

Architecture

# Le *high-tech* au service du *low-tech*

*BIM, BEM, et architecture bioclimatique*

Janvier 2020

## Table des matières

|                                                        |           |
|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>TABLE DES MATIÈRES</b>                              | <b>2</b>  |
| <b>INTRODUCTION</b>                                    | <b>3</b>  |
| <b>CONTEXTE</b>                                        | <b>3</b>  |
| CRISE ENVIRONNEMENTALE                                 | 3         |
| ÉCOLOGIE                                               | 4         |
| <b>L'ARCHITECTURE FACE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX</b> | <b>5</b>  |
| LA CONSOMMATION EN ARCHITECTURE                        | 5         |
| LES MESURES POLITIQUES                                 | 6         |
| <b>DÉVELOPPEMENT</b>                                   | <b>6</b>  |
| <b>LE CONFORT</b>                                      | <b>6</b>  |
| DÉFINITION                                             | 6         |
| PARAMÈTRES PHYSIQUES                                   | 7         |
| LE CONFORT EN TANT QUE CONSTRUCTION SOCIALE            | 10        |
| VERS UN ENVIRONNEMENT BIEN TEMPÉRÉ                     | 11        |
| LE CONFORT OUI, MAIS À QUEL PRIX ?                     | 15        |
| <b>L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE</b>                    | <b>17</b> |
| FONDEMENTS                                             | 17        |
| L'ENVIRONNEMENT                                        | 18        |
| TYPOLOGIES                                             | 18        |
| DISPOSITIFS ET SYSTÈMES                                | 18        |
| EXEMPLES PASSÉS...                                     | 21        |
| ...ET RÉCENTS                                          | 23        |
| LE PROBLÈME DE LA DENSITÉ                              | 24        |
| <b>LE BIM</b>                                          | <b>26</b> |
| PRINCIPES FONDAMENTAUX                                 | 26        |
| UNE INQUIÉTUDE LÉGITIME ?                              | 27        |
| LA PLACE DU NON-STANDARD DANS LA GESTION DU STANDARD   | 27        |
| <b>LE BEM</b>                                          | <b>29</b> |
| PROCESSUS                                              | 29        |
| FORMATS OUVERTS                                        | 30        |
| LOGICIELS                                              | 30        |
| PERSPECTIVES                                           | 30        |
| <b>LA GESTION TECHNIQUE DE BÂTIMENT (GTB)</b>          | <b>31</b> |
| <b>L'OPTIMISATION ET LE PARAMÉTRIQUE</b>               | <b>32</b> |
| L'OPTIMISATION                                         | 32        |
| LE PARAMÉTRIQUE                                        | 33        |
| <b>CONCLUSION</b>                                      | <b>34</b> |
| <b>L'ARCHITECTE 2.0 ?</b>                              | <b>35</b> |
| SON RÔLE                                               | 35        |
| SES RESPONSABILITÉS                                    | 35        |
| <b>CONSTRUIRE DE MANIÈRE RESPONSABLE</b>               | <b>35</b> |
| <b>L'ÉNONCÉ THÉORIQUE DU PROJET DE MASTER</b>          | <b>36</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b>                                   | <b>37</b> |

## Introduction

Ce travail a pour objet de définir une base théorique sur laquelle s'appuiera le projet de master.

Partant d'un constat, teinté de réflexions sociétales, économiques et philosophiques, à propos du contexte écologique actuel, nous verrons, au travers d'une analyse de l'histoire de l'acte de construire et d'habiter, ce qui nous a poussé à en arriver à ce point critique dans l'histoire de l'humanité. Puis, nous nous pencherons sur des principes de constructions issus des réflexions des années soixante avant de nous focaliser sur les moyens propres à notre époque, en pleine transition numérique, pour identifier quelles sont les possibilités s'offrant à nous, architectes, et les conséquences qu'elles peuvent avoir sur la discipline.

Ainsi, nous aurons défini une problématique et proposé des solutions techniques pour répondre à un besoin relativement peu subjectif qu'est la nécessité de construire et se loger, de manière plus responsable.

