un développement durable 2015-2020 ³⁵

En effet, dans son ouvrage *Biomimicry Innovation Inspired by Nature*, elle décrit chaque organisme naturel comme une composition inédite de matériel génétique ou la pollution et les déchets n'existent pas. Dans tous les organismes vivants, la nature réalise une multitude de matériaux, d'architecture, de systèmes

³² <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2020/02/FRB-Synthese-Biomimetisme-et-biodiversite.pdf>

³³ LAGARDE Y. « Léonard de Vinci et l'invention du biomimétisme ». 09/2019. Consulté le 02/01/2021.

<https://www.franceculture.fr/sciences/leonard-de-vinci-et-linvention-du-biomimetisme>

³⁴ JANINE BENUYS, *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables*, Rue de l'Echiquier, Mai 2017, 504 p.

³⁵ CEEBIOS, *Rapport de synthèse « Biomimétisme en France - Etat des lieux »*, juillet 2018.

et de fonctions. Citons la réalisation de composites, comme les carapaces d'insectes ou de crustacés, ou dans notre corps les tissus osseux et dentaires. Des cellules très simples comme celles des bactéries sont capables de comportements fort élaborés.

La nature sait économiser l'énergie sans épuiser les combustibles fossiles et sans polluer la planète. Les matières premières utilisées sont limitées mais les connaissances sont infinies.

Tous les animaux, végétaux, micro-organismes jouent un rôle au sein d'un ensemble auto-organisé. Ils forment un écosystème, optimisant l'énergie disponible.

La nature est régie par certaines « lois, stratégies et principes canoniques », qui doivent servir de cadre de référence à tout chercheurs, architectes, ingénieurs, naturalistes :

- la nature fonctionne à l'énergie solaire
- la nature n'utilise que l'énergie dont elle a besoin
- la nature adapte la forme à la fonction
- la nature recycle tout
- la nature récompense la coopération
- la nature mise sur la diversité
- la nature valorise l'expertise locale
- la nature limite les excès de l'intérieur
- la nature transforme les limites en opportunité

Par ailleurs, Janine Benyus distingue trois niveaux d'inspiration, d'exigence croissante en termes de durabilité :

- les **matériaux** et les **processus de « fabrication »** assurés par des organismes ou des êtres-vivants.
- les **formes, fonctions et processus** adoptés par les être-vivants. Les formes assurent une fonction précise tel que le camouflage, l'aérodynamisme, l'adhésion ou la couleur.
- Le **fonctionnement global de phénomènes naturels**, tels que celui des écosystèmes (biominéralisation ou morphogénèse), et les interactions que les espèces développent entre elles.

A ces trois niveaux, la résolution d'un problème humain par l'analyse du vivant est la même (figure 2.1b) :

- **Identifier** : élaborer le mémoire explicatif du besoin/problème humain
- **Interpréter** : Traduire le mémoire explicatif en termes biologiques et définir des paramètres

³⁶ CEEBIOS, « Synthèse Matériaux Bioinspirés, Ceebios », 2018.

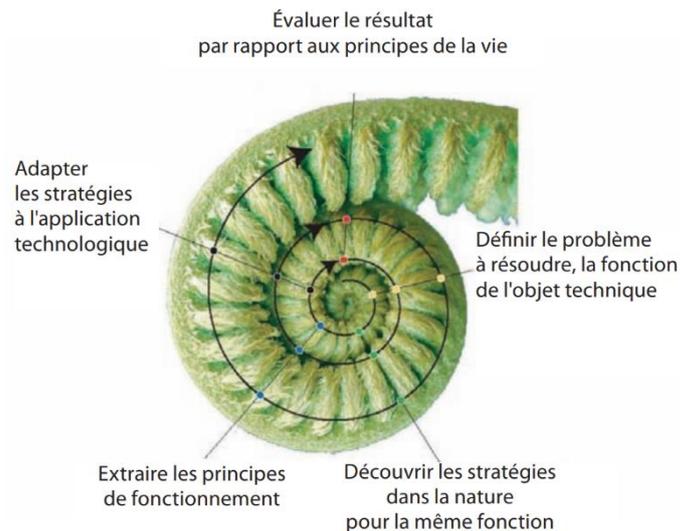


Fig. 2.1.b) La spirale du biomimétisme

- **Chercher** des exemples biologiques qui répondent aux besoins définis
- **Extraire** Identifier des schémas et créer une taxinomie (description et classification des organismes vivants)
- **Imiter** Développer des solutions qui s'appuient sur les schémas biologiques
- **Evaluer** les solutions selon les Principes du Vivant

Nous nous intéressons au premier niveau d'inspiration, celui des matériaux, qui est étroitement lié au biomimétisme écosystémique, traitant des relations, des réseaux et des dynamiques.

Les matériaux du vivant ont des fonctions performantes : réactivité à l'environnement, auto-réparation, multifonctionnalité, légèreté, résistance mécanique, **recyclage, réutilisation, réemploi...**³⁶

Pour la fabrication de ces derniers, la nature détient au moins quatre principes :

1. des processus de fabrication respectant la vie
2. une hiérarchie ordonnée des structures
3. L'auto-assemblage
4. le matriçage des cristaux via les protéines

La production de produits doit être pensée en amont, avec une interdépendance des éléments entre eux, liés par un réseau.

Citons quelques exemples de matériaux créés par la nature, et de ceux reproduits par l'Homme :

Le **bois**, matériau de construction le plus abondant, possède de grandes qualités mécaniques. Il a une très bonne résistance à la compression et une bonne résistance à la traction, tout en ayant une bonne solidité. Ces qualités sont dues à sa structure hiérarchisée, car il est constitué à partir d'un motif élémentaire : le glucose. Les molécules de glucose associées à des catalyseurs se polymérisent, construisent des chaînes linéaires de cellulose, qui s'alignent les unes aux autres pour former des microfibrilles et constituent les parois des cellules.

D'autres **matériaux composites biologiques**, comme les os, les nacres de coquilles de mollusques, possèdent une microstructure constituée de particules minérales à morphologie anisotrope, empilées de manière ordonnée avec des polymères organiques aux interfaces. Ces microstructures composites sont à la base des mécanismes de blocage des fissures améliorant les performances mécaniques des matériaux. Les os, le bois, la peau, les défenses, la ramure et le muscle cardiaque, vont au bout de leur durée de vie utile avant de dépérir et d'être réabsorbés par une autre forme de vie, dans le grand cycle de la mort et de la renaissance.

Malgré des dépenses énergétiques colossales, nous ne parvenons toujours pas à fabriquer des matériaux qui soient aussi bien travaillés, aussi durables ou sensés, du point de vue environnemental, que ceux de la nature. Prenons l'exemple du kevlar.

Le **kevlar**, utilisé pour les gilets pare-balle, est le matériau le plus solide et le plus résistant. Sa fabrication nécessite des molécules provenant de la pétrochimie, qui sont polymérisées sous pression et à haute température en présence d'acide sulfurique concentré. Les fibres sont alors alignées selon le schéma souhaité sous haute pression. L'énergie nécessaire est extrêmement importante et les sous-produits extrêmement toxiques.

L'approche de la nature est différente.

L'**araignée** édifie des toiles ayant deux fonctions principales : stopper l'insecte en plein vol, puis l'emprisonner. La toile est optimisée pour absorber une quantité importante d'énergie cinétique sans se briser, et pour se débobiner en filaments collants et fins, qui viennent s'enrouler autour de l'insecte. Plusieurs fils sont produits par l'araignée pour remplir ces différentes missions. L'araignée est capable d'extruder différentes qualités de fils grâce à plusieurs



Fig. 2.1.c) Les filières et leurs glandes situées sur l'abdomen de l'araignée. Le fil sécrété est plus résistant que l'acier, mais exige beaucoup moins d'énergie.

glandes (figure 2.1 c) mises en œuvre les unes à la suite des autres, en fonction du besoin.

Le fil servant de trame à la toile a les propriétés mécaniques les plus remarquables. Il est, à masse égale, plus résistant que l'acier et presque aussi rigide que les plus rigides des polymères. Son énergie de rupture est 100 fois plus grande que l'acier, trois fois plus grande que celle du kevlar³⁷.

Son extensibilité et cette résistance à la rupture, ajoutées à sa faible densité, confèrent au fil de trame les qualités requises.

La toile est aussi biodégradable, et non immunogène. De plus, l'araignée la fabrique dans l'eau, à température **ambiante**, sans haute pression, chaleur ou agents chimiques, en se nourrissant de mouches et de criquets. Si besoin est, elle peut même manger sa vieille toile pour en fabriquer une neuve.

³⁷ OBSERVATOIRE FRANÇAIS DES TECHNIQUES AVANÇÉES, Biomimétisme et Matériaux, 2001, OFTA, 460 p.

La fabrication par l'homme de la fibre aramide nécessite de bouillir du pétrole dans de l'acide sulfurique à environ 750°C. Le mélange est ensuite soumis à une haute pression pour agencer les molécules, générant ainsi des déchets toxiques en grande quantité.³⁸

L'exemple de la fibre d'araignée illustre bien le contraste entre l'intelligence de la nature et celle de l'ingénieur.

La comparaison des procédés de fabrication du kevlar, de la fibre aramide par l'homme et du fil d'araignée montre combien la nature élabore des structures organisées bien plus performantes que nos matériaux les plus innovants. La forme et la matière sont indissociables. Seules les stratégies optimales survivent à la sélection naturelle et sont propices à la vie.

Même si le rapport de proportion entre l'homme et la nature est peu comparable et mesurable, les architectes peuvent s'inspirer de systèmes du vivant pour diminuer l'impact environnemental de leur construction.

Enjeux et principes d'application

L'enjeu du biomimétisme dans le secteur des matériaux est de sortir de l'utilisation des matières premières rares, difficiles à extraire et à purifier et de revoir nos procédés.

« Chauffer, mettre sous pression, soumettre à des traitements agressifs » est devenu le leitmotiv de l'âge industriel, le moyen par lequel nous synthétisons tout.

Les matériaux céramiques qui nous sont le plus familiers sont le plâtre, le ciment, la porcelaine, le verre et la brique. Les techniques utilisées pour les fabriquer remontent à l'âge de pierre. Nous prenons des particules minérales de la terre, que nous chauffons ou mettons sous pression, afin d'en faire une substance plus dure.

Nous devons opérer dans des conditions de chimie douce à partir d'un nombre restreint de briques élémentaires, faits d'éléments chimiques abondants. Le vivant n'utilise que des éléments (H, N, O ..) ou

synthons (CO₂, H₂O, SiO₂) abondants à la surface de la Terre ou dans les océans.

D'après Yves Bréchet, membre de l'Académie des sciences et chercheur au laboratoire « science et ingénierie des matériaux et des procédés » de Grenoble,

« La variété des matériaux naturels vient de la variété des architectures hiérarchiques naturelles que l'on peut observer dans le bois, les os, les coquillages. Inversement, l'ingénieur a accès à une grande variété de matériaux constitutifs, mais est à ce jour assez peu inventif sur les architectures ».

Dans sa sélection, la nature a souvent optimisé son choix sur un nombre limité de matériaux et suivant un principe d'organisation hiérarchique, à contrario de l'homme, comme le dit Julian Vincent, professeur à Heriott Watt University à l'ISSS (Institut of Sensors, Signals and Systems) et à NIMC (Nature Inspired manufacturing Centre) :

« Nos matériaux sont biologiquement inertes, car nous y introduisons des liaisons de haute énergie, en utilisant des températures élevées. Les matériaux biologiques se sont développés pour pouvoir être recyclés et leurs molécules sont stabilisées par des liaisons tout juste suffisantes par rapport aux températures et aux fonctions mécaniques attendues ».

Après avoir étudié de manière plus détaillée le cycle de vie de deux organismes naturels et avoir trouvé des points de divergence avec le cycle de vie du béton, nous tenterons de comprendre comment, en s'inspirant du vivant, produire des matériaux adaptés et évolutifs dans des conditions de chimie douce, c'est-à-dire à pression et à température ambiantes, qui ne laissent pas de déchets ?

³⁸ PAWLYN M., *Biomimétisme et architecture*, Edition Rue de l'Echiquier, 2019

2.2. ETUDE DE CAS

La moule

La moule, aussi appelée *mytilus edulis* par les scientifiques, est un mollusque bivalve qui se développe et vit généralement dans le milieu marin. Jeune et à l'état de larve planctonique, elle se déplace dans l'eau grâce à des petits cils qu'elle agite.

Sa maison, une coquille de forme oblongue et profilée, faite de sels et de minéraux extraits de son environnement immédiat, est créée par le processus de minéralisation. La biominéralisation définit l'ensemble des phénomènes physico-chimiques, cellulaires et moléculaires par lesquels les organismes vivants élaborent des structures minéralisées ;

La fabrication de la coquille met en œuvre des matières de l'environnement proche, et un matériau produit par la moule. Des gaz dissous dans l'eau se combinent avec l'eau pour former du carbonate, qui est capté par la moule pour, associé au calcium, former la coquille.³⁹ La moule crée sa coquille par l'action de ses propres muscles et de son organisme, des protéines qu'elle développe et qui servent de liant ou de catalyseur pour produire un matériau durable à base de carbonate de calcium.

Aucune énergie n'est consommée pendant les trois semaines de fabrication.

Elle accumule par ailleurs des métaux lourds et nocifs pour l'environnement (mercure, plomb, cadmium) qui se sont enfouis dans les profondeurs à la suite des nombreuses guerres. Elle agit donc sur la dépollution du milieu.

Sa coquille la protège de son environnement et résiste aux agressions possibles du milieu marin. Seules des grosses pinces de crabes ou de crustacés, et la pieuvre arrivent à venir à bout de cette coquille. En effet, la pieuvre injecte un liquide noir qui, en moins d'une heure, perce la coquille par réaction chimique. Sa trompe s'introduit dans l'orifice et absorbe la moule.

Les deux coques articulées et presque identiques s'ouvrent grâce à des capteurs au grés des besoins d'énergie, de la lumière ou pour se nourrir. Dès que certains polluants sont dans le milieu, elle se referme automatiquement. Pour se déplacer, elle se laisse

porter par les courants jusqu'à s'accrocher sur un rocher, grâce à ses capteurs sensoriels. Au contact d'une paroi ou d'un rocher, la moule extrait son pied charnu : elle nettoie la surface, l'assèche et aspire l'eau en passant son pied et en constituant une cavité qui lui permet, par effet de ventouse, de créer un vide d'air tout en évacuant l'eau.

Elle fabrique, à base de protéines, un ciment qui résiste à l'humidité. Elle fabrique ensuite un filin, une corde très résistante de 3 à 5 mm, souple au contact du mollusque et rigide au contact du rocher, qui permet d'encaisser de fortes tractions dues aux courants et aux flux des marées. Elle produit ensuite un disque (sorte de plaque mousseuse), qui est collée au support et fixe la corde. Ce disque flexible, contient des bulles d'air pour s'adapter aux déformations du support et pour éviter qu'une fêlure éventuelle ne provoque la rupture du disque. Enfin, la moule fabrique une membrane imperméable qui enrobe le disque de fixation et le fil. Une fois cette membrane créée, elle retire son pied, se prélassse autour de son ancrage et se nourrit en filtrant l'eau. Pareils à une mère transporteuse, les flux de la marée apportent de la nourriture et balayent les déchets. La moule se nourrit de phytoplancton et filtre 20 litres d'eau de mer par jour.

Au bout de 2 ou 3 ans, l'agent d'étanchéité se dégrade, la membrane se délite dans l'eau et les matériaux se dispersent et sont consommés par d'autres organismes. Une partie peut également sédimenter au fond de l'océan. La moule pourra à nouveau s'installer dans un nouvel environnement.

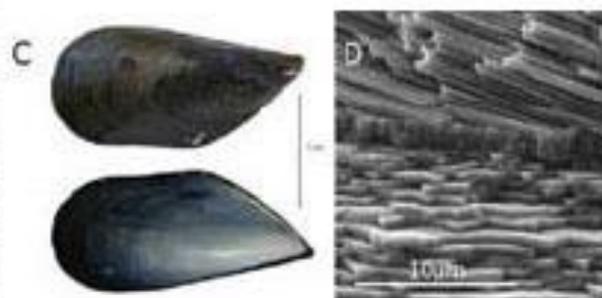


Fig. 2.2.a) Bivalve *Mytilus Edulis* et la transition entre sa couche nacrée et prismatique.

³⁹ B. PEUPORTIER, Eco-conception des bâtiments, bâtir en préservant l'environnement.. Ecole des Mines Paris, Presses.

Ces processus naturels, illustrés par la figure 2.2b), appliqués aux matériaux industriels amèneraient une matière première renouvelable, de grande qualité et sans grande consommation d'énergie, ni la production de déchets.

Les flux entrants et sortants à chaque étape sont très limités et ne déséquilibrent aucunement l'environnement local ou général. Les propriétés du matériau s'acquièrent lors des phases d'autoassemblage à l'échelle nanométrique, et ne nécessite pas d'énergie supplémentaire.

Ce matériau n'a aucun impact sur le réchauffement climatique, l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'acidification des eaux, et l'épuisement des ressources.