## Contexte

### *Crise environnementale*

Les enjeux liés au climat sont depuis un certain nombre d'années au centre des préoccupations sociopolitiques, provoquant prise de conscience, passion, hystérie, et résultant plus rarement sur des actes concrets. Des premières considérations, centrées sur la croissance, les ressources et l'énergie, du Club de Rome en 1968 et le rapport *Meadows* subséquent issu du MIT<sup>a</sup>, à la tendance actuelle qu'ont beaucoup d'adolescents, terrorisés par la menace d'un réchauffement atmosphérique provoquant la disparition d'une partie significative de l'humanité, de manifester pancarte dans une main et *smartphone* dans l'autre, nous pouvons constater que la problématique s'est démocratisée, malgré un certain manque de cohérence quant aux modes de vie.

Il y a là un paradoxe essentiel : nous souhaitons tous une préservation de l'environnement naturel, mais sommes bien peu nombreux à y contribuer significativement.

En effet, la sobriété nécessaire pour réduire effectivement la consommation de ressources induit des contraintes au niveau de nos habitudes et des compromis en termes de confort. Ces privations sont difficilement embrassées par une population bombardée de stimuli consuméristes, par la publicité, le luxe...que certains auront toujours l'envie et les moyens de se payer, celui-ci symbolisant à leurs yeux et à ceux des autres, leur réussite financière à défaut d'être morale et spirituelle.

Au-delà de la responsabilité des individus, le modèle économique actuel fait souvent office de bouc émissaire. Il est devenu usuel d'entendre quelqu'un s'insurger contre le modèle capitaliste, ce qui est justifiable, mais il convient de remarquer que son moteur est – comme théorisé par Adam Smith – l'intérêt personnel de chacun, vulgairement résumé par l'enrichissement individuel. L'exploitation des ressources est motivée par le profit financier généré, et en faire un usage économe et raisonné n'est pas vraiment considéré, car à l'échelle d'une vie humaine, l'intérêt de l'individu est de s'enrichir le plus possible dans sa vie, et non de considérer une exploitation durable dans un temps plus long que sa propre existence.

La situation aujourd'hui reflète une problématique décrite dans *La tragédie des communaux*<sup>1</sup>, de Garrett Hardin, à la différence près que la mondialisation est passée par là, rendant cette problématique globale, et y incluant des nations entières avec leurs entités politiques, et stratégies économiques.

Le changement devrait avant tout être entrepris par chacun et dans l'éducation des plus jeunes – mais pas seulement – afin d'ériger au rang de modèle ce que l'on considère comme vertueux plutôt que de

---

<sup>a</sup> *Massachusetts Institute of Technology*

se contenter de subir, tels des rats de laboratoire dénués d'une réelle conscience, les injonctions d'un capitalisme qui a tout à perdre d'une véritable conscientisation globale.

Pousser ce raisonnement plus loin nous éloigne de l'architecture, mais c'est malgré tout dans ce contexte délicat que ce travail entend humblement s'inscrire.

## Écologie

### Étymologie

Issue des mots grecs *oïkos* et *logos*, l'écologie désigne littéralement la science de l'habitat, plus spécifiquement dans le cadre de l'étude des êtres vivants et de la relation qu'ils entretiennent avec leurs écosystèmes et niches biologiques.

### Au sens large

Depuis un certain nombre d'années, et de manière croissante, le terme est utilisé pour évoquer les écosystèmes naturels, souvent excluant du concept l'Homme et ses actions, qui sont seulement qualifiées de néfastes pour l'écologie. Il tend à devenir un mot fourre-tout et se détacher de son sens premier – surtout dans l'esprit des plus jeunes – même si sa définition peut être assez large. En effet, on pourrait arguer que les émissions de CO<sub>2</sub> sont de l'écologie<sup>b</sup>, dans le sens où il s'agit d'un produit rejeté dans l'écosystème par l'Homme, donc d'une relation d'un être vivant avec son habitat.

Justement, il semble de plus en plus nécessaire d'appliquer cette notion à l'être humain en reconnaissant que sa manière de vivre et d'habiter, de produire et de consommer engendrent des conséquences pour son environnement plus ou moins direct. Penser à une écologie globale où chaque interaction est quantifiée, et cohérente du point de vue de la gestion des ressources peut sembler utopique, mais l'idée n'est pas nouvelle.