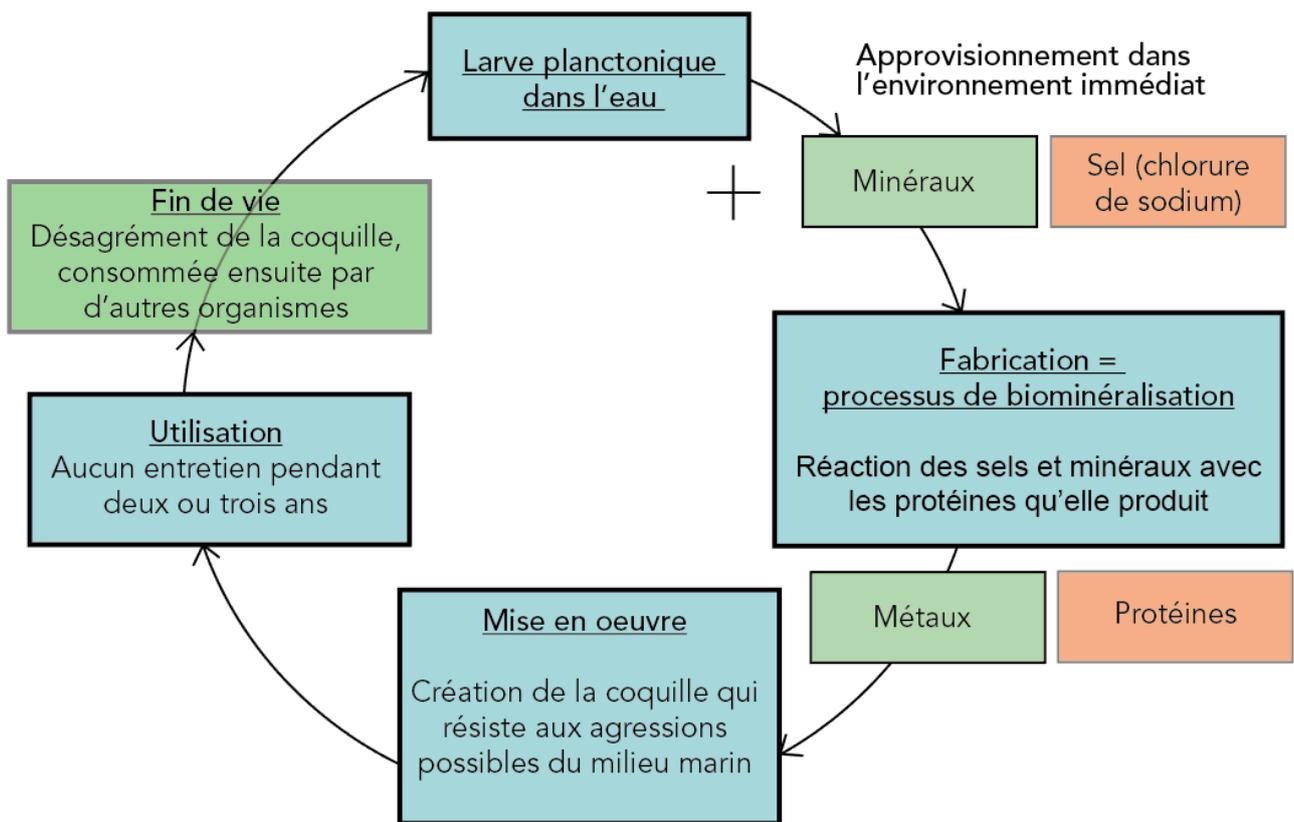


Fig. 2.2.b) Cycle de vie de la moule

La coquille de l'ormeau



Fig 2.2.c) Coquille d'Abalone, aussi appelée coquille de l'ormeau

La coquille de l'ormeau est faite de nacre, un lisse revêtement intérieur très dur (figure 2.2.c)

La nacre est un composite combinant un matériau inorganique puisé dans l'environnement proche (le carbonate de calcium) et un matériau organique, secrété par l'animal (huitre, ormeau...). Sa complexité réside donc dans les conditions de production.

La microstructure est contrôlée par une structure encore peu claire de « biominéralisation » qui règle l'interaction entre les deux composants.

En effet, la nacre est considérée comme un matériau hybride. Le matériau inorganique est formé de tablettes polygonales d'aragonite (une forme cristalline du carbonate de calcium CaCO_3). Il est inséré dans une matière organique.

Cette dernière, issue de l'animal est principalement composé de polysaccharides, et de protéines, et contrôle à la fois le type de phase et l'orientation cristalline du carbonate de calcium.

Les plaquettes monocristallines d'aragonite de 0,4 à 1,2 μm d'épaisseur et de 5 à 10 μm de dimensions latérales sont arrangées très régulièrement avec des chevauchements. Elles sont empilées selon le motif d'un mur de briques (figure 2.2.d) (a))

Les molécules ne nécessitent pas d'énergie extérieure pour se rassembler. En effet, lorsqu'elles se rencontrent, celles comportant une dent s'emboîtent

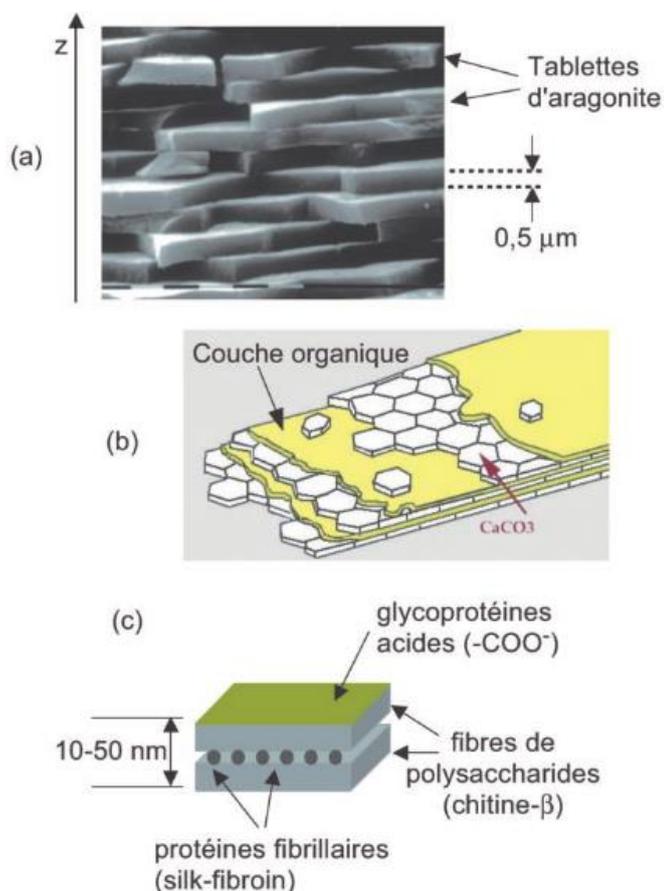


Fig. 2.2.d) Structure de la nacre. a) photographie par microscopie électronique de la nacre en coupe verticale. b) représentation schématique de la structure alternée organique / inorganique de la nacre c) composition de la couche organique.

consciencieusement avec celles comportant un trou. Cet assemblage s'opère donc à bas niveau énergétique.

C'est une question d'ordre.

Les protéines sont ouvertes à ce genre d'auto-assemblages en raison de leur forme et de leur « personnalité électrique » (la façon dont leurs charges sont distribuées).

Ces briques sont cimentées entre elles par de fines couches (de 10 à 50nm) de matériau organique (fin ciment de polymères mous) (figure 2.2.d)⁴⁰.

⁴⁰ CHEVALLARD C. et GUENOUN P., « Les matériaux biomimétiques », LIONS (laboratoire Interdisciplinaire sur l'Organisation Nanométrique et Supramoléculaire). <http://dx.doi.org/10.1051/refdp/200615501>

Le ciment polymère de la nacre est fabriqué avant les briques. Les cellules de l'organisme sécrètent des protéines, des polysides ou des lipides (en fonction des espèces) dans le fluide qui les entoure. Ces polymères cadres s'auto assemblent ensuite en structures tridimensionnelles définissant l'espace à minéraliser. Chaque pièce renferme de l'eau de mer saturée d'ions calcium et d'ions carbonate, de particules chargées qui s'agrègeront pour former un cristal de carbonate de calcium.

Les premiers ions tiendront lieu de noyaux ou d'agents de nucléation, et le reste des ions se fixera autour d'eux, formant un cristal d'une forme particulière.⁴¹

Les diverses formes, orientations et tailles des ions déterminent les qualités optiques ou électriques du cristal, s'il est dur ou mou. Il existe, dans la nature,

quatorze formes de cristal différentes. C'est donc la microstructure hiérarchique ordonné qui donne à la coquille de l'ormeau sa résistante très importante. En effet, la nacre est de l'ordre de 3000 fois plus résiliente que l'aragonite massive d'origine minéral. Si une fissure apparaît, la configuration en mur de briques lui fait suivre un tracé tortueux, bloquant sa propagation. La coquille se déforme donc sous la contrainte et se comporte comme un métal.

« Vous avez déjà essayé de sauter sur une coquille d'ormeau ? Une voiture pourrait leur rouler dessus qu'elle ne les perturberait pas ».

Humber, chercheur à l'université de Washington

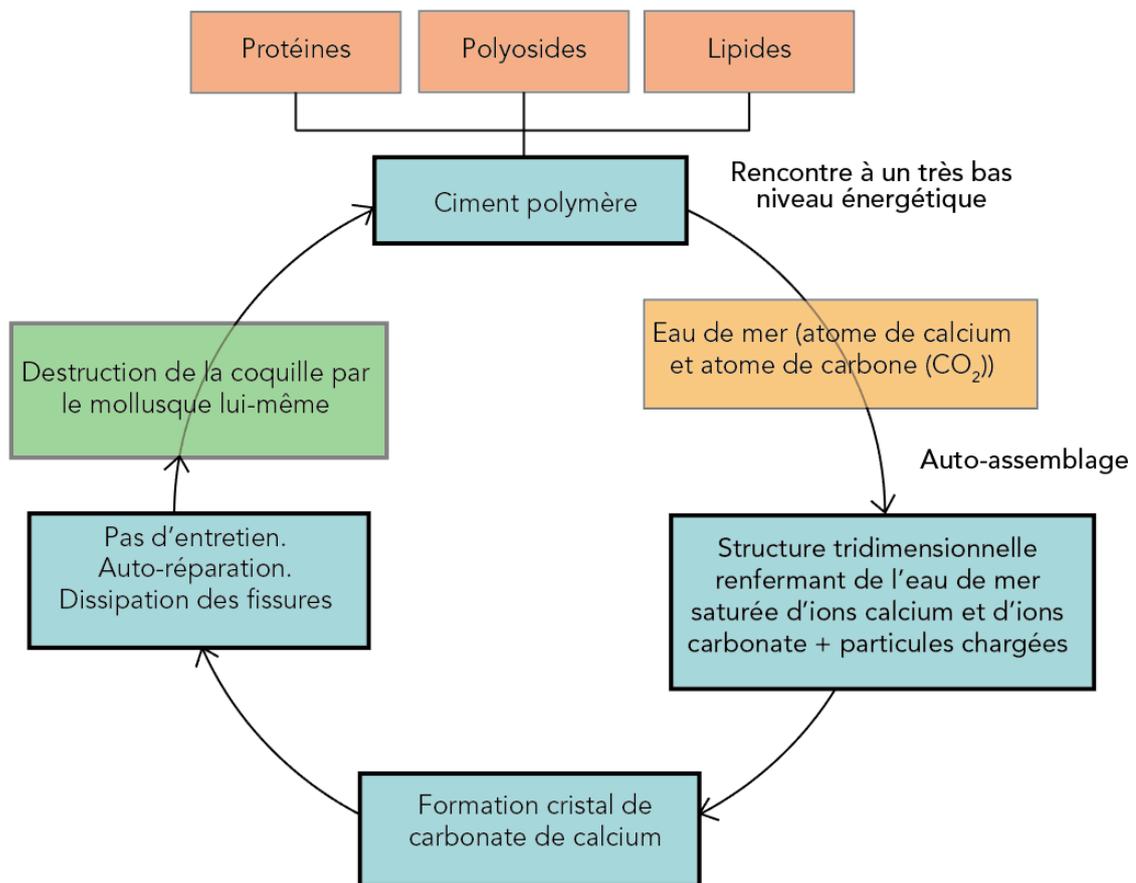


Fig 2.2.e) Cycle de vie de la coquille de l'ormeau

⁴¹ AJILI W. « Étude des processus de biominéralisation de la nacre chez l'ormeau européen *haliotis tuberculata* ». Chimie inorganique. Sorbonne Université, 2018. Consulté le 14/12/21

L'élaboration des matériaux par des processus biomimétiques fait appel à des mécanismes d'auto-assemblage supramoléculaire, organique et inorganique.

L'auto-assemblage est l'une des ficelles du métier de fabricant de matériaux de la nature. Alors que nous dépensons une grande quantité d'énergie pour construire les choses de haut en bas, en prenant des matériaux en vrac et en les taillant pour leur donner la forme voulue, la nature fait l'inverse.

Un sculpteur, par exemple, part d'un bloc homogène sans structure pour en faire un objet aux multiples détails, mais composé d'un matériau unique.

La nature, elle, élabore ses matériaux de bas en haut, non en construisant, mais en auto-assemblant. C'est une construction « *bottom up* », où est mis en place successivement des structures de tailles croissantes et de caractéristiques physico-chimiques variées. Les processus d'auto-assemblage organisent le matériau dès l'échelle nanométrique.

En conclusion, la chimie industrielle fabrique des produits finaux qui sont un mélange de chaînes polymères de tailles variées, pour la plupart trop longues ou trop courtes alors que la nature ne fait que ce qu'elle veut, sans laisser aucune trace (figure 2.2.e).

2.3. COMPARAISON DES PROPRIETES DES MATERIAUX

Entre ceux de la nature et ceux créés par l'homme

Suite à la réalisation des ACV du béton, de la moule, et de la coquille de l'ormeau, et avec les ressources acquises lors de mes recherches, de grands principes de fabrication et d'organisation se sont détachés. La figure 2.3.a) rassemble les informations que j'ai tiré de ces études et qui met en lumière les différences puissantes entre nos systèmes, et ceux de la nature.

Ces différences aident à comprendre pourquoi nos matériaux, comme le béton, ont un impact environnemental si néfaste tandis que les matériaux créés par la nature n'ont pas d'impact négatif sur leur environnement proche ou lointain. Une différence flagrante tient également de l'extraction de la ressource puis de ce qu'elle devient, du contraste entre une transformation linéaire et une économie circulaire.

	Ingénierie	Biologie
Composition atomique	Utilisation de tous les éléments du tableau périodique, dont le Fe, Cr, Ni, Al, Si, C, N, O ..	Utilisation d'un sous-ensemble restreint d'éléments non toxiques du tableau périodique : le carbone (C), l'hydrogène (H), l'oxygène (O) et l'azote (N) représentent 96% de la matière vivante.
Nature des matériaux	Polymères et élastomères Verres et céramiques Nombreux métaux et alliages	3 familles de polymères (protéines, polysaccharides, acides nucléiques), céramiques (sels de calcium, silice), variétés de composites
Structure / Architecture	Structure avec peu ou sans hiérarchie. Forme imposée de l'extérieur.	Structure hiérarchique dès l'échelle nanométrique, des atomes aux molécules, puis aux cellules, aux organismes ... Autoassemblage sous l'influence de l'environnement.
Fabrication	Différenciation entre structure et matière.	Fabrication ascendante, molécule par molécule, soit une organisation simultanée entre matière et structure.
Conditions de fabrication	Pouvant aller jusqu'à des températures très élevées (2000°C), avec des pressions et pH extrêmes. Economie linéaire gourmande en énergie et en ressources.	Fabrication additive à températures basses, conditions environnementales modérées (pression, valeur de pH). Mode de fabrication sobre en énergie, basée sur l'énergie solaire.
Propriétés mécaniques	Matériau cassant, faible contrôle de la fracturation.	Contrôle séparé de la rigidité et de la fracturation grâce aux polymères servant d'interface. Dissipation de l'énergie via la propagation des fissures. Combinaisons de phases dures et de phases molles.
Relation avec l'environnement	Très peu de réactivité par rapport à l'environnement	Réactivité par rapport à l'environnement. Recyclable.
Durabilité	Obsolescence très rapide. Dimensionnement en fonction des charges et contraintes de départ.	Capacité de croissance en réponse au stimuli de l'environnement et capacité d'auto-réparation.

Figure 2.3.a) Tableau comparatif des matériaux créés par l'homme et de ceux créés par la nature

2.4. D'UN CYCLE DE VIE LINEAIRE A UNE ECONOMIE CIRCULAIRE

Le cycle non viable de l'écologie industrielle, producteur de déchets

Comme nous l'avons vu avec le bloc de béton, les transformations linéaires résument le fonctionnement de l'écologie industrielle, qui s'oppose à celui des écosystèmes, reposant sur des transformations cycliques.

Comment la filière de la construction peut-elle viser une « économie sans déchets », comme celle existant dans la nature ?

Avant l'industrialisation, les ressources naturelles étaient moins abondantes et étaient utilisées localement. Dans cette économie de moyens, le réemploi était une pratique courante. Les révolutions industrielles ont repoussé les limites des transports et d'accès aux ressources et ont modifié notre manière de construire, avec l'abondance de matériaux bons marchés, directement envoyés dans la case « déchets » à la fin de leur utilisation (figure 2.4.a).

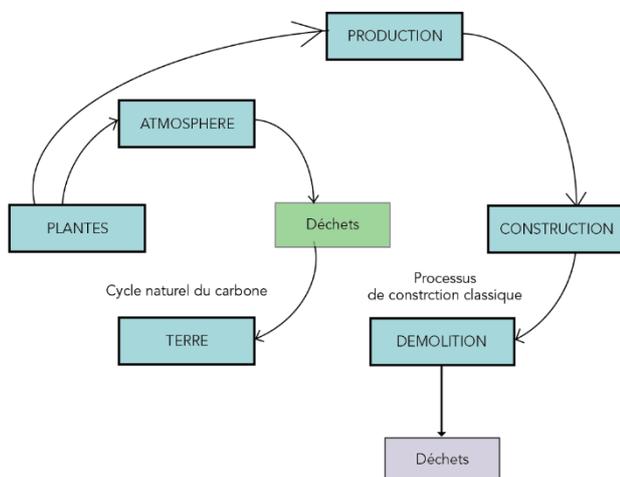


Figure 2.4.a) Cycle de vie du carbone, associé à celui des matériaux de construction actuels, non viable

D'après le code de l'environnement, un déchet est « tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble, abandonné ou destiné à l'abandon. »

Les déchets sont des composants majoritairement issus de la démolition, mis à la benne après un tri parfois sommaire. Il en existe plusieurs types :

○ Déchets inertes

Ils ne se décomposent pas, ne brûlent pas, et ne produisent aucune autre réaction physique, chimique ou biologique pouvant nuire à l'environnement ou à la santé.

Ce sont des matières minérales naturelles ou manufacturées. Ils peuvent être :

- Recyclés
Utilisés comme matériaux de construction de Travaux Publics (remblais, assises de chaussées ...)
« valorisés » lors de réaménagement de carrières.
- Non recyclés : déposés en décharge de classe 3 (enfouissement ou comblement sur site).

○ Déchets non dangereux / non inertes

Ce sont les métaux et leurs alliages, le bois, le papier, les cartons, les plastiques, la laine minérale, la peinture, le vernis, la colle, le plâtre, les déchets d'équipements électriques et électroniques, les déchets alimentaires. Hormis les métaux, ces déchets sont peu valorisés. Ceux qui sont non incinérés ou non recyclables sont déposés ou enfouis sur ou dans la terre.

○ Déchets dangereux

Ce sont les aérosols, les produits absorbants pollués aux hydrocarbures, le bois traité avec des substances dangereuses, les emballages, les pinces, les produits contenant du goudron, les piles ...

Ces derniers peuvent être transformés par solidification, mais finissent majoritairement dans des fosses de centres de stockage.

Les entreprises du BTP ont produit 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014, dont 19% proviennent du bâtiment.⁴²

L'économie circulaire

Aujourd'hui, face à l'épuisement des ressources, de nouvelles problématiques émergent et nous poussent à innover, autant dans les matériaux que dans l'usage que nous en faisons, surtout à la fin de leur vie. L'économie circulaire se développe et modifie notre usage des déchets. Les déchets de l'un peuvent devenir les ressources de l'autre.

Les principes de l'économie circulaire, définis par l'ADEME, sont :

1. L'utilisation modérée et la plus efficace possible des ressources non renouvelables
2. L'exploitation des ressources renouvelables respectueuses de leurs conditions de renouvellement
3. L'éco-conception et la production propre
4. Une consommation respectueuse de l'environnement
5. La valorisation des déchets en tant que ressources
6. Le traitement des déchets sans nuisance.

La majorité des déchets sont absorbés par des centres de stockages ou d'enfouissement, et l'essor de l'économie circulaire impulse de nouvelles pratiques. En effet, plusieurs solutions de valorisation sont possibles: la réutilisation, le recyclage, le réemploi.

Le **recyclage** dans le code de l'environnement (Art L541-1-1) est « *toute opération de valorisation par laquelle les déchets, y compris les déchets organiques, sont traités en substances, matières ou produits aux fins de leur fonction initiale, ou à d'autres fins* ». Les matériaux recyclés perdent leur forme et leur fonction initiale, et ont généralement des

⁴² MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, « Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014 », mars 2017. Consulté le 09/05/2020.

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/entreprises-du-btp-2275-millions-de-tonnes-de-dechets-en-2014>

⁴³ Ibid.

performances physiques et mécaniques inférieures à celle du matériau initial. De plus, rares sont les objets qui sont recyclables plusieurs fois.

En 2014, le recyclage des matériaux a évité 30 millions de tonnes équivalent CO₂ d'émissions de gaz à effet de serre, une économie de 165 kWh de consommation d'énergie cumulée, une économie de 350 millions de m³ d'eau, une réduction de l'eutrophisation des eaux douces et des eaux marines.⁴³

Le recyclage devient commun mais pas la réutilisation, ni le réemploi ; or, le recyclage fait perdre de la valeur au matériau.

Pour une question de rentabilité, les démolitions sont expéditives et les explosifs ou les marteaux piqueurs sont plus communs que le travail manuel pour la réutilisation.⁴⁴

La **réutilisation** dans le code de l'environnement (Art L541-1-1) est « *toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui sont devenus des déchets sont utilisés de nouveau* ».

Il est donc nécessaire de trier les déchets et de les réparer.

Le **réemploi**, dans le code de l'environnement (Art L541-1-1) se définit comme « *toute opération, par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets, sont utilisés de nouveau, pour un usage identique à celui pour lequel ils ont été conçus.* »

Les matériaux doivent donc être démontés, triés, transportés et stockés avec soin, de manière à être préservés en vue de leur remise en œuvre.

Ils ne doivent pas atteindre le statut de déchets. Le réemploi doit donc être pensé dès les premières étapes du projet, avec une qualité d'assemblage qui permet de « déconstruire » et non pas de « démolir ». Seulement 1% des éléments de construction sont remis en circulation intacte après leur premier usage.

En opposition aux méthodes de notre écologie industrielle, prenons un exemple d'économie circulaire existant dans la nature : la formation de roches blanches, au lac Alchichica, au pied d'un cratère au Mexique.

⁴⁴ BX1, « Autrement : pourquoi détruire quand on peut réutiliser ? » Oct 2020. Regardé le 23.10.21

<https://bx1.be/news/autrement-pourquoi-detruire-quand-on-peut-reutiliser/?fbclid=IwAR0jNCpSOE3s91we5QyUlnnyirsVkh21vuzAC-IWDhPEonT2BiK73WWGIGY>

Ces roches, des stromatolithes contemporains, sont formées grâce à des bactéries et aux échanges entre elles qui mettent en jeu des molécules simples, de quelques atomes.

En effet, les colonies microbiennes entraînent la précipitation de minéraux et forment les roches. Certaines bactéries transforment certains minéraux en d'autres par altération des premiers. Plusieurs centaines d'espèces de bactéries agissent dans cette transformation et correspondent à des groupes fonctionnels précis.

Les bactéries transforment le monde minéral.

Sur la figure 2.4.b), on distingue les couches de couleurs différentes. Sur la couche extérieure, des organismes fixent le carbone du CO₂ grâce à la photosynthèse. Les couches suivantes sont les zones de croissance des années précédentes, colonisées en grande partie par des bactéries qui consomment la matière organique. Il y a un échange perpétuel de matériau organique par les bactéries..⁴⁵



Fig. 2.4.b) Les différentes couches de matière organique d'un stromatolithe contemporain

Cet exemple nous montre que le recyclage n'existe pas dans le vivant ; les matières ne perdent pas de leurs propriétés et ne subissent pas de « downcycling » (décyclage). La nature apprend à utiliser ce qui est déjà là, ce qui a été produit. Elle réutilise la matière pour produire à nouveau de la forme.

L'innovation dans nos processus de fabrication et de fin de vie pour réduire notre impact environnemental, revient à revenir au cycle naturel du carbone (figure 2.4.c), et à procéder à une déconstruction, et non une

démolition, pour que les déchets d'un bâtiment deviennent les ressources d'un autre.

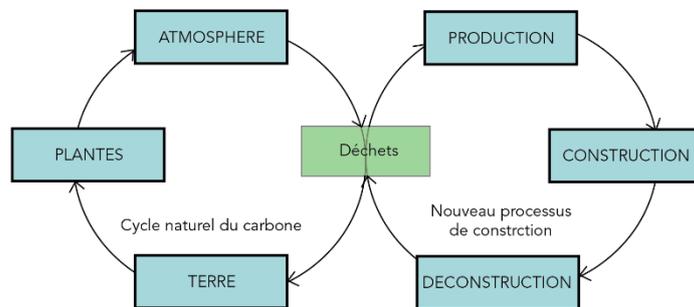


Figure 2.4.c) Un nouveau cycle de construction, circulaire et durable

La démarche « cradle to cradle »

Pour conclure et aller plus loin, l'essai *Cradle to Cradle* de William McDonough et Michael Braungart décrit les trois principes essentiels du cycle des matériaux que devraient respecter chaque concepteur :

- Eviter le système linéaire « du berceau à la tombe » (« cradle to grave »)

Les ressources utilisées finissent pour la plupart recyclés. Une partie du recyclage est considéré comme du décyclage car les matériaux se dégradent jusqu'à devenir des déchets.

- Utiliser les bons matériaux

W. McDonough et M. Braungart expliquent qu'être « moins mauvais » n'est pas pareil qu'être « bon ». Un plastique contenant plus de matières recyclables se dégrade toujours dans les océans pour être avalé par les poissons et devenir des perturbateurs endocriniens.

⁴⁵ GAULLIER V. et GIRARDOR R., « Le recyclage, une invention du vivant », mars 2015. Regardé le 10.12.21.

<https://leblob.fr/videos/le-recyclage-une-invention-du-vivant>.

○ Associer les matériaux de façon adéquate

L'assemblage des matériaux entre eux ne permet souvent pas leur recyclage ou la récupération de la matière première. Un exemple courant est le plancher composite, où le béton, une fois coulé, n'est plus dissociable de l'acier.

W. McDonough et M. Braungart cherchent à éliminer la notion de déchet en adoptant les principes des systèmes naturels. Leur démarche éthique d'éco-conception et d'application de l'économie circulaire est appelé « Cradle to Cradle », soit, en français, du berceau au berceau et est illustré par la figure 2.3.d)

Le système se résume à deux boucles infinies, celles des nutriments biologiques et celles des nutriments techniques, qui se rejoignent. Les fibres naturelles, faisant partie du cycle biologique, retournent à la nature à la fin de leur vie ou deviennent des nutriments pour faire pousser d'autres matériaux.

Concernant les métaux et les minéraux (cycle technique), après extraction et raffinage, ils devraient rester dans le système de façon permanente, en étant recyclés mais à un niveau de qualité supérieure.

Cette solution revient à revoir entièrement notre processus de conception et de gestion.

Maintenant que les analyses du cycle de vie du béton, d'organismes naturels, et que leur comparaison ont été faites, la dernière partie consiste à transposer certains principes du vivants décrits précédemment dans le processus classique du béton, et d'étudier des matériaux innovants développés dans les vingt dernières années, ayant un processus de conception et de gestion se rapprochant au plus du protocole « Cradle to Cradle » et de ce que peut faire la nature.

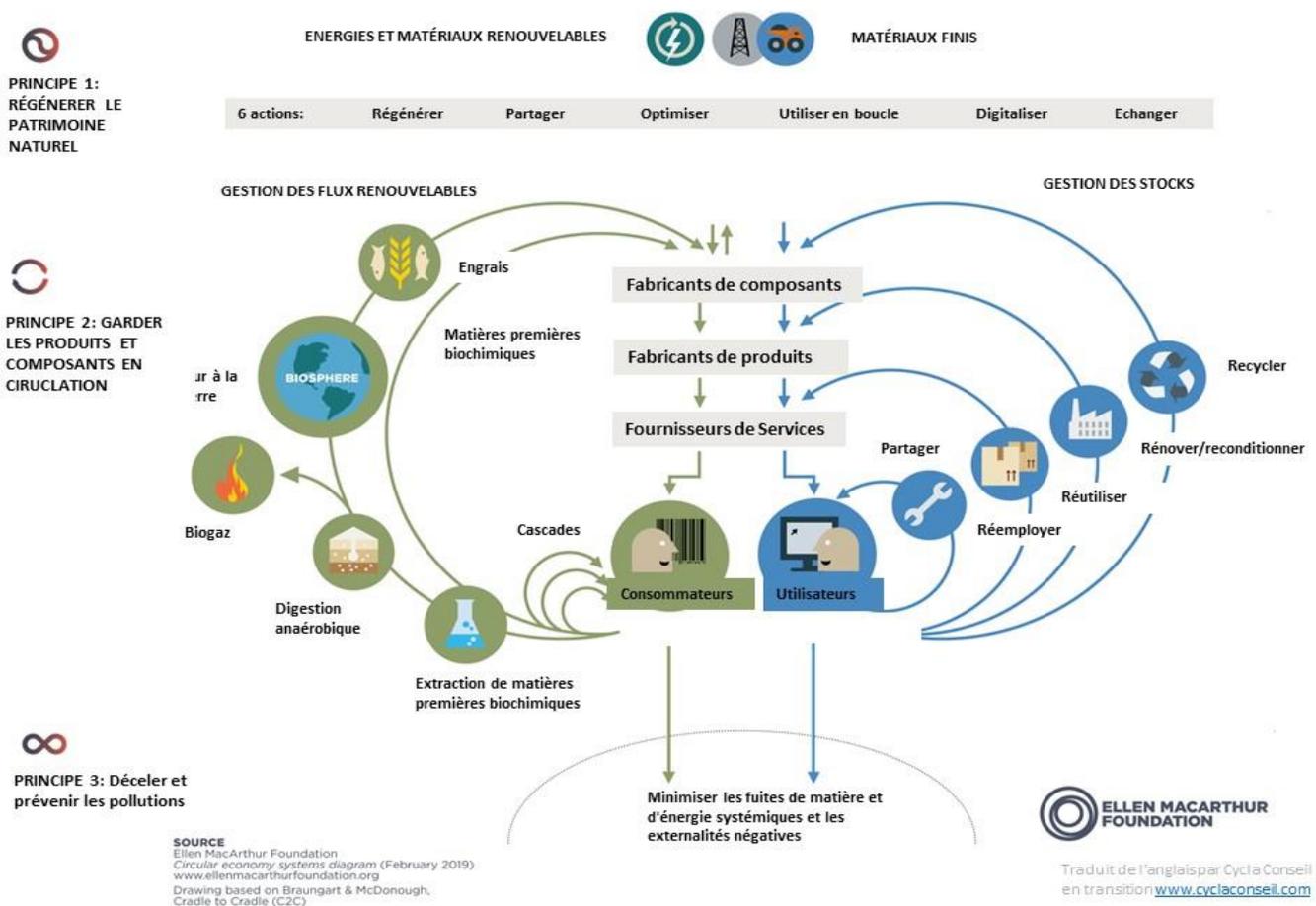


Fig. 2.4.d) Schéma de circulation des nutriments biologiques et techniques, élaboré par la Fondation Ellen MacArthur, adapté au protocole de conception Cradle to Cradle de W. McDonough et M. Braungart

3. LA REDUCTION DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL DES MATERIAUX

3.1. LES PISTES D'OPTIMISATION DU BETON

On parle beaucoup de béton « bas carbone » mais c'est un béton un peu « moins » carboné. L'objectif est d'obtenir un béton 0 carbone.

Nous l'avons vu précédemment, les étapes du cycle de vie de ce matériau avec celles de la nature sont différentes sur de nombreux points.

Comment diminuer l'énergie grise de certaines étapes du cycle de vie du béton en s'inspirant des systèmes du vivant ?

Comme les matériaux biosourcés séquestrant du CO₂ par photosynthèse, les matériaux cimentaires absorbent du CO₂ par carbonatation. Mais le CO₂ capté ne compense pas le CO₂ produit.

Des recherches sont faites pour compenser l'émission de carbone du ciment par l'utilisation d'agrégats carbo négatifs. En effet, le béton se recarbonate dans sa vie. Quand il est concassé en fin de vie pour servir d'agrégats dans de nouveaux bétons, on peut le recarbonater de manière accélérée, donc faire absorber du carbone à ce béton sous forme d'agrégats.

L'optimisation des bétons et bétons armés (optimisation de la formule et utilisation de granulats carbo-négatifs, qui sont pour l'instant « infrarecyclés ») est une des pistes.

D'autres pistes d'optimisation sont envisagées et développées dans cette partie, dans une démarche biomimétique :

- transformer l'économie linéaire en économie circulaire en trouvant une nouvelle fin de vie au béton.
- diminuer l'empreinte du clinker, et les combustibles qui chauffent à 1450°. Comment moins chauffer ? réutiliser cette chaleur pour une autre étape ? Capter le CO₂ ?
- diminuer l'empreinte carbone des ciments, en jouant sur la composition.
- augmenter la durabilité du béton grâce à des propriétés autocatrisantes.

Appliquer les principes d'économie circulaire

Il est nécessaire de passer d'une économie linéaire à une économie circulaire, et le béton ne peut échapper à ce changement de paradigme. La prise en compte de l'ensemble du cycle de vie de la matière est nécessaire, en anticipant son évolution future et en optimisant la gestion de la matière.

Le gisement annuel de béton de déconstruction est estimé à 19 ou 20 millions de tonnes. Ce dernier va croître avec la démolition d'ouvrages anciens en béton, datant de plus de 50 ans.

Pour appliquer les principes de l'économie circulaire, il ne faut plus démolir, mais bien déconstruire. Déconstruire doit s'apparenter à : défaire un agencement construit.⁴⁶

Lorsque la phase de déconstruction est anticipée, elle peut rejoindre celle de conception. Les déchets inextricables se transforment en stock.

Le béton issu des démolitions doit être vu comme une matière à exploiter, une mine riche pour le réemploi. (figure 3.1.a⁴⁷).