### Spaceship earth

La notion a germé à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, dans *Progrès et pauvreté : enquête sur la cause des crises industrielles et de l'accroissement de la misère au milieu de l'accroissement de la richesse*, le remède, où l'écrivain, économiste et figure politique Henry George écrivait « *Le navire sur lequel nous voguons dans l'espace, est un navire bien approvisionné.* »<sup>2</sup> évoquant un environnement dans lequel il y avait toujours de nouvelles écoutilles pleines de provisions à ouvrir et dans lesquelles se servir. Pour l'auteur, ces nouvelles écoutilles sont les terres et richesses moins accessibles, mais rendues exploitables par le « simple » fait de l'accroissement de la population et la subséquente densification de la force productive humaine s'appuyant sur la puissance des machines. Il semble ignorer les ressources nécessaires pour alimenter ces machines. Nous voyons à la lecture de ce passage et des quelques pages le précédant, que l'auteur n'avait peut-être pas conceptualisé l'aspect limité du « navire » sur lequel nous voguons, bien qu'il ait identifié la nécessité de chercher à exploiter de nouvelles terres et ressources.

Replacer ses écrits dans son contexte historique et culturel permet de comprendre la faille conceptuelle de l'auteur, car dans ces années aux États-Unis, la conquête de l'ouest et des ressources s'y trouvant pouvait laisser croire à une certaine abondance, que seule une augmentation inconcevable de la population pourrait tarir, d'où la qualification de *cowboy economy* – par certains dans les années 1960 – et non pas de *spaceman economy*, où les ressources sont limitées.

George Orwell paraphrasera en 1937 cette formulation dans son livre *Le quai de Wigan*, pour militer en faveur d'une égale répartition des richesses et du travail, suivant une doctrine socialiste<sup>3</sup>.

Alors que ces deux utilisations sont une métaphore pour décrire des rapports socio-économiques entre les Hommes, la notion de *Spaceship Earth* endossera par la suite successivement des connotations plus

---

<sup>b</sup> Qu'il s'agisse d'une relation entre habitant et habitat néfaste ou non à l'écosystème global est un autre débat

responsabilisantes – par exemple adressée aux hommes politiques par Adlai Stevenson, ambassadeur des États-Unis à l'ONU entre 1961 et 1965, dans le contexte des stratégies impérialistes et conquérantes pour la domination globale lors de la guerre froide<sup>4</sup> – puis écologiques à partir du milieu des années soixante, par le biais de l'économie et de la gestion des ressources, sous la plume de l'économiste britannique Barbara Ward.

Richard Buckminster Fuller, génial inventeur, prolifique dans divers domaines dont l'architecture, se saisit du concept et l'appliqua très intelligemment à la ressource clé, ayant permis le développement technologique et industriel d'après-guerre : les hydrocarbures liquides et l'énergie qui en découle. Il rédige donc en 1969 *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial Terre*<sup>5</sup>, où il décrit la manière dont il faudrait procéder pour le fonctionnement durable et la maintenance de ce vaisseau. Il identifie dans ce texte l'aspect non-renouvelable de cette source d'énergie et le risque de leur épuisement, prônant le développement et l'utilisation d'énergie provenant de sources renouvelables déjà à cette époque. Il conclut ce texte en s'adressant directement aux architectes, ingénieurs, et planificateurs, leur recommandant une collaboration fructueuse pour s'élever ensemble plutôt qu'une lutte prédatrice pour s'élever aux dépens des autres. Force est de constater que là n'est pas la voie qu'a emprunté l'humanité...

Malgré toutes les divergences que l'on peut trouver dans les différents courants écologistes actuels et passés (sur lesquels nous ne nous pencherons pas), un consensus peut être atteint sur certains points :

- Les ressources matérielles seront toujours disponibles, mais dans des concentrations de plus en plus faibles, les gisements les plus rentables étant les premiers à être exploités, induisant un coût énergétique toujours plus élevé<sup>c</sup> pour les extraire et les raffiner. En faire un usage raisonnable est donc une nécessité.
- L'entropie fait que l'énergie au sein d'un système clos est constante, et qu'elle tend à s'équilibrer en chaque endroit, avec le temps. Les ressources énergétiques (comprendre par cela les matières qui contiennent de l'énergie dans les liaisons entre atomes, donc chimiques, excluons le nucléaire) ne sont que le lieu où s'est accumulée et condensée l'énergie, organisée par l'apport d'une énergie externe : le soleil.
- L'économie basée sur la croissance perpétuelle est insoutenable, comme le soutient le rapport du MIT, nommé *Meadows*, ou *The limits to growth*<sup>d</sup>.
- L'altération des milieux naturels par les pollutions diverses, et la réduction de ceux-ci par l'étalement urbain sont nuisibles à la biodiversité. La chute quantitative donc qualitative de celle-ci est une réalité, et met en péril l'équilibre d'écosystèmes desquels dépend l'être humain.