Fig. 3.1.a) Les éléments en béton provenant de démolitions et destinés à être recyclés sont très divers.

⁴⁶ DELON N. et CHOPPIN J., *Matière grise*, 2019, éditions Pavillon de l'Arsenal.

⁴⁷ PG / R&V « Projet national Recybéton, la levée des freins ». Juin 2019. https://www.pnrecybeton.fr/wp-content/uploads/2019/09/RV-65_p32-36-Dossier_Recybeton.pdf

La filière béton pilote un projet national de recherches, « Recybéton », qui vise à développer deux axes de réflexion :

- la réutilisation de l'ensemble des matériaux issus des bétons déconstruits dans de nouveaux bétons.
- le recyclage des matériaux issus de la déconstruction comme matière première pour la production de ciment, c'est-à-dire comme liant hydraulique (pour la production de clinker) ou comme ajout dans de nouveaux ciments.⁴⁸

L'objectif du projet est de réutiliser tous les éléments produits par le recyclage du béton, y compris les fines, sables, composants du ciment.

Le béton concassé, en granulats recyclés

Aujourd'hui, la part de granulats recyclés est estimée à 10% de la production nationale de granulats. De plus, ces derniers sont utilisés en majorité pour remplir les plateformes routières. Le béton subit donc un décyclage.

Certains pays limitrophes, comme l'Allemagne, ou la Suisse, réalisent déjà des bétons structurels incluant du granulat recyclé.

Le béton concassé dû aux déconstructions pourrait représenter 10 à 30 % de granulats entrant dans la composition des bétons recyclés⁴⁹ et permettrait d'éviter la mise en décharge du béton à la fin de sa vie.

Pour permettre ce recyclage et optimiser la qualité des granulats recyclés, les déchets doivent être triés pour isoler le béton. Ce dernier est concassé, déferraillé et passé au criblage. La détection et la séparation de particules indésirables doit être mise en place pour obtenir des matériaux déconstruits purs.

Le recyclage nécessite donc une organisation continue et rigoureuse (tri, stockage, etc.) tout au long de la chaîne d'élaboration, depuis l'étape du diagnostic avant démolition, le chantier, le transport vers les plateformes de recyclage.

⁴⁸ « Contexte du projet National Recybéton »

<https://www.pnrecybeton.fr/> Consulté le 07/11/2021

⁴⁹ GAUTIER E., « Le recyclage du béton dans le béton, ça marche ! », octobre 2016. Consulté le 08/11/21.

https://bybeton.fr/grand_format/recycler-beton-beton-2

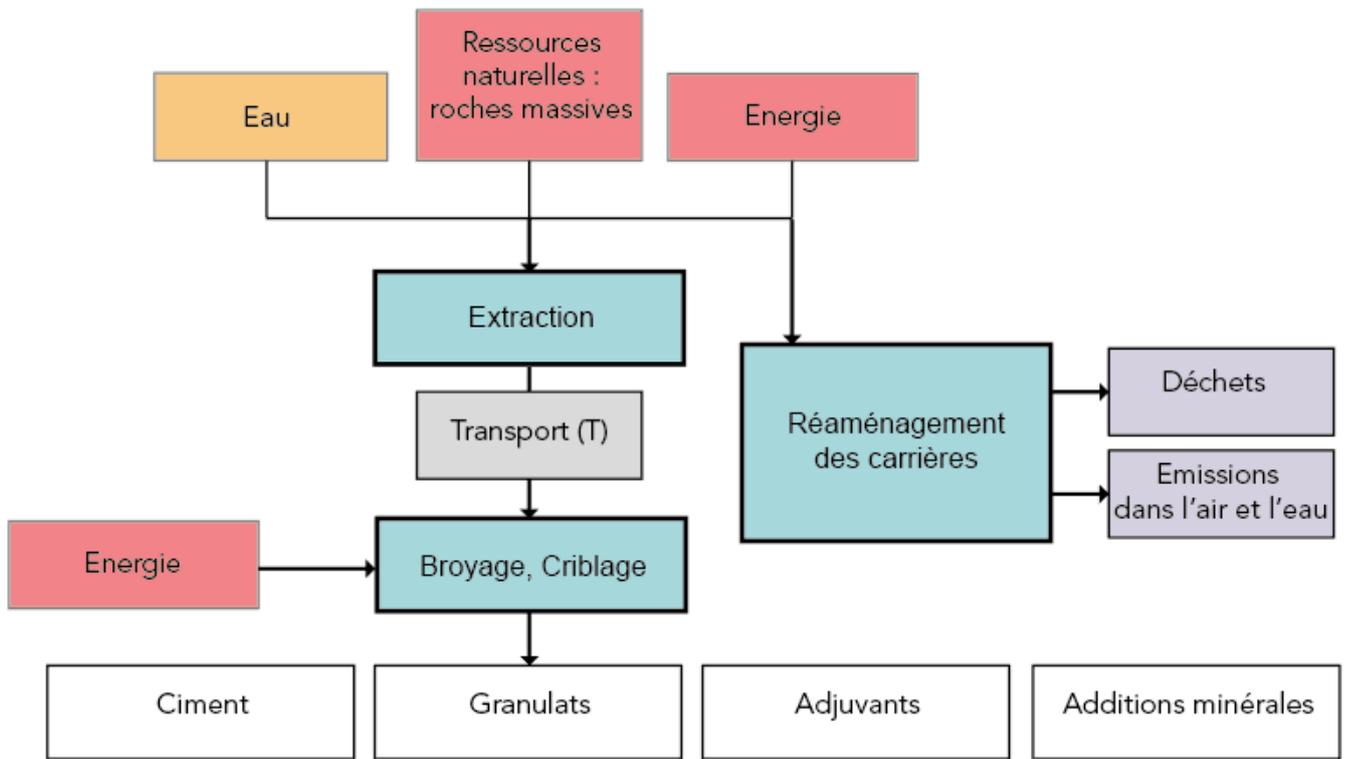


Figure 3.1. b) Production de granulats venants de roches massives

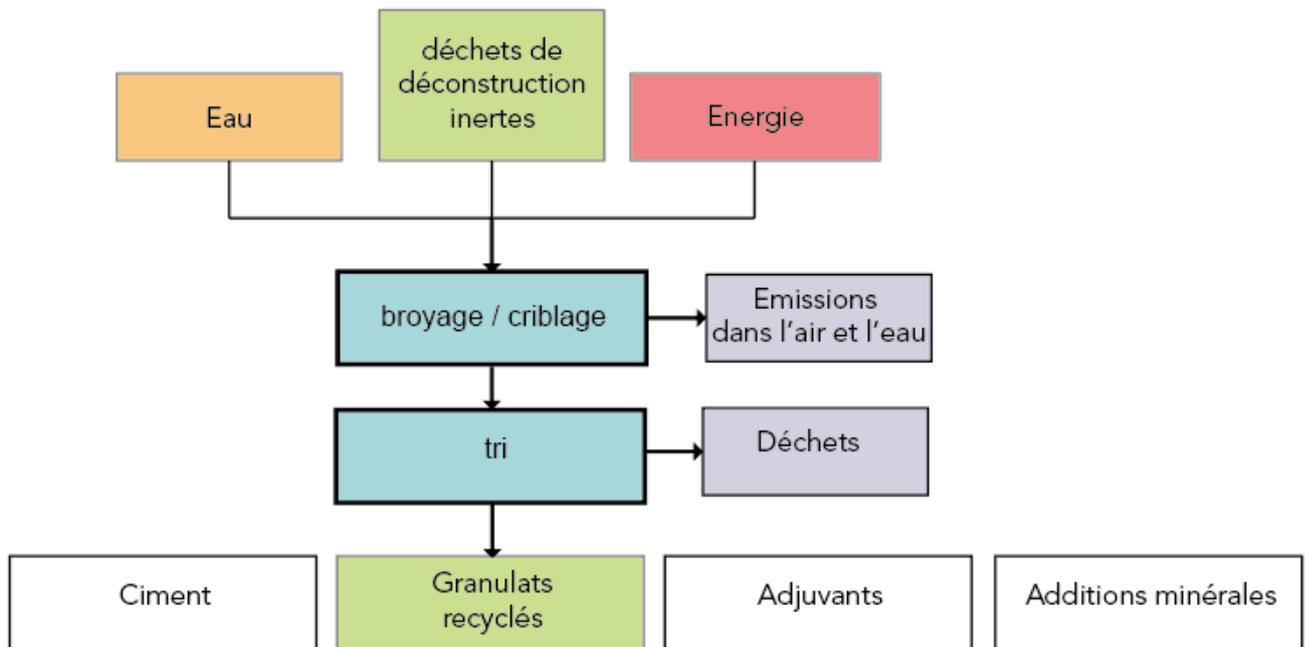


Figure 3.1. c) Production de granulats recyclés

Concernant les plateformes de recyclage, une grande hétérogénéité entre département apparaît.

Certaines localités n'ont aucune plateforme de recyclage à moins de 30 km de leur agglomération principale.

Or, le recyclage est corrélé au nombre de plateformes adaptées aux volumes de déchets traités.

Le marché du recyclage doit rester local, les matériaux étant lourds et leur empreinte environnementale étant dominé par les transports.

Le béton recyclé n'est pas trouvable en zone rurale.

La majorité des efforts de la filière béton se concentre donc sur le recyclage des granulats, mais quel est l'effet sur l'impact environnemental du béton ?

Les figures 3.1.b) et 3.1.c) comparent les étapes du cycle de vie présentes dans le béton qui concernent les granulats. Le béton à la fin de sa vie peut être recyclé entièrement et transformé en déchets valorisés (granulats pour un nouveau béton).

La figure 3.c) montre que des déchets sont produits suite au broyage, criblage, et tri, mais ces derniers représentent 1 à 2 kilos de déchets éliminés pour une tonne de déchets entrants sur le site de valorisation⁵⁰, ce qui est très peu.

La figure 3.1.d) résume la différence d'impact environnemental entre le cycle de vie 3.1.b) et le cycle de vie 3.1.c).

Analysons certains impacts environnementaux :

Impact du réchauffement climatique

Concernant le réchauffement climatique, les bénéfices environnementaux associés à la valorisation de la matière secondaire permettent de couvrir 95% des impacts du traitement des déchets.

Produire 1 tonne de granulats recyclés génère environ 40% moins de gaz à effet de serre que la production de 1 tonne de granulats naturels.⁵¹

Cette observation peut s'étendre à tous les autres indicateurs (sauf épuisement des ressources), qui, avec la « valorisation granulats » des déchets de construction, couvrent entre 58 et 203% des impacts liés au traitement initial des déchets.

Impact de l'épuisement des ressources

L'appauvrissement en granulats est quantifié par les éléments minéraux comme la silice ou le calcaire, qui ont des facteurs de caractérisation extrêmement faibles voire nuls (ressources considérées avec un très faible appauvrissement).

De fait, le bénéfice lié à la non-extraction de ces matériaux du sous-sol n'est pas mis en évidence.

Des indicateurs supplémentaires comme « la quantité de granulats naturels non prélevés dans l'environnement » ou « évitement de stockage de déchets » permettraient de mettre en lumière les tonnes de granulats naturels économisées grâce au recyclage.

Par ailleurs, d'autres bénéfices sont à prendre en compte même s'ils ne font pas partis de l'ACV : des impacts évités par l'utilisation de granulats recyclés sur les paysages et la biodiversité.

Quelle est l'influence de l'utilisation de granulats recyclés sur l'ACV générale du béton ?

La figure 3.1.e) compare les indicateurs d'impacts de quatre bétons ayant un pourcentage de granulats recyclés différent.

Seuls quelques indicateurs, comme l'acidification atmosphérique, ou l'eutrophisation, sont un peu moins importants pour des granulats recyclés que pour des granulats issus de roches massives. Certains autres indicateurs se révèlent supérieurs avec des granulats recyclés. Les distances de transports des granulats recyclés sont souvent supérieures à celles des granulats naturels, compte tenu de l'emplacement des carrières et des plateformes de recyclage.

La recherche du circuit court est donc un aspect à considérer.

Les écarts sont étonnamment très modérés. Mais ils s'expliquent par l'effet de dilution dû au ciment (d'autant que le ciment utilisé pour cette étude est un CEM I).

⁵⁰ UNPG, Rapport « Module d'information environnementale du traitement de déchets de déconstruction en vue de produire des granulats ». Septembre 2017. Consulté le 06.01.2022. <https://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-mie-traitement-de-dechets-pour-granulats-recycles-2017-1.pdf>

⁵¹ UNPG « Module d'information environnementale de la production de granulats recyclés », Septembre 2017. Consulté le 06.01.2022 <https://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-mie-production-granulats-recycles-2017-1.pdf>

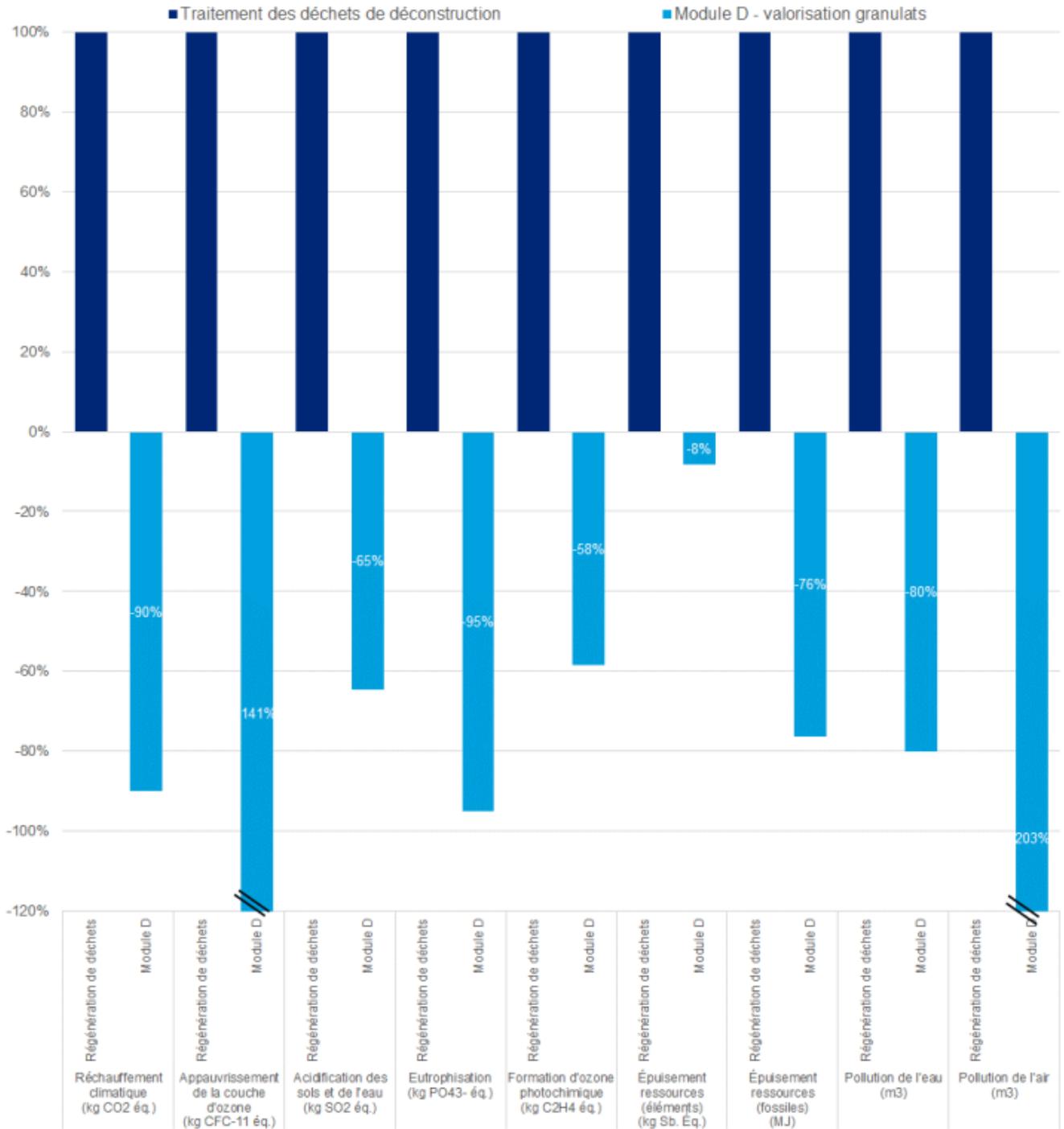


Figure 3.1. d) Comparaison des impacts environnementaux du traitement de déchets de déconstruction et de la valorisation des granulats recyclés.