## L'architecture face aux enjeux environnementaux

### *La consommation en architecture*

Il va sans dire que la consommation de ressources et d'énergie dans le domaine du bâtiment représente une part importante de la consommation globale. Premièrement, les matériaux de construction sont avant tout des ressources physiques qui sont extraites d'un milieu naturel en vue de leur utilisation : métaux, ciment, produits dérivés du pétrole, bois. Deuxièmement, ils renferment une grande quantité d'énergie grise, pour leur extraction, transformation, production, voire acheminement, d'où l'importance d'avoir recours à des matériaux locaux. Troisièmement, la mise en œuvre de ces matériaux requiert à nouveau de l'énergie sur chantier. Quatrièmement, l'énergie

---

<sup>c</sup> Le taux de retour énergétique (TRE) est le ratio entre l'énergie obtenue, et l'énergie consommée pour extraire et raffiner la ressource

<sup>d</sup> Les limites de la croissance

nécessaire pour maintenir les conditions permettant le fonctionnement adéquat de l'édifice construit (chauffage, ventilation, entretien, etc.) est à considérer non pas de manière ponctuelle, mais pendant toute la durée de vie du bâtiment. Enfin, l'énergie dépensée pour sa destruction et l'éventuel recyclage de ses composants représente également des coûts énergétiques.

Pour avoir une vue d'ensemble de l'impact, du point de vue énergétique comme en termes de ressources, on peut pratiquer une analyse du cycle de vie (ACV). Il s'agit d'un bilan considérant les points énoncés ci-dessus, et définissant la quantité de matériaux et l'énergie déployée pour leur utilisation durant tout le cycle de vie.

Toutefois, différents facteurs font que l'ACV est encore loin d'être une solution parfaite : la volonté de l'analyse d'être globale et exhaustive, la complexité des processus (extraction, transformation, recyclage, etc.), l'évolution de ces processus dans le futur, le nombre de produits, de sous-produits à recenser, la manière dont elle devrait être intégrée au processus de conception architecturale, l'aspect très spécifique et technique de l'analyse... Malgré ces difficultés, l'ACV reste néanmoins la meilleure option à l'heure actuelle pour déterminer l'impact environnemental d'une construction.

Cette analyse est complexe et n'échappe pas à la numérisation des processus. Ainsi, différents logiciels existent pour l'effectuer, mais le besoin d'interopérabilité (nécessaire à la simplification des processus, pour éviter les ressaisies d'information chronophages et multipliant le risque d'erreur) fait que de plus en plus, ces logiciels permettent la lecture de formats ouverts (ifc) et certains sont même des plugins pour des logiciels de modélisation BIM, tendant vers des solutions à logiciel unique permettant la gestion du projet dans son ensemble.<sup>6</sup>

### *Les mesures politiques*

Cela fait environ une cinquantaine d'années que limiter la consommation énergétique est devenu un sujet politique. Les prises de conscience des années soixante n'ont pas eu d'impact notable sur la gouvernance, hormis l'ONU qui s'est penché spécifiquement sur la problématique de la pollution avec un sommet en 1972<sup>7</sup>, et il a fallu attendre le premier choc pétrolier une année plus tard pour que des réglementations thermiques soient édictées au niveau national, à l'image de la RT 1974 en France.

Depuis, différents sommets internationaux ont été organisés et ont parfois débouché sur des accords, stipulant des objectifs en termes de réduction d'émissions de la consommation d'énergie ainsi que de gaz à effet de serre. Beaucoup d'états ont par conséquent légiféré pour atteindre leurs engagements, ce qui, pour le secteur du bâtiment, s'est globalement traduit par des normes et réglementations toujours plus contraignantes.

## Développement

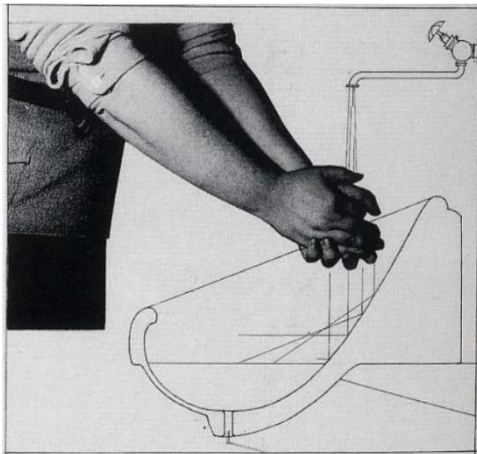
### Le confort

La notion de confort est dans ce travail un thème récurrent, qu'il convient de définir. En effet, sans qu'il ne s'affiche comme central dans la problématique du *high-tech* au service du *low-tech*, ses implications sont malgré tout au cœur des questionnements.

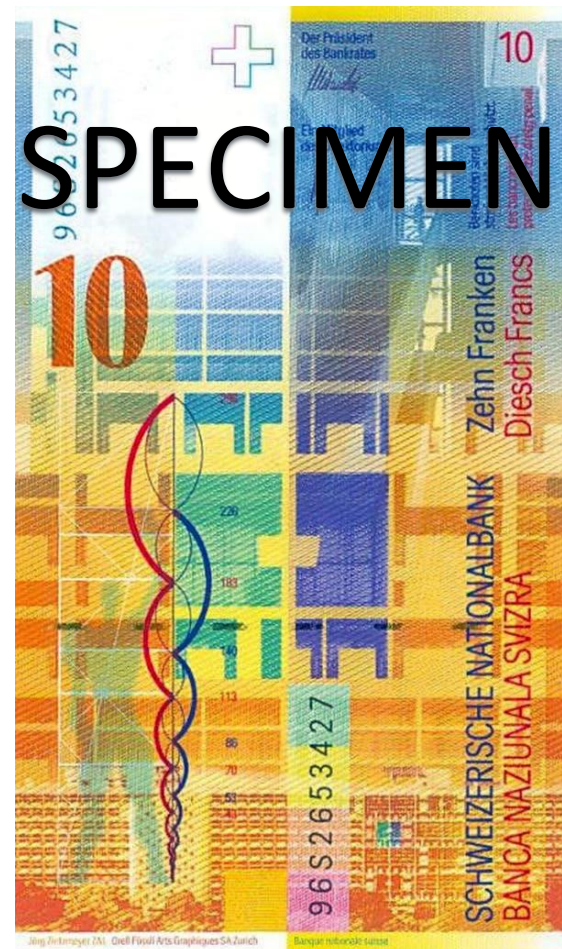
### *Définition*

Comme le développe Eduardo Prieto dans *Les dispositifs du confort dans l'architecture de XXe siècle : connaissance et stratégies de sauvegarde*<sup>8</sup>, la notion de confort a passablement évolué jusqu'à sa définition actuelle. D'abord issue du terme français *conforter*, avec une forte connotation sécurisante sur les plans psychologique et physique, la notion de confort est passée outre-manche pour signifier un bien-être que l'on peut assimiler à de la sérénité, avant que le terme ne soit réapproprié par la noblesse française pour évoquer l'organisation rationnelle des espaces et le luxe décoratif des intérieurs rococos, jugés satisfaisants pour la perception humaine.

Toujours selon Prieto, la dénotation actuelle a commencé à prendre forme dès la révolution industrielle avec la *Poétique de l'hygiène*, ventilant pour lutter contre les miasmes, qui s'ajouta au confort purement thermique. L'idéologie des modernes, elle, avec ses grands plans vitrés – et le contact visuel avec la nature et l'extérieur – assimila au confort un sens plus psychophysiologique, où la relation du construit avec l'être humain, dans ses proportions (le *Modulor*, de Le Corbusier) et ses sens, était centrale. Les sanatoriums sont à cet égard un programme symbolique de cette période : rappelons le soin apporté par Alvar Aalto aux détails des lavabos du sanatorium de Paimio, qui étudia la tangence du filet d'eau avec la surface du lavabo pour minimiser le bruit<sup>9</sup>, ou encore les solariums, offrant aux résidents un bien-être par les rayons du soleil et le plein-air purifiants.



Source image : Reed, Alvar Aalto, n.69



Billet de banque suisse en honneur de Le Corbusier et du principe du Modulor, appliqué dans son architecture

La définition du confort qui est pertinente pour notre sujet, est celle issue des réflexions des modernes, associant à ces besoins physiologiques plus ou moins mystifiés par les idéologies, une approche réellement scientifique allant de pair avec les progrès de la médecine et de la compréhension du corps humain. Le confort se définit plus spécifiquement : confort hygrothermique, visuel, respiratoire, acoustique, et possiblement dans un futur proche, électromagnétique.