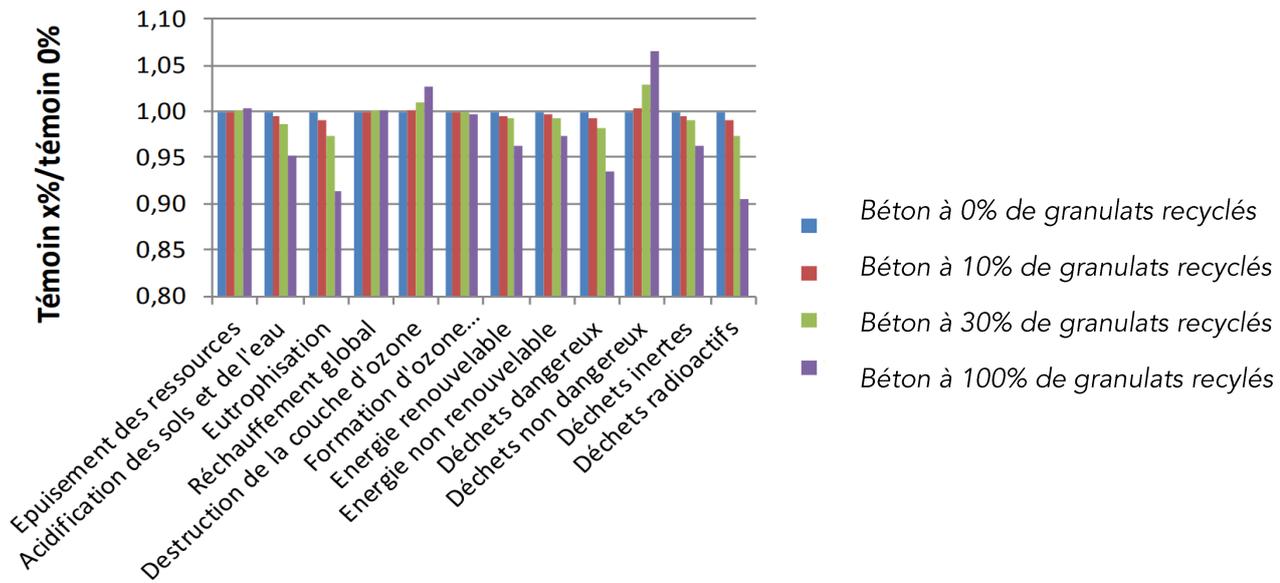


Fig. 3.1.e) Influence du taux de substitution sur l'ACV

De plus, un béton avec des granulats recyclés à 100% a besoin d'un peu plus de ciment et d'adjuvants pour avoir les mêmes propriétés qu'un béton ayant 100% de granulats naturels.⁵² Et ajouter du ciment revient à augmenter significativement l'empreinte carbone.

La solution réside donc entre un équilibre entre la teneur en granulats recyclés et en ciment, et les distances de transport entre les sites de démolition, de recyclage et de dépôt.

Conclusion

Compte tenu des mesures mises en place et projetées par l'industrie du béton, la boucle du « béton dans le béton » est loin d'être aussi fluide que les systèmes cycliques connues dans la nature. Les transformations du béton recyclé en granulats d'un nouveau béton représente une petite avancée vers l'économie circulaire ; le béton recyclé n'a pas encore tout à fait fait ses preuves, lorsqu'on regarde les indicateurs, environnementalement parlant (cela étant dû au ciment, nous verrons dans la prochaine partie les pistes issues du biomimétisme en cours pour diminuer son impact environnemental).

Pour obtenir un cycle vertueux, les roches alluvionnaires devraient être remplacées par des granulats recyclés et le béton d'utilisation ne devrait

pas être concassé, mais chaque élément (granulat, ciment, eau), devrait être séparé pour être réutiliser dans son domaine premier.

Malheureusement, ce n'est pas encore envisageable aujourd'hui car l'énergie nécessaire à leur décollement (méthodes thermiques et chimiques) est beaucoup trop importante.

⁵² DE LARRARD F. Conférence « Le recyclage, une solution à la raréfaction des sables ? » <https://www.x-environnement.org/reunions-debats/interventions/231>

Ciment inspiré du processus de biominéralisation

Comme nous l'avons vu dans la première partie, la fabrication du ciment est très énergivore ; elle nécessite de chauffer à 1450 °C un mélange de calcaire et d'aluminosilicates (argile). Plusieurs pistes sont actuellement développées pour produire un ciment « vert », plus respectueux de l'environnement.

L'entreprise Calera

Le fondateur Brent Constantz de l'entreprise Calera, aux Etats-Unis, s'inspire de la façon dont les coraux construisent les récifs par biominéralisation.

Ce processus de décomposition de substances complexes de grande taille d'origine organique ou minérale permet aux organismes marins de former des structures de carbonate de calcium grâce au CO₂.

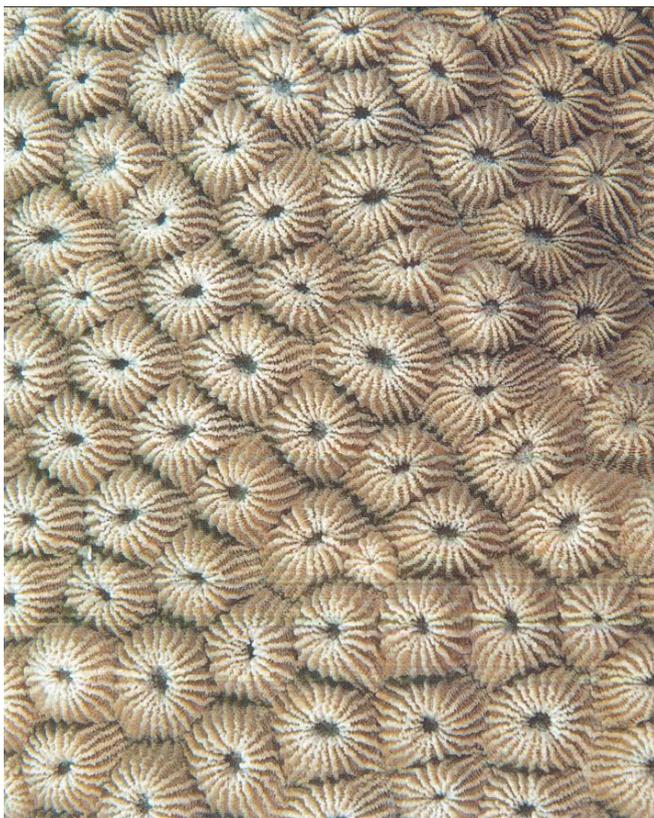


Fig 3.1.f) Processus de biominéralisation des coraux et autres organismes marins.

En effet, Les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère de la terre étaient plus élevées dans le passé ; les organismes marins ont utilisé le CO₂ pour former des structures de carbonate de calcium qui se sont déposées au fond de l'océan au fil du temps. On estime que 100 millions de milliards de tonnes de CO₂ sont stockées dans les archives géologiques sous forme de carbonate de calcium.

La biominéralisation séquestre un atome de carbone avec chaque atome de calcium dans le processus de formation du carbonate de calcium (figure 3.1.f).

A l'opposé, pour la fabrication du ciment, une molécule de dioxyde de carbone est émise pour chaque atome de calcium.

Dans le procédé proposé par l'entreprise Calera, le CO₂ n'est plus émis lors de la cuisson mais devient élément nécessaire à la production de ciment.

Le CO₂ est recyclé car récupéré dans les industries (centrales nucléaires, serres) qui se trouvent à proximité des usines de béton. Il devient donc une matière première rentable.

La source d'alcalinité et de calcium nécessaire à la conversion du CO₂ peut provenir des flux de déchets industriels (comme l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂)) ou peut être constituée de flux séparés : une source d'alcalinité, telle que la soude caustique (NaOH), qui peut être fournie à partir du processus de fabrication industrielle classique, et une source de calcium, telle que le chlorure de calcium, pouvant se trouver naturellement ou se trouver dans les flux processus chimiques.

L'eau de mer doit être pompée et gardée dans des réservoirs de stockage. Ce processus génère de l'énergie et dégage des émissions. Si l'eau de mer est utilisée, il faut donc créer un circuit le plus court possible entre la cimenterie, les réserves d'eau et les centrales électriques (d'où viennent le CO₂).

Si l'eau de mer n'est pas disponible localement, des saumures souterraines doivent être extraites.

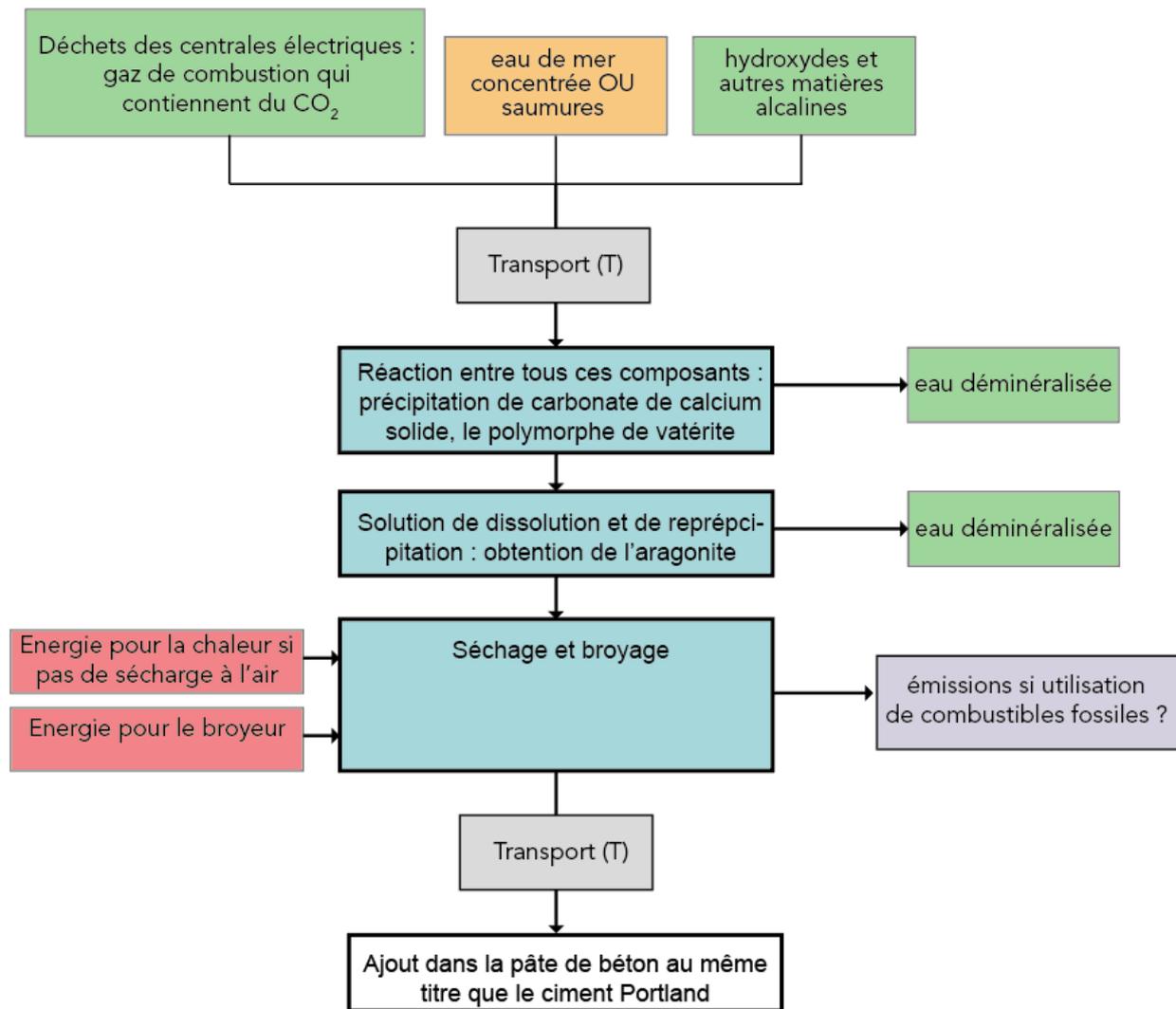


Fig 3.1.g) Processus de fabrication du ciment pensé par l'entreprise Calera

Le ciment peut être produit à des températures inférieures à 90°C⁵³, ce qui réduit significativement les émissions de CO₂ dues à la combustion de combustibles.

La méthode consiste à capturer et convertir le CO₂ en une forme solide du carbonate de calcium, le polymorphe de vatérite.

En ajoutant de l'eau et des additifs exclusifs, la vatérite se transforme via une réaction de dissolution et de re précipitation en aragonite.

L'aragonite est un matériau de très grande résistance (cf la nacre).

Après être séché et broyé, le matériau est produit sous forme d'une fine poudre blanche à écoulement libre. Il peut fonctionner comme un matériau de ciment supplémentaire (SCM) dans les mélanges de béton traditionnels ou peut remplacer une partie du ciment Portland, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone globale du béton traditionnel. Il a été déjà utilisé pour la construction de trottoirs et de travaux de nivellement dans un immeuble de bureaux, en remplaçant 15% du ciment Portland.

Le produit Calera peut également être utilisé comme seul ciment ou système de liant dans les produits en béton.

Calera a développé des produits de panneaux muraux et de panneaux de ciment dans lesquels le

⁵³ « Calera: Entrepreneurship, Innovation, and Sustainability ». Consulté le 06/01/21. https://saylordotorg.github.io/text_sustainability-

[innovation-and-entrepreneurship/s09-04-calera-entrepreneurship-innova.html](https://saylordotorg.github.io/text_sustainability-innovation-and-entrepreneurship/s09-04-calera-entrepreneurship-innova.html)

liant unique peut être utilisé à la place du gypse, de l'oxyde de magnésium, du silicate de calcium ou du ciment Portland.

Aujourd'hui, l'entreprise Calera exploite une usine pilote qui produit jusqu'à deux tonnes de ciment par jour à partir de dioxyde de carbone et de déchets industriels, séquestrant environ quatre dixièmes de tonne de dioxyde de carbone dans chaque tonne de matériau.

Ce processus est un exemple d'un système naturel (ici la formation des récifs coralliens), dont les principes ont été transposés à l'échelle industrielle.

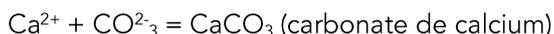
On ne connaît pas encore les performances de ce ciment dont les procédés de fabrication restent assez secrets ; mais si cette approche s'avère concluante, elle représentera un tournant dans la fabrication du ciment, de son impact environnemental et économique.

Carboncure

CarbonCure est une entreprise développant un concept similaire à Brent Constantz, depuis 2013. La technologie développée consiste également à injecter du dioxyde de carbone dans le ciment Portland, avec de l'eau. Si une cimenterie ne séquestre pas son propre dioxyde de carbone (et la plupart ne le font pas), le CO₂ doit être capté lors de processus industriels (CO₂ recyclé).

CarbonCure injecte du CO₂ à l'état gazeux dans le béton frais via la « Valve Box ». Le dosage est contrôlé par un boîtier de contrôle, qui est synchronisé avec le logiciel de la salle de contrôle - le procédé est donc aussi facile et simple que d'ajouter un adjuvant.

Les réactions qui ont lieu dans le béton sont les suivantes (figure 3.1.h)⁵⁴ :



Ce minéral, le carbonate de calcium, peut améliorer la résistance du matériau de 10 à 20 %, d'après le

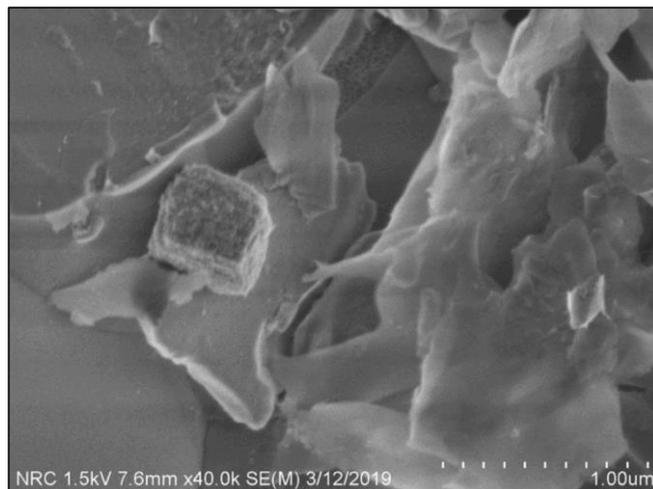


Fig 3.1.h) Cette image de dimension 400 nm montre les nanoparticules de carbonate de calcium résultant de la minéralisation, qui se forment immédiatement après l'injection.

directeur technique de la société, Kevin Cail, ce qui permet de réduire la quantité de ciment dans le produit tout en maintenant la même résistance.

Ce nouveau béton peut être utilisé pour ses usages commerciaux et résidentiels.

Cette technologie permet d'économiser 17kg d'émissions de CO₂ par mètre cube de béton, et le CO₂ ne sera jamais dégagé dans l'atmosphère, même si la structure en béton est démolie.

L'empreinte carbone du béton est donc réduite de 6%.⁵⁵



Fig 3.1.i) 725 Ponce, immeuble de bureaux fait de béton CarbonCure.

⁵⁴ Consulté le 23/12/21. <https://www.carboncure.com/>.

⁵⁵ Consulté le 23/12/21. <https://www.carboncure.com/>

Une vingtaine d'installations de bâtiments ont utilisé des blocs fabriqués selon le procédé de CarbonCure depuis sa commercialisation en 2013.

Le bâtiment 725 Ponce (figure 3.1.i), à Atlanta, en Georgia, construit en 1019, est composé de 36 999 m² de béton CarbonCure, ce qui a permis d'économiser 680 tonnes de CO₂ par rapport à un béton classique, soit l'équivalent de CO₂ absorbé par 360 hectares de forêt.

Augmentation de la durabilité grâce au béton auto-cicatrisant

L'auto-réparation est un domaine qui sépare l'ingénierie et la biologie. Aucun bâtiment n'est « vivant » au même sens que les organismes de la nature.

Aujourd'hui et assez couramment, des microfissures peuvent s'étendre et atteindre les armatures en acier du béton armé, qui se corrodent et, exposées à l'eau, à l'oxygène et éventuellement au CO₂ et aux chlorures, mettent en danger la structure du bâtiment.

Pour augmenter la durabilité du béton, plusieurs chercheurs ont développé des bétons autocicatrisants, certains grâce à des bactéries, d'autres grâce à des champignons, mais toujours mettant en jeu une réaction de précipitation qui comble les vides par du carbonate de calcium.