### *Paramètres physiques*

Les conditions confortables peuvent être représentées par des plages de tolérance vis-à-vis de différents paramètres physiques mesurables.

#### *Confort hygrothermique*

L'inconfort hygrothermique est vulgairement la sensation d'avoir trop chaud ou trop froid. Ce confort dépend d'un équilibre qu'il est nécessaire de maintenir. Cette sensation est influencée par plusieurs facteurs.

#### *L'activité métabolique*

Il s'agit de la puissance déployée par le corps humain pour assurer son fonctionnement et son activité, qui produit de la chaleur, et se mesure donc en watt. Elle est différente entre les états de repos ou d'effort physique et varie de 80-100 watts à plus de 400 watts pour les sportifs d'élite.<sup>10</sup>

#### L'habillement

Il ajoute une résistance thermique entre la surface du corps et l'environnement, et s'oppose ainsi à la perte de chaleur du corps humain.

#### La température de l'air

Selon la température de l'air, un échange thermique positif ou négatif va s'effectuer, par convection. Si l'air est plus froid que le corps, l'air réchauffé au contact de la peau ou d'un vêtement devient moins dense et s'élève, aspirant de l'air moins chaud qui s'échauffera de la même manière.

#### La vitesse de l'air

La vitesse de l'air a un double impact puisque d'une part, elle va augmenter l'énergie transférée par convection (en remplaçant d'autant plus vite l'air réchauffé par de l'air plus froid) et de manière plus significative, en augmentant l'évaporation de la sueur, le mécanisme naturel de rafraîchissement de l'organisme.

#### La température des parois à proximité

Tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu va émettre un rayonnement infrarouge. Ainsi, les parois échangent constamment de l'énergie avec les corps à proximité (autres parois, sols, occupants) ce qui peut occasionner une sensation de froid si les parois ne sont pas suffisamment chaudes et ne rayonnent pas assez.

#### L'humidité relative de l'air

Le confort hygrothermique est impacté par l'humidité relative de l'air car de celle-ci dépend la capacité d'évaporation, donc de refroidissement du corps. Un air saturé en vapeur d'eau ne permettra pas au corps d'évacuer sa chaleur par la transpiration, et le corps va transpirer plus encore car c'est le seul moyen à sa disposition. À l'inverse, un air trop sec va provoquer un dessèchement et une irritation des muqueuses (peau et voies respiratoires) et des yeux.

#### *Confort visuel*

Il se décline en plusieurs notions.

#### Éclairage

Suivant l'activité, il est nécessaire d'avoir des niveaux d'éclairage différents. Des travaux de précision requièrent un éclairage de 1500 Lux, alors que 200 Lux suffiront pour accomplir un travail de manutention dans un entrepôt. Aussi est-il souvent préférable d'avoir un facteur de lumière du jour (FLJ) élevé, pour réduire la consommation électrique d'une part, mais aussi pour assurer une qualité d'atmosphère adéquate au local en question.

#### Contraste de luminances

Un contraste de luminances trop élevé dans le champ visuel mène à un inconfort. Il y a deux types d'éblouissement à distinguer.

On parle d'éblouissement physiologique lorsqu'une luminance est trop élevée par rapport aux autres dans le champ visuel : quand une lumière puissante s'allume, ou qu'on ouvre les stores le matin par exemple. L'éblouissement physiologique entraîne en général une réaction du corps (fermeture temporaire des paupières ou détournement du regard, et rétrécissement de la pupille).

L'éblouissement psychologique quant à lui se caractérise par une gêne, désagréable, mais qui n'implique pas nécessairement une réaction comme l'éblouissement physiologique. Il se produit quand une luminance dans le champ visuel parvient à détourner l'attention d'un sujet.

### *Confort respiratoire*

Le confort respiration traite de la qualité de l'air que l'on respire, et renvoie à sa composition. Il est normalement constitué à près de 78% d'azote, d'environ 21% d'oxygène, le pourcent restant étant constitué d'argon, de CO<sub>2</sub>, et de traces d'autres gaz rares et composés gazeux.