L'utilisation de spore fongique

Les champignons constituent le groupe d'organismes eucaryotes le plus riche après les insectes, l'ampleur de la diversité étant estimée entre 1,5 et 3 millions d'espèces.

Le champignon *T. reesei* n'est pas un pathogène humain. Malgré sa présence très répandue dans les sols tropicaux, l'espèce n'a pas d'effet néfaste sur les plantes aquatiques ou terrestres ni sur les animaux. Il s'adapte aux conditions difficiles du béton, y compris une alcalinité élevée, le manque d'humidité, d'oxygène et de nutriments.

Les champignons peuvent également favoriser la minéralisation du calcium dans le béton.

Les chercheurs de l'Université de Binghamton travaillent depuis 2013 sur ce sujet et ont publié un article "*Interactions of fungi with concrete : significant importance for bio-based self-healing concrete*" dans la revue universitaire *Construction & Building Materials*.⁵⁶

Ils se sont inspirés de la capacité du corps humain à se guérir de ses coupures, des contusions, et os cassés. En effet, la peau absorbe des nutriments pour produire des nouveaux substituts et guérir les parties de peau abîmées.

Les chercheurs ont mélangé au béton le champignon *Trichoderma reesei*. Ce dernier reste en sommeil jusqu'à l'apparition de la première fissure dans le béton.⁵⁷

« Les spores fongiques (corps fructifères du champignon, produit par les champignons pour accomplir leur cycle de vie), ainsi que les nutriments, sont placés dans la matrice de béton pendant le processus de mélange. Lorsqu'une fissuration se produit, l'eau et l'oxygène pénètrent. Avec suffisamment d'eau et d'oxygène, les spores fongiques dormantes germent, se développent et précipitent du carbonate de calcium pour guérir les fissures »

Jin Congrui, chercheur à l'université de Binghamton

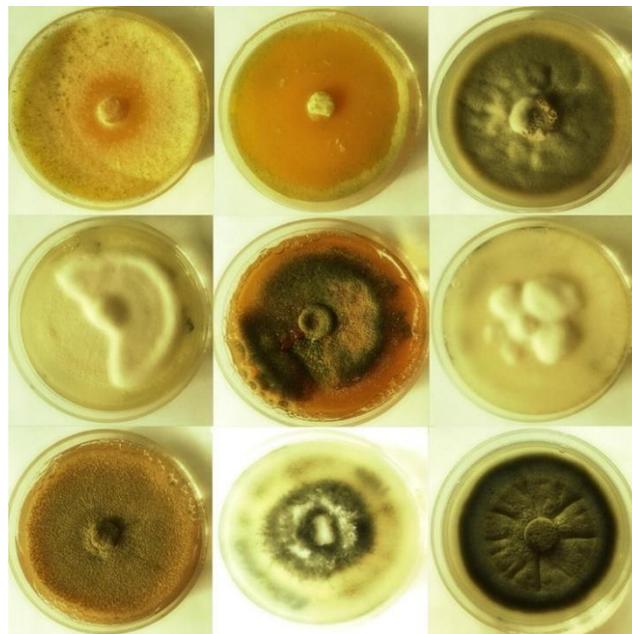


Fig. 3.1.j) Analyse au microscope optique de la croissance fongique

⁵⁶ FLORES R. « Using fungi to fix bridges ». Binghamton University. <https://www.binghamton.edu/news/story/938/using-fungi-to-fix-bridges>

⁵⁷ FAUCOMPRES P. « Le béton de champignons auto-cicatrisant : une solution durable aux infrastructures qui fissurent ? » <https://www.build-green.fr/>. Consulté le 19/06/2020.

Lorsque les fissures sont complètement remplies, les champignons se reconstituent en spores. Ce propos est illustré par la figure 3.1.j), montrant la transformation du champignon *T. reesei*.

Ils peuvent être réactivés lorsque les conditions environnementales deviennent favorables.

Des agents d'entraînement d'air sont utilisés pour créer des vides d'air supplémentaires dans la matrice du béton afin de faciliter l'hébergement des spores fongiques (figure 3.1.k) ⁵⁸

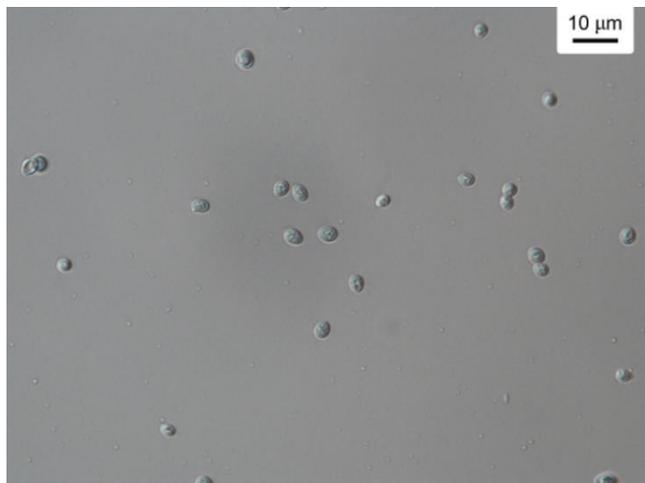


Fig. 3.1. k) Le diamètre des spores de *T. reesei* (de forme ronde à ovale) semble être typiquement de l'ordre de 3,5 µm à 4,5 µm.

La recherche est encore à ses débuts et aucun produit n'est encore commercialisé, le problème étant la capacité de survie du champignon dans l'environnement compliqué du béton.

D'autres chercheurs ont également développé cette propriété d'auto-cicatrisation, mais en utilisant des bactéries.

⁵⁸ LUO J. « Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete » <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817326399?via%3Dihub>. Consulté le 19/06/2019.

⁵⁹ « Béton autocicatrisant, dépollution, recyclage... Ces startups qui vont armer le béton pour être plus responsable ». Consulté le 20/06/2020.

L'utilisation de bactéries

Le béton peut être considéré comme un environnement plutôt difficile pour les bactéries en raison de son pH alcalin élevé (pH > 10) et de sa complexité.

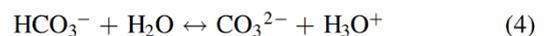
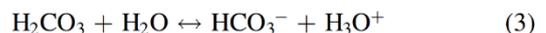
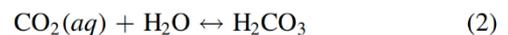
Cependant, cet environnement convient très bien à un groupe spécifique de bactéries: les bactéries alcali-résistantes. Ces bactéries se développent dans des conditions alcalines pour un pH > 9. Dans ces bactéries, seules celles génératrices de spores peuvent vivre longtemps à l'intérieur du béton et être actives lorsqu'une fissure apparaît. Elles peuvent vivre jusqu'à 200 ans et ont une taille comprise entre 0,8 et 1 µm.

Ces bactéries sont faciles à cultiver et à manipuler en laboratoire, et sont inoffensives pour l'homme.

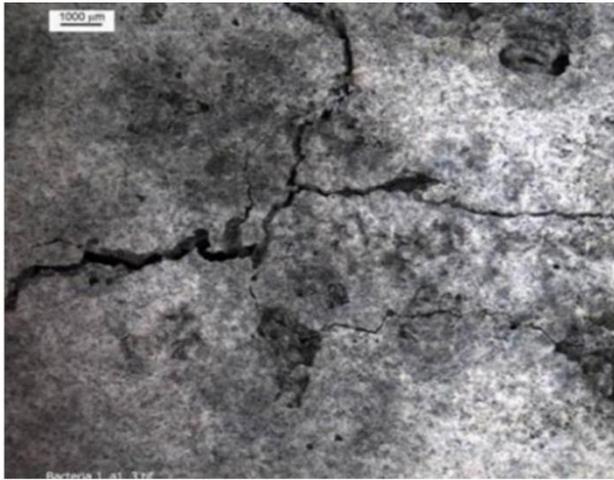
Basilisk, une start-up venue des Pays-Bas et le docteur Henk Jonkers de l'université technique de Delft ont développé un béton auto-cicatrisant, utilisant ces bactéries. Ces dernières sont injectées dans le béton et lorsqu'il contient de l'eau, de l'oxygène et des nutriments, elles se multiplient et se dispersent dans toute la fissure. Elles convertissent ensuite les nutriments en carbonate de calcium. Aujourd'hui, ce procédé permet à des fissures de 0,8 millimètres de s'autoréparer. ⁵⁹

Essayons de comprendre le phénomène scientifique qui permet de boucher cette fissure ⁶⁰:

En milieu aqueux, le CO₂ produit par les bactéries se dissout selon les équations (1) à (4) :



⁶⁰ JONKERS H.M. et WIKTOR V. Brevet "Bacteria-based concept : from concept to market". 2016. Consulté le 4.05/2019. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0964-1726/25/8/084006/pdf>



Before



After

Fig. 3.1.h) Le béton autocicatrisant (image de l'université de Delft).

Dans un environnement riche en calcium et un pH alcalin (tel que le béton) les ions CO_3^{2-} réagissent avec les ions calcium (Ca^{2+}) pour précipiter le carbonate de calcium (CaCO_3) :

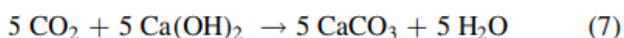


Les nutriments injectés au béton ne doivent pas modifier les propriétés de ce dernier. Seul le lactate de calcium a permis une augmentation de la résistance de compression du béton à 28 jours. Il fournit également des ions calciums pour la précipitation du carbonate de calcium.

La réaction du nutriment avec la bactérie produit :



Le béton étant un environnement riche en calcium, le CO_2 résultant de la respiration bactérienne peut encore réagir avec la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) présente dans la pâte de ciment pour conduire à la formation de 5 moles supplémentaires de CaCO_3 pour colmater la fissure, selon l'équation :



Pour obtenir un mécanisme d'auto-guérison autonome, l'agent cicatrisant (bactéries + nutriments) doit être ajouté pendant la phase de coulage du béton.

Cette technique a déjà fait ses preuves et commence à être commercialisée. Elle permet d'allonger l'espérance de vie du béton, qui acquiert de ce fait une propriété connue des systèmes du vivant : l'auto-réparation.

Concernant le béton, nous avons donc pu constater certaines optimisations mis en place / en cours de développement par la filière / des laboratoires.

Mais d'autres chercheurs, dans une démarche biomimétique, reprennent le processus de zéro et s'attellent au développement de nouveaux matériaux, aux impacts environnementaux plus limités.

3.2. DES MATERIAUX INNOVANTS S’INSPIRANT DIRECTEMENT DU VIVANT

Briques Biomason

La fabrication de briques traditionnelles nécessite de sabler l'argile dans des fours à 2 000 degrés pendant plusieurs jours, où du carbone est libéré dans l'atmosphère.

Après avoir étudié les micro-organismes des récifs coraliens, Ginger.Krieg. Dosier a développé un tout nouveau concept.

Elle a eu l'idée de se servir des bactéries *Sporosarcina pasteurii* pour lier du sable à du carbonate de calcium et ainsi former des briques, sans aucun chauffage. En 2012, elle a fondé sa start-up Bio-Mason pour développer cette idée.

Avec le processus Bio-Mason, le sable est emballé dans des moules rectangulaires. Des moisissures et des bactéries *Sporosarcina pasteurii* sont ensuite injectées dans les moules et entourent les grains de sable (cette composition peut être fournie lyophilisée et hydratée à l'usine).

Des cristaux de carbone se forment autour des grains pendant que les briques sont alimentées d'ions calcium en suspension dans l'eau grâce à un système d'irrigation.

Tous les vides entre les grains de sables sont comblés par les cristaux en moins de 72 heures.⁶¹

Pour rappel, le béton doit attendre 28 jours pour atteindre sa résistance mécanique. Les briques peuvent être utilisées 2 à 5 jours après, et l'eau est réutilisée pour les prochains lots. Deux à cinq jours est également le temps qu'il faut pour cuire une brique conventionnelle au four, mais la consommation d'énergie est bien plus importante.

Dans les premières expérimentations le sable était utilisé ; il est également possible d'utiliser tout type de roches.

500 briques (en granite et carbonate de calcium) sont produites par semaine à Durham, en Caroline du Nord. bioMASON compte deux titulaires de licence et est en discussion avec cinq autres.

D'après leur site internet, leurs briques ont des propriétés physiques (résistance à la compression, résistance au gel-dégel, tolérance dimensionnelle) meilleures que les matériaux standards.

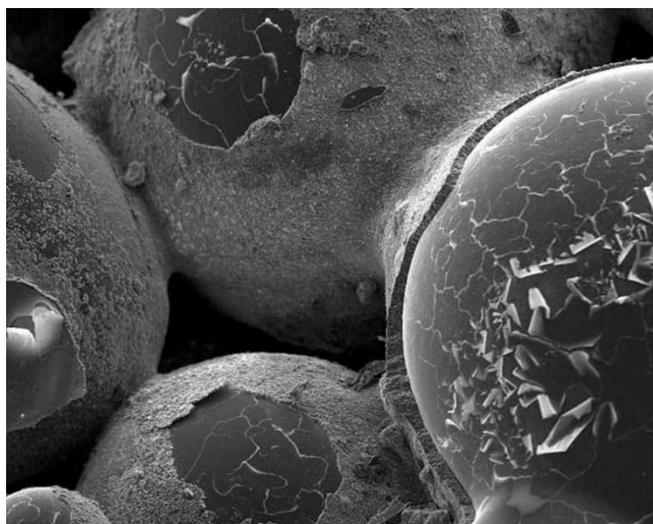


Figure 3.2.a) Vue au microscope du procédé Biomason en cours de réalisation



Figure 3.2.b) Brique Biomason actuellement commercialisée

Cette technologie est la démonstration qu'un matériau de construction peut être réalisé dans des conditions de chimie douce, à température et pression ambiantes.

⁶¹ DOSIER Ginger K., *Biological sintering without heat or pressure*, Février 2020.

Ce biomatériau est une inversion du processus du ciment Portland: le carbone et le calcium se combinent pour produire un matériau calcaire d'origine biologique. Le ciment Portland, lui, est à base

d'hydrate de calcium silicate, qui provient à l'origine de la libération du carbone du calcaire par un chauffage intensif.

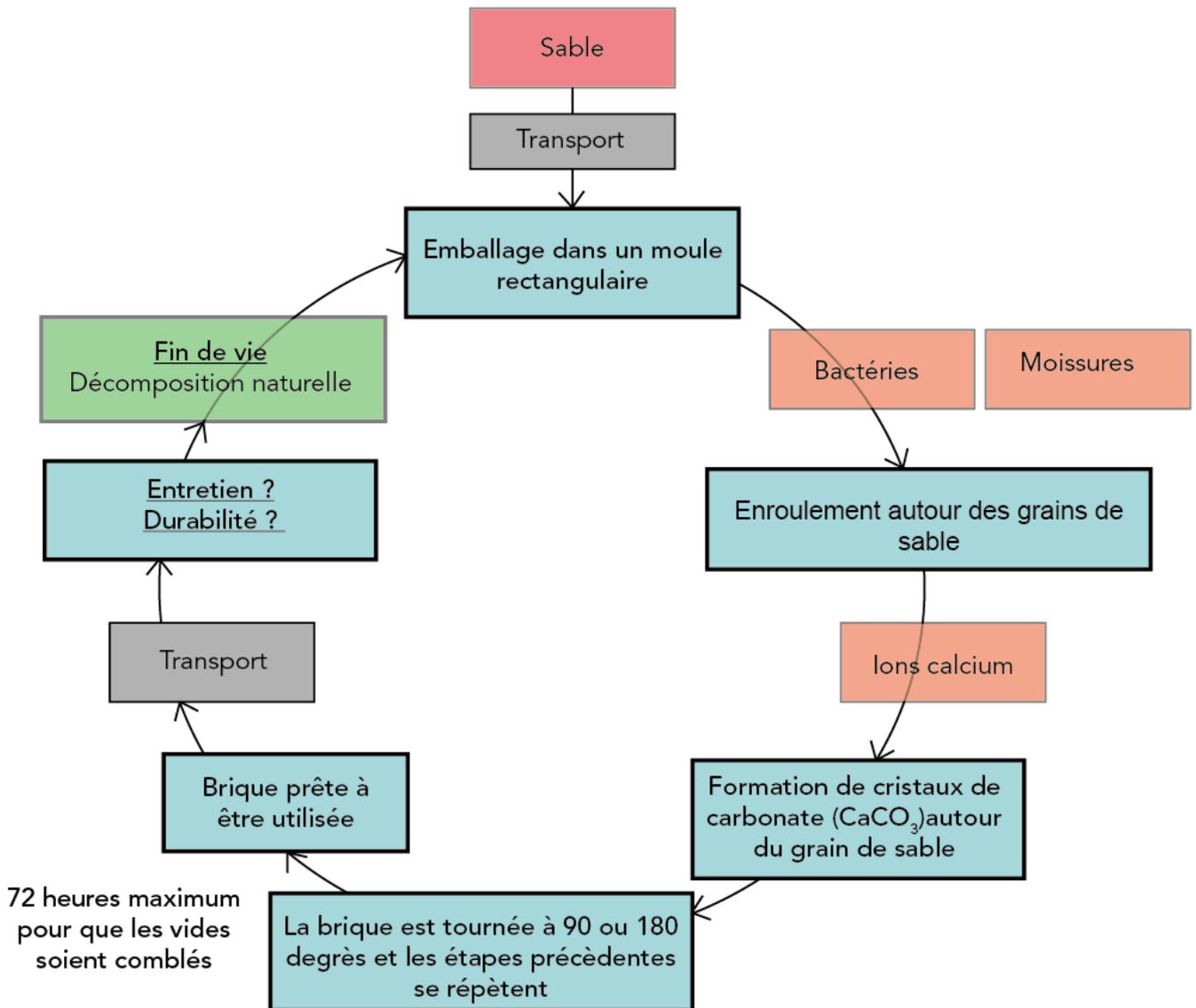


Figure 3.2.c) Cycle de vie de la brique Biomason

Briques de mycélium

L'agence d'architecture expérimentale the Living, en coopération avec Ecovative, une entreprise spécialisée dans les matériaux, a démontré qu'une croissance bactérienne pouvait "faire pousser" des matériaux.