Dans l'air à l'intérieur des habitations, il est souvent constaté une concentration de polluants plus élevée qu'à l'extérieur, d'où le besoin de ventiler l'habitat. Ces polluants sont de différentes natures : il peut s'agir d'une concentration anormalement élevée en CO<sub>2</sub> ou en vapeur d'eau due à la respiration et aux activités des occupants, de monoxyde de carbone (CO) à cause d'une installation de chauffage défectueuse par exemple, d'oxydes d'azote issus des moteurs thermiques, de composés organiques volatils (COV), ou encore de polluants issus des matériaux de construction tels que les aldéhydes.

Un problème, selon les régions, est la présence de radon, issu de la décomposition d'atomes fissiles dans les roches granitiques. Ce gaz noble est lui-même instable et va se décomposer en différents autres atomes potentiellement nocifs, dont le polonium et le plomb, c'est pourquoi un vide sanitaire ou une ventilation adéquate peuvent être nécessaires.

### *Confort acoustique*

Un peu à la manière du confort visuel, le confort acoustique doit être assuré pour permettre l'accomplissement d'activités. Premièrement, la géométrie, le volume et les propriétés acoustiques des surfaces ont une influence sur le temps de réverbération, lequel peut contribuer ou nuire à l'intelligibilité. Aussi, l'écart de temps entre l'audition du son direct et réfléchi ne doit pas excéder certaines valeurs, différentes selon qu'il s'agisse de parole ou de musique, sans quoi l'intelligibilité en pâtira. Une étude approfondie est particulièrement nécessaire pour la conception d'auditoires et de salles de concert. Elle l'est en revanche moins pour l'habitat, où il suffit que les rapports entre les dimensions d'une pièce ne s'approchent pas trop de rapports rationnels, le rapport idéal étant celui du nombre d'or.

Deuxièmement, des sons peuvent occasionner de la gêne, s'ils sont anormalement élevés par rapport au niveau sonore ambiant (effet de masque), ou provoquant une rapide et forte augmentation du niveau sonore (un fort ronflement qui vient troubler une nuit calme par exemple), ou encore si le niveau sonore est tout simplement trop élevé, comme dans un atelier, ou au passage d'un train. Cet inconfort peut aller jusqu'à provoquer des dommages temporaires ou permanents à l'appareil auditif, voire même entraîner sa destruction si le niveau sonore dépasse 120 décibels pendant une certaine durée de temps.

Dans l'habitat, obtenir un confort acoustique pourra aussi nécessiter la mise en place une isolation acoustique appropriée, qu'elle soit pour isoler du bruit environnant (circulation, trafic aérien, etc) ou du bruit provenant d'un local voisin. Comme le son peut aussi se déplacer dans les solides, les détails de construction et les matériaux employés permettront de rompre la transmission du bruit solidien.

L'être humain peut percevoir des sons de fréquence allant de 20 à 20000 hertz, mais ressentir du malaise à cause d'infrasons, inaudibles. L'impact de ces sons n'est pas bien connu, même s'ils font parfois débat. Leur origine peut être naturelle, ou artificielle. Vladimir Gavreau, chercheur français, expérimenta avec les infrasons dans les années soixante pour des applications militaires, avec un certain succès<sup>11</sup>. Dans les bâtiments comme ailleurs, des installations techniques peuvent ainsi causer un fort inconfort avant que l'origine de cet inconfort ne soit clairement identifiée. Notons que les effets nocifs n'apparaissent qu'à partir de certains seuils de niveau sonore.

### *Confort électromagnétique*

Le confort électromagnétique n'est pas reconnu, mais il semble raisonnable de penser qu'avec l'arrivée de la cinquième génération de standards de la téléphonie mobile, et parce que les espaces sont continuellement plus chargés en ondes électromagnétiques, des recherches et études révèlent les

aspects problématiques pour la santé que peuvent occasionner certaines fréquences d'ondes électromagnétiques. À nouveau, nous pouvons généraliser en disant que pour n'importe quelle fréquence, il existe des seuils de puissance à partir desquels le rayonnement devient nuisible, nocif, et mortel<sup>12</sup>.

### *Le confort en tant que construction sociale*

À l'image du confort électromagnétique, qui ne fait pas encore l'objet de normes en architecture, les normes actuelles sont nées progressivement, avec la compréhension croissante de la physiologie humaine, et à force d'expériences. Il ne fait nul doute que nous n'avons pas encore la connaissance exhaustive des impacts positifs comme négatifs que notre environnement peut avoir sur l'organisme.

Des pratiques apparemment contraignantes se révèlent souvent bienfaisantes pour l'organisme. Le premier exemple à venir à l'esprit est le sport : il est certes fatiguant, c'est même le principe de l'effort physique, mais l'inconfort temporaire stimule le corps et produit des hormones bénéfiques, comme des endorphines et la dopamine. Il en va de même pour la pratique traditionnelle du bain finnois, ou sauna, connu par les peuplades des régions froides : pourquoi mettre son organisme dans un environnement si inconfortable (quand on le situe sur le diagramme psychrométrique) qu'on doive en sortir après un quart d'heure seulement et aller se jeter dans un bain d'eau glacée, à défaut d'un trou dans la glace d'un lac en Finlande, si ce n'est pas pour de bonnes raisons ? Aussi, des rites de privation présents dans de nombreuses religions (ramadan, carême, etc.) peuvent être jugés archaïques et dépassées par certains, dans nos sociétés où la calorie alimentaire est si facile d'accès, pourtant, il semble que ces jeûnes puissent avoir des vertus thérapeutiques. Et le meilleur pour la fin, la dernière de ces pratiques en date, j'ai nommé... la cryothérapie ! Des gens paient pour se retrouver nus quelques minutes dans une ambiance avoisinant les -150° Celsius.

Trêve de sarcasmes :

Quelles pratiques autopunitives en apparence peuvent s'avérer en fait être bénéfiques pour notre organisme ? Pourquoi sommes-nous disposés à en pratiquer certaines dans des contextes spécifiques seulement ? Quel argument rationnel exige que l'environnement dans lequel nous vivons se doit d'être maintenu à une température bien précise été comme hiver ? Ne serait-ce pas là une prétention de l'Homme, qui cherche à prouver son pouvoir et ses connaissances en minimisant les aléas et incertitudes dans son environnement, le conduisant d'une part à consommer matériaux et ressources pour contrôler les conditions de son foyer, et d'autre part à standardiser chaque matériau pour en avoir une maîtrise absolue ?

Les normes de confort semblent aujourd'hui incontestables<sup>e</sup>, alors que nous l'avons vu, il s'agit d'une construction sociale. Nous mettons même volontiers notre confort entre parenthèses, selon le contexte. Bernard Rudofsky le faisait très justement remarquer dans un passage de son livre *Architecture Without Architects*<sup>13</sup>, que nous traduirons comme suit :

*Il y a une sacrée dose d'ironie dans le fait que, pour conjurer la dégradation physique et mentale, l'habitant urbain s'échappe périodiquement de son antre magnifiquement aménagé pour chercher le bien-être dans ce qu'il considère être des environnements primitifs : une cabane, une tente, ou, s'il est moins conservateur, un village de pêcheurs ou un bourg à l'étranger. En dépit de sa manie pour le confort mécanisé, ses chances de trouver la détente dépendent de son absence même.*

---

<sup>e</sup> Mon propos n'est pas ici de contester unilatéralement le concept de norme, qui demeure une sécurité et une protection dans de nombreux cas. Il s'agit plutôt de mettre en évidence le fait que certaines peuvent être absurdes dans leur application, voire néfastes à plus d'un titre, et que de les appliquer unilatéralement sans aucune réflexion n'est pas nécessairement la voie à suivre.

Ainsi, il semble même salubre pour nos organismes, de se frotter de temps à autre à la rudesse de dame nature.

Il est certain que par le passé, l'environnement intérieur n'a pas toujours été confortable pour tout le monde. C'était synonyme de richesse que de pouvoir se targuer de posséder une habitation toujours bien chauffée, non pas tant pour le bien matériel, mais parce que cela supposait qu'on avait les moyens de consommer beaucoup de bois. Ce n'était alors pas un problème majeur, bien qu'en Europe, la déforestation était déjà conséquente au Moyen Âge, due au besoin de terres cultivables ou simplement pour bâtir et se chauffer. De même, l'effort pour produire un appareil régulier et harmonieux, corrigeant manuellement la nature brute de la pierre traduisait bien la dépense qu'était prêt à concéder un propriétaire. La richesse, fondement de la lutte des Hommes pour s'élever parmi les Hommes, ne repose pas dans le fait de posséder, mais bien dans la capacité de chacun à pouvoir dépenser.

### *Vers un environnement bien tempéré*

Ce clin d'œil à Reyner Banham est obligatoire compte-tenu du sujet traité. L'ingénieur et historien