The Living conçoit la tour Hy-Fi en 2014. Cette tour, de 13 mètres de haut, est la première structure constituée de 10000 briques biodégradables réalisées grâce à un matériau de construction innovant, issu d'une culture de champignons, spécialement cultivée pour s'adapter à un moule en forme de brique.

La structure est conçue pour réguler la lumière et la température du pavillon (figure 3.2.d).⁶²



Fig. 3.2. d) Tour « Hy-Fi » temporaire

La production de la brique ne nécessite qu'un moule en plastique réutilisable contenant des tiges de maïs hachées, un sous-produit agricole. Ce milieu est inoculé de mycélium de champignon. Le mycélium peut être multiplié presque indéfiniment, comme la levure, à partir d'un petit bloc de départ. En se répandant dans le moule en plastique, il forme une sorte de matrice autour des tiges de maïs hachées, fonctionnant comme un liant qui soude les déchets agricoles entre eux et durcit en même temps la masse. Le processus ne nécessite ni énergie ni catalyse compliquée, et aucun déchet n'est produit.

Outre la moisissure et les composants, seuls un environnement stérile et un peu d'humidité sont nécessaires. Le mycélium pousse également dans l'obscurité. Il faut cinq jours pour qu'une brique prenne forme, durcisse, et résiste suffisamment à la compression pour servir d'élément constructif (figure 3.2. e). Le processus s'arrête avec le séchage des briques.

Concernant sa résistance (figure 3.2.f) des essais de vieillissement accélérés ne révèlent aucune perte de rigidité. Les tests structurels confirment une résistance et une adhérence suffisantes. La diffusivité thermique est très faible.



Fig. 3.2. e) Briques de mycélium en cours de fabrication

⁶² <https://www.holcimfoundation.org/projects/hy-fi>. Consulté en 06.2019.

Ce processus est donc créé à basse température et se désintègre après quelques semaines. Son empreinte carbone est très faible.

Ce matériau nous montre comment nous pouvons fabriquer un matériau à faible consommation d'énergie avec des ressources locales (figure 3.2.f) ; l'assembler pour former une structure puis la désassembler facilement.

Le matériau se développe à partir de matériaux vivants et retourne à la terre par le biais du compostage à la fin du cycle de vie de la structure. Les briques ont été compostées et totalement réincorporées dans le cycle biologique.

L'énergie calculée pour son cycle de vie équivaut à 0,2 MJ/kg, contre 4,7 MJ/kg pour le béton.

L'émission de carbone est égale à 0,04 Kg CO₂/kg, contre 0,16 kg CO₂/kg pour le béton.⁶³

Bien que je n'ai pas réussi à trouver les valeurs quantitatives des autres impacts environnementaux, ces deux valeurs et l'ACV prouve l'efficacité de ce nouveau matériau, et son respect de l'environnement à tous les niveaux.

Les concepteurs développent cette brique pour être utilisés : pour l'isolation de murs, comme murs intérieurs, panneaux acoustiques, plafond acoustique, maison temporaire.

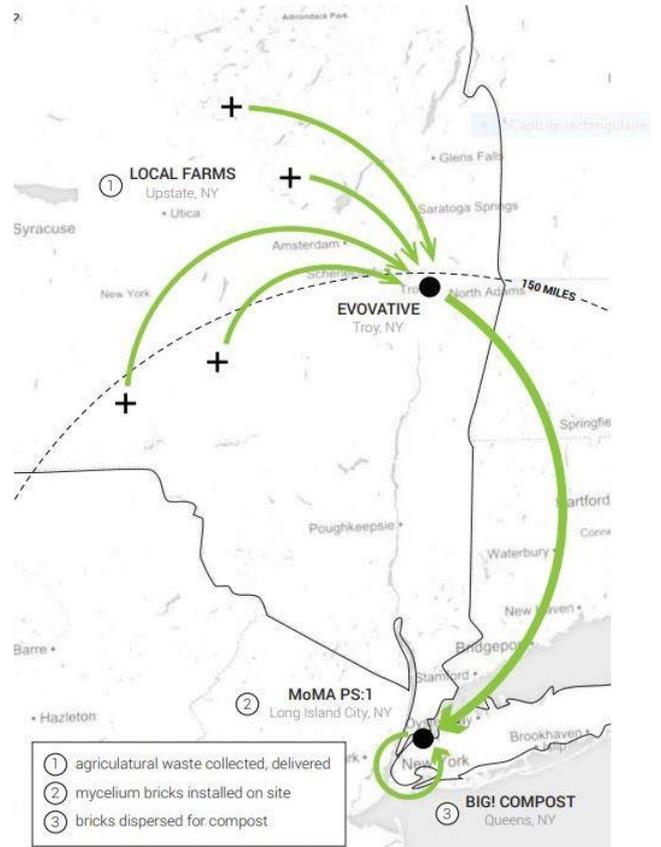


Fig. 3.2. g) Lieux d'approvisionnement des matières premières de la brique, pour un fonctionnement en circuit court.

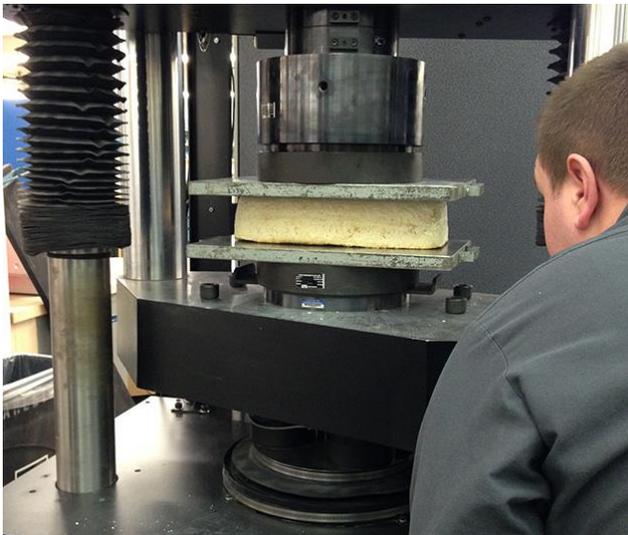


Fig. 3.2. f) Test structurel à l'université Columbia.

Les briques peuvent supporter des poids équivalents à 50 voitures, tout en étant 200000 fois plus flexibles que j'acier.

⁶³ Valeurs calculées par le Columbia University Lab.



Fig. 3.2.h) Etapes en images du début et de la fin du cycle de vie de la brique de mycélium

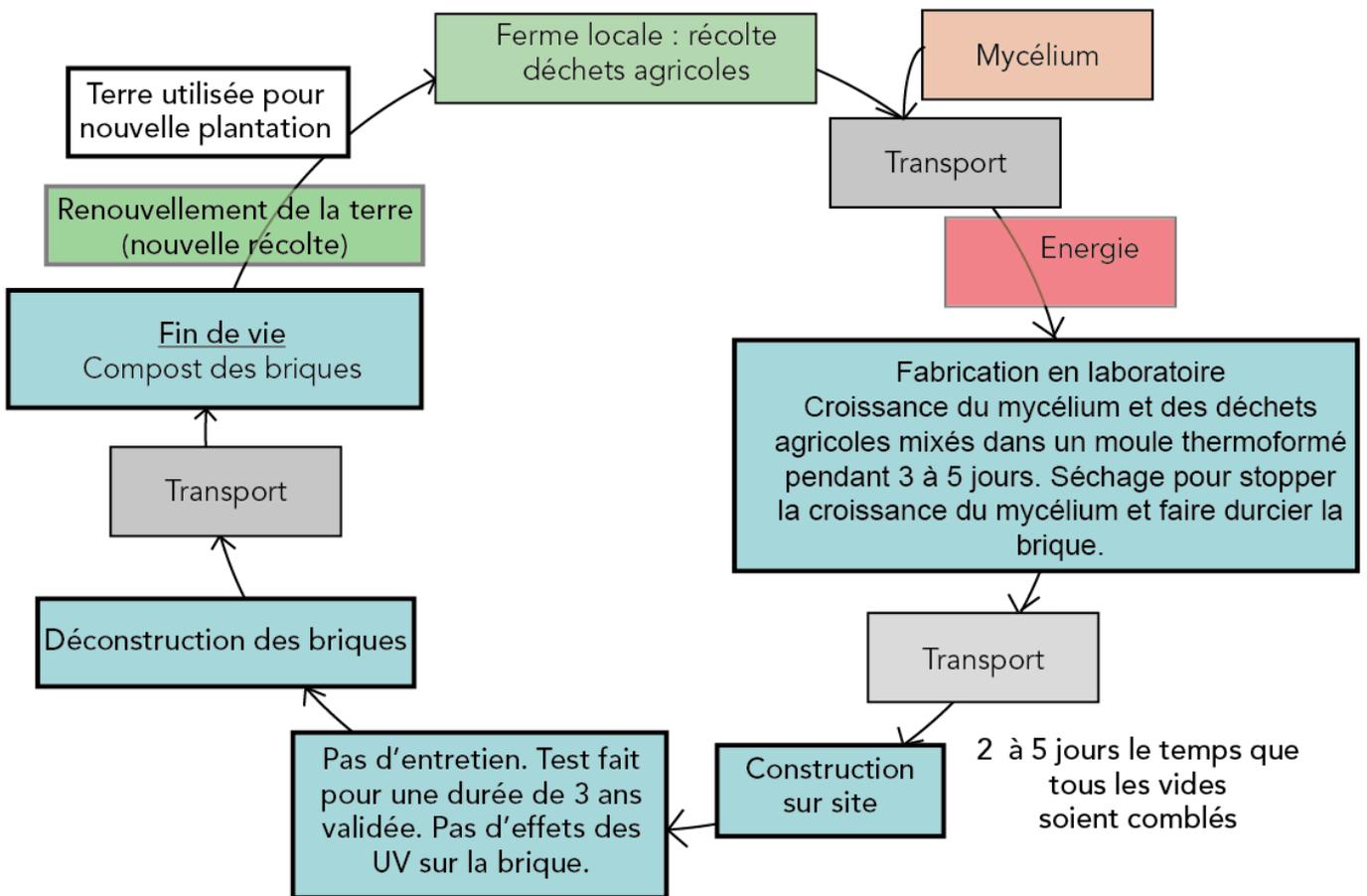


Fig. 3.2.i) Cycle de vie de la brique mycélium

« Dune », le projet de Magnus Larsson⁶⁴

Devant les montagnes de sable du Sahara menaçant de pousser les gens hors de chez eux et de provoquer des scénarios catastrophiques, l'architecte Magnus Larsson adopte un optimisme radical : utiliser des dunes pour atténuer les déplacements de sable du Sahara.

Il a présenté, lors de l'exposition « Sahara Surreal » un mur de grès vert, habitable, de plus de 6000 kilomètres de long. La construction réside dans un mécanisme de précipitation microbienne.

A l'aide de *bacillus pasteurii*, un microorganisme bactérien abondamment disponible dans les marais et les zones humides, le sable se transforme en une structure poreuse fibreuse qui contrôle durablement la désertification tout en abritant des milliers de réfugiés.

Hormis sa présence naturelle dans les sols, cette bactérie a été sélectionnée pour son efficacité à rendre les eaux du sols plus alcalines.

Un environnement riche en calcium assemblée à une enzyme uréase de la bactérie *bacillus pasteurii* se transforme en calcite, la forme la plus stable du carbonate de calcium. La calcite sert ensuite d'agent de liaison pour cimenter les grains individuellement.

Les premières réactions sont terminées dans les 24 heures, mais une semaine est nécessaire pour obtenir un sable complètement saturé et rendre la structure habitable. il faudrait environ une semaine pour saturer le sable suffisamment pour rendre la structure habitable.

Le processus de solidification transforme donc le sable en grès, une roche sédimentaire composés de grains de roche et de minéraux tels que le quartz (les matériaux les plus courants de la croûte terrestre).

Ce projet, toujours au stade de concept, est une vision, un début de plan, qui montre encore une fois comment l'utilisation de micro-organismes et de matériaux locaux présents sous nos pieds en grande quantité, peut créer de nouvelles structures habitables, sans énergie supplémentaire ni déchet.



Fig. 3.2.j) Perspectives intérieures : l'intérieur de ces dunes solidifiées proposent de l'eau, de l'ombre, et une possibilité de reverdir le désert depuis l'intérieur.



Fig. 3.2.k) Solidification des parties de la dune selon les besoins, grâce à des injections via des pieux.



Fig. 3.2.l) La solution microbienne est distribuée à travers des ouvertures spécifiquement conçues dans la peau de la structure, solidifiant le sable qui l'entoure en surfaces structurales.

⁶⁴ LARSSON M. « Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture ». Janvier 2010.

CONCLUSION

La RE2020 permet d'encourager les industriels à réduire dès maintenant les impacts de leur process.

La méthode de l'ACV dynamique est un recours d'aide à la décision pour l'éco-conception, qui permet de réduire les impacts environnementaux. En quantifiant les impacts directs et indirects, avec toutes les parties de la chaîne d'acteurs, en évitant les transferts de pollutions, l'ACV se présente comme un outil scientifique robuste, déontologique et reconnu, pour faire le bilan environnemental d'un matériau ou d'un bâtiment.

L'enjeu de la comparaison des ACV de différents matériaux n'est pas d'exclure les produits industriels (car ils sont parfois indispensables), mais de donner la priorité, quand ils apportent les mêmes propriétés, à des matériaux moins énergivores et moins consommateurs en matières premières non renouvelables. Il faut utiliser la juste quantité du bon matériau au bon endroit !

Le biomimétisme se positionne comme une solution de conception visant à améliorer les cycles de vie des matériaux, donc à réduire leur impact environnemental.

La nature est une source d'idées inépuisable, qui peut rendre les matériaux produits par l'homme plus efficaces, plus résistants et moins toxiques, donc plus durables.

L'application de l'approche biomimétique aux matériaux peut donc transformer notre façon de consommer les ressources et l'énergie et nous faire passer d'une **logique linéaire, inefficace et polluante à un modèle en boucle fermée.**

Les projets présentés au dernier chapitre sont le commencement du transfert des connaissances entre la biologie et l'ingénierie, sans nécessité d'une technologie de pointe.

La transformation de matériaux locaux, l'utilisation de matériaux biologiques bruts, et la transformation des processus de fabrication du béton (émission de CO₂ remplacée par son absorption) permettent au secteur de la construction de **changer de paradigme environnemental.** Il doit adopter une approche positive et régénératrice, essentielle pour parvenir à une architecture durable et atténuer le dérèglement

climatique, et les autres catastrophes naturelles que nous subissons.

Ce changement de paradigme amène à remettre en question les processus de conception, de fabrication et de démolition aujourd'hui en place.

Certains principes du vivant, comme les mécanismes d'autoassemblage supramoléculaire, organique et inorganique, ne sont pas compris par l'Homme, mais d'autres principes, comme l'auto-réparation, la fabrication à température et pression modérées (grâce aux micro-organismes et la biominéralisation), deviennent applicables à l'échelle industrielle.

La plus grande difficulté de cette démarche est en effet la transformation de l'idée en **produit industriel**, du concept bio-inspiré en nouveaux matériaux.

Pour cela, une équipe pluridisciplinaire est nécessaire dès les phases d'avant-projet. Un architecte ne peut rien faire sans un biologiste, ou des connaissances pointues en biologie.

En étant moi-même étudiante en double cursus architecte-ingénieur, je me rends compte de l'importance du partage de connaissances pour le développement de créativité et de solutions, de la plus-value d'une coopération d'acteurs aux différents savoirs.

L'interdisciplinarité est la clé du biomimétisme.

TABLE DES FIGURES ET LEUR SOURCE

- **Figure 1.1.a) Emissions anthropiques mondiales de CO₂**
GIEC. Rapport de synthèse – changement climatique 2014. Consulté le 03/12/21.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf.
- **Figure 1.1.b) Evolution annuelle des températures depuis 1850**
GIEC. Rapport de synthèse – changement climatique. Consulté le 03/12/21.
2014 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf.
- **Figure 1.1.c) Conventions cadre des Nations Unies sur le changement climatique.**
- Ministère de la Transition Ecologique. Les chiffres clés du climat. 2021. Consulté le 02.12.21.
- <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-climat-france-europe-et-monde-edition-2021-0>.
- **Figure 1.1.d) Consommation finale énergétique par secteur**
Ministère de la Transition Ecologique. Les chiffres clés de l'énergie. 2020. Consulté le 01.12.21
https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-11/datalab_70_chiffres_cles_energie_edition_2020_septembre2020_1.pdf
- **Figure 1.1.e) Emissions de gaz à effet de serre dans la construction d'un bâtiment**
Ministère de la Transition Ecologique. Les chiffres clés de l'énergie. 2020.

- **Figure 1.2.a) Les étapes de la méthodologie ACV**
L'ESTP et l'Ecole Française du béton, cours
- **Figure. 1.2.b) Bilan des entrées et des sorties pour chaque étape de l'ACV**
L'ESTP et l'Ecole Française du béton, cours
- **Figure. 1.2.c) Regroupement des flux en une liste d'indicateurs d'impacts.**
L'ESTP et l'Ecole Française du béton, cours
- **Figure. 1.2.d) Principe du calcul d'un indicateur environnemental.**
L'ESTP et l'Ecole Française du béton, cours
- **Figure. 1.2.e) Indicateurs environnementaux retenus pour l'étude des matériaux**
Base INIES

- **Figure 1.3.a) Bloc en béton creux**
www.pointp.fr/conseils-experts/les-blocs-beton-ou-parpaing-les-incontournables-de-la-construction
- **Figure 1.3.b) Cycle de vie d'un bloc de béton**
CERIB. FDES « Bloc en béton à joints épais ». Mai 2017.
- **Figure 1.3.c) Cycle de vie du ciment Portland**
Aéonor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure 1.3.d) Quantitatif des indicateurs environnementaux pour 1m² de paroi de blocs de béton.**
CERIB, Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire du bloc en béton à joints épais. Mai 2017.
- **Figure. 1.3.e) Contribution des paramètres de production à l'indicateur consommation d'eau**
CERIB, « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – application aux blocs de béton ». Aout 2006.
- **Figure. 1.3.f) Contribution des paramètres de production à l'indicateur changement climatique**
CERIB, « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – application aux blocs de béton ». Aout 2006.
- **Figure. 1.3.g) Contribution des paramètres de production à l'indicateur acidification**
CERIB, « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – application aux blocs de béton ». Aout 2006.

- **Figure. 1.3.h)** Contribution des paramètres de production à l'indicateur épuisement des ressources
CERIB, « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – application aux blocs de béton ». Aout 2006.
- **Figure. 1.3.i)** Contribution des paramètres de production à l'indicateur destruction de la couche d'ozone stratosphérique
CERIB, « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – application aux blocs de béton ». Aout 2006.
- **Figure 2.1.a)** Croquis de l'ornithoptère de Léonard de Vinci
<https://www.ladn.eu/tendance/le-biomimetisme/la-source-la-nature-un-modele-millenaire/>
- **Figure 2.1.b)** La spirale du biomimétisme
<https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/techniques/5183/5183-180-p40.pdf>
- **Figure 2.1.c)** Les filières et leurs glandes situées sur l'abdomen de l'araignée.
Michael PAWLYN, *Biomimétisme et architecture*, Edition Rue de l'Echiquier, 2019
<https://www.ladn.eu/tendance/le-biomimetisme/la-source-la-nature-un-modele-millenaire/>
- **Figure. 2.2.a)** Bivalve *Mytilus Edulis* et la transition entre sa couche nacrée et prismatique.
Widad AJILI. Étude des processus de biominéralisation de la nacre chez l'ormeau européen *haliotis tuberculata*. Chimie inorganique. Sorbonne Université, 2018.
- **Figure. 2.2.b)** Cycle de vie de la coquille de la moule
Aénor CHABERT. 2021
- **Figure. 2.2.c)** Coquille d'Abalone, aussi appelée coquille de l'ormeau
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 2.2.d)** Structure de la nacre.
Corinne CHEVALLARD et Patrick GUENOUN, « Les matériaux biomimétiques », LIONS (laboratoire Interdisciplinaire sur l'Organisation Nanométrique et Supramoléculaire). Aout 2006.
- **Figure. 2.2.e)** Cycle de vie de la coquille de l'ormeau
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 2.2.f)** Tableau comparatif des matériaux créés par l'homme et de ceux créés par la nature
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 2.3.a)** Tableau comparatif des matériaux créés par l'homme et de ceux créés par la nature
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure 2.4.a)** Cycle de vie du carbone, associé à celui des matériaux de construction actuels
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 2.4.b)** Les différentes couches de matière organique d'un stromatolithe contemporain
<https://leblob.fr/videos/le-recyclage-une-invention-du-vivant>. Consulté le 10.12.21
- **Figure. 2.4.c)** Du cycle non viable au cycle durable
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 2.4.d)** Schéma de circulation des nutriments biologiques et techniques
Fondation Ellen MacArthur
- **Figure. 3.1.a)** Les éléments en béton provenant de démolitions et destinés à être recyclés
PG / R&V « Projet national Recybéton, la levée des freins ». Juin 2019.
- **Figure. 3.1.b)** Production de granulats venant de roches massives
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 3.1.c)** Production de granulats recyclés
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021

- **Figure. 3.1.d)** Comparaison des impacts environnementaux du traitement de déchets de déconstruction et de la valorisation des granulats recyclés.
UNPG « Module d'information environnementale de la production de granulats recyclés », 2017.
- **Figure. 3.1.e)** Influence du taux de substitution sur l'ACV
<https://www.pnrecybeton.fr/wp-content/uploads/2021/12/R17RECY042-Theme-3-Evaluation-environnementale-du-beton-de-granulats-recycles-ICUBE-ENPC-LC81-LC82.pdf>
- **Figure. 3.1.f)** Processus de biominéralisation des coraux et autres organismes marins.
Michael PAWLYN, *Biomimétisme et architecture*, Edition Rue de l'Echiquier, 2019
- **Figure. 3.1.g)** Processus de capture de CO₂ pensé par l'entreprise Calera
Aénor CHABERT, 2021
- **Figure. 3.1.h)** Image microscopique du béton CarbonCure
<https://www.carboncure.com/>.
- **Figure. 3.1.i)** 725 Ponce, immeuble de bureaux fait de béton CarbonCure.
<https://www.brasfieldgorrie.com/expertise/project/725-ponce-office-building/>
- **Figure. 3.1.j)** Analyse au microscope optique de la croissance fongique
Jing LUO. « Interactions of fungi with concrete: significant importance for bio-based self-healing concrete » 2017.
- **Figure. 3.1.k)** Diamètre des spores de *T.Reesei* au microscope optique
Jing LUO. « Interactions of fungi with concrete: significant importance for bio-based self-healing concrete » 2017.
- **Figure. 3.1.l)** Le béton autocicatrisant
Université de Delft

- **Figure. 3.2.a)** Vue au microscope du procédé Biomason en cours de réalisation
www.biomason.com
- **Figure. 3.2.b)** Brique Biomason actuellement commercialisée
www.biomason.com
- **Figure. 3.2.c)** Cycle de vie de la brique Biomason
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 3.2.d)** Tour « Hy-Fi » temporaire
LafargeHolcim Foundation
- **Figure. 3.2.e)** Briques de mycélium en cours de fabrication
LafargeHolcim Foundation
- **Figure. 3.2.f)** Lieux d'approvisionnement des matières premières de la brique, pour un fonctionnement en circuit court.
LafargeHolcim Foundation
- **Figure. 3.2.g)** Test structurel à l'université Columbia
<https://www.globalconstructionreview.com/mushroom-magic-arup-builds86worldsfirst-fungus4884/>
- **Figure. 3.2.h)** Etapes en images du début et de la fin du cycle de vie de la brique de mycélium
LafargeHolcim Foundation
- **Figure. 3.2.i)** Cycle de vie de la brique de mycélium
Aénor CHABERT DE CLIMENS. 2021
- **Figure. 3.2.j)** Perspectives à l'intérieur des dunes solidifiées
Magnus Larsson
- **Figure. 3.2.k)** Solidification des parties de la dune
Magnus Larsson
- **Figure. 3.2.l)** Distribution de la solution microbienne
Magnus Larsson

BIBLIOGRAPHIE

BREVETS

- JONG LUO « Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete ».
- Henk M. JONKERS et V. WIKTOR « Bacteria-based concept : from concept to market », juillet 2016.
- Ginger K. DOSIER, « Biological sintering without heat or pressure », Février 2020.

LIVRES

- ENCORE HEUREUX, *Matière Grise*, Paris, Editions du pavillon de l'Arsenal, Novembre 2014, 185p.
- Janine BENUYS, *Biomimétisme, quand la nature inspire des innovations durables*, Rue de l'Echiquier, Mai 2017, 504 p.
- Michael PAWLYN, *Biomimétisme et architecture*, Rue de l'Echiquier, Octobre 2019, 232 p.
- Sébatien LAVAUX, « Etude d'un modèle simplifié pour l'analyse du cycle de vie des bâtiments », *HAL archives-ouvertes.fr*, Juin 2012, 435 p.
- Pierre-Claude AÏTCIN, Sidney MINDESS, *Ecostructures en béton, Comment diminuer l'empreinte carbone des structures en béton*, édition Eyrolles, 2013
- Bruno PEUPORTIER, *Eco-conception des bâtiments, bâtir en préservant l'environnement*. Ecole des Mines Paris, Presses, 286 p.
- William MCDONOUGH et Michael BRAUNGART, *Cradle to cradle. Créer et recycler à l'infini*. Editions alternatives, Paris, collection « manifesto », 2011, 230 pages.

RAPPORTS

- CEEBIOS, « Biomimétisme en France », Juillet 2018
- CEEBIOS, « Matériaux Bio-inspirés », 2018
- CEEBIOS, « Habitat Bio-inspirés », 2018
- ADEME, *Déchets, chiffres clés*, Ademe Editions, mars 2019, 31p.
- FEDERATION FRANÇAISE DU BATIMENT, « Mieux gérer les déchets de chantier », Septembre 2013
- CERIB (Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton), « Bloc en béton - Fiche de déclaration environnementale et sanitaire », Mai 2017
- CERIB, Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire du bloc en béton à joints épais. Mai 2017.
- GIEC Rapport de synthèse – changement climatique 2014.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM_fr.pdf.
- DIRECTIVES OPERATIONNELLES DE LA BOAD « Industrie du ciment ».
https://www.boad.org/wp-content/uploads/upload/ethique/do_37_industrie-ciment.pdf
- OBSERVATOIRE FRANÇAIS DES TECHNIQUES AVANCEES, *Biomimétisme et Matériaux*, 2001, Ofa, 460 p.
- MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE, « Entreprises du BTP : 227,5 millions de tonnes de déchets en 2014 »,
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/entreprises-du-btp-2275-millions-de-tonnes-de-dechets-en-2014>

- UNPG « Module d'information environnementale de la production de granulats recyclés », Septembre 2017.
<https://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-mie-production-granulats-recycles-2017-1.pdf>
- UNPG, Rapport « Module d'information environnementale du traitement de déchets de déconstruction en vue de produire des granulats ». Septembre 2017. Consulté le 06.01.2022.
<https://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-mie-traitement-de-dechets-pour-granulats-recycles-2017-1.pdf>
- Raphaël BODET et Jérôme DANIS , « Intégration des caractéristiques environnementales et sanitaires dans les certifications de produits – Application aux blocs de béton ». CERIB, aout 2006.
- Oliver SCHEFFER, *L'architecture durable, Des sources vernaculaires a BedZed*, Editions Symbiopolis, 2016, 16p.
- Widad AJILI. « Étude des processus de biominéralisation de la nacre chez l'ormeau européen *haliotis tuberculata* ». Chimie inorganique. Sorbonne Université, 2018.
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02466424>
- Corinne CHEVALLARD et Patrick GUENOUN, « Les matériaux biomimétiques », LIONS (laboratoire Interdisciplinaire sur l'Organisation Nanométrique et Supramoléculaire).
<http://dx.doi.org/10.1051/refdp/200615501>

ARTICLES

- Elisabeth GELOT, Morgan MOINET, « Matériaux de construction : le réemploi, mode d'emploi ! », *Complément techniques n°71*, Novembre/Décembre 2019.
- Eric R. KANDEL, Le réchauffement climatique : « Que sais-je ? » n°3650. Date de parution : 06/03/2019, éditeur Presses Universitaires de France.
- Félicie GESLIN et al., « Analyse du cycle de vie ». *Les cahiers techniques du bâtiment*, numéro 349, Mars 2016
- BPI France, « Le CEEBIOS obtient un financement public de 2,2 millions d'euros pour le développement de BioMig »
<https://presse.bpifrance.fr/ceebios-obtient-un-financement-public-de-22-millions-deuros-pour-le-developpement-de-biomig-sa-plateforme-dinnovation-ouverte-pour-les-materiaux-bio-inspires/> Consulté le 07.11.2021
- Magnus LARSSON, « Dune: Arenaceous Anti-Desertification Architecture », 2010.
- Rachael FLORES, « Using fungi to fix bridges », Binghamton University., Janvier 2018
<https://www.binghamton.edu/news/story/938/using-fungi-to-fix-bridges>
- Pascal FAUCOMPRES, « Le béton de champignons auto-cicatrisant : une solution durable aux infrastructures qui fissurent ? », janvier 2018
<https://www.build-green.fr/>.
- David BRADLEY, « TR10 : Green concrete », avril 2010
<http://www2.technologyreview.com/news/418542/tr10-green-concrete/>.
- Delphine BOSSY, « Acidification des océans : les animaux marins se dissolvent », novembre 2012
<https://www.futurasciences.com/planete/actualites/climatologie-acidification-océans-animaux-marins-dissolvent-42994/>
- Emmanuel MAHIEU et al., « La destruction de la couche d'ozone », 2007
https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/35015/1/EEW2006-2007_AIR2_mahieu.pdf

- Yann LAGARDE, « Léonard de Vinci et l'invention du biomimétisme », Septembre 2019.
<https://www.franceculture.fr/sciences/leonard-de-vinci-et-l-invention-du-biomimetisme>
- Gilles CAMUS, « L'eutrophisation », Juin 2014
<https://planet-vie.ens.fr/thematiques/ecologie/gestion-de-l-environnement-pollution/l-eutrophisation>
- Marine VALO, « La crise de l'eau illustrée en 5 graphiques », 2019.
https://www.lemonde.fr/ressources-naturelles/article/2015/03/20/la-crise-de-l-eau-illustree-en-5-graphiques_4597592_1652731.html
- Rémi PIN, « Bilan carbone du ciment : comment la filière veut changer la donne », avril 2019
<https://www.actu-environnement.com/ae/news/Bilan-carbone-ciment-filiere-changer-33280.php4>
- Commission EELV, « Raréfaction des ressources »
<https://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/pourquoi/rarefaction-des-ressources/>.
- Vie-publique, « Le Grenelle de l'environnement : quels engagements ? » Juillet 2019.
<https://www.vie-publique.fr/eclairage/268585-le-grenelle-de-lenvironnement-quels-engagements>.
- Planetoscope.com, « La production mondiale de béton ».
<https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374.html..>
- Les cahiers du développement durable, « Des ressources menacées d'épuisement ».
<http://les.cahiers-developpement-durable.be/vivre/t1-p1-cha2-ressources-menacees/>.
- Cairn.info « Rappel sur le marché des droits à polluer ». Novembre 2012.
<https://www.cairn.info/revue-idees-economiques-et-sociales-2008-3-page-57.htm>

SITOGRAFIE

- <https://www.biomason.com/>
- <https://www.pnrecybeton.fr/>
- <https://www.ellenmarathurfoundation.org>
- <https://ademe.fr>
- www.infociments.fr
- www.holcimfoundation.org
- www.carboncure.com

VIDEOS / CONFERENCES EN LIGNE

- BX1, « Autrement : pourquoi détruire quand on peut réutiliser ? », octobre 2020.
<https://bx1.be/news/autrement-pourquoi-detruire-quand-on-peut-reutiliser/?fbclid=IwAR0jNCpSOE3s91we5QyUlnnyirsVkhH21vuzAC-IWDhPEonT2BiK73WWGIGY>.
- François DE LARRARD, Conférence « Le recyclage, une solution à la raréfaction des sables ? », janvier 2020.
<https://www.x-environnement.org/reunions-debats/interventions/231>
- CSTB, MOOC RE 2020 « Préparez-vous à la nouvelle réglementation environnementale ».

Résumé

Face aux nouveaux enjeux environnementaux, le processus de conception, de fabrication et de démolition des matériaux d'aujourd'hui doivent être remis en question.

Pour cela, la RE2020 introduit la méthode d'ACV dynamique, qui questionne autant la chimie des matériaux que la provenance géographique des matières premières.

Cette approche multicritère, couplée à une démarche biomimétique, permet de diminuer les impacts environnementaux des matériaux.

En effet, le biomimétisme consiste à chercher des solutions durables dans la nature, où l'on trouve des stratégies performantes, résilientes, respectueuses de l'environnement, pour fabriquer des matériaux et les réintégrer au cycle biologique à leur fin vie.

Le propos développe en premier lieu les cycles de vie du béton et d'organismes naturels, pour ensuite les comparer, et faire émerger les principes divergents entre l'ingénierie et la biologie. La dernière partie consiste à la réduction des impacts environnementaux des matériaux, avec des pistes d'optimisation du béton et le développement de nouveaux matériaux innovants.

Faced with new environmental challenges, the design, manufacturing and demolition process of today's materials must be questioned.

To this end, the RE2020 introduces the dynamic LCA method, which questions both the chemistry of materials and the geographical origin of raw materials.

This multi-criteria approach, coupled with a biomimetic approach, makes it possible to reduce the environmental impact of materials.

Indeed, biomimicry consists of seeking sustainable solutions in nature, where efficient, resilient and environmentally friendly strategies can be found for manufacturing materials and reintegrating them into the biological cycle at the end of their life.

The masterthesis first develops the life cycles of concrete and natural organisms, then compares them, and highlights the divergent principles between engineering and biology. The last part consists of the reduction of the environmental impact of materials, with projects for optimising concrete and developing new innovative materials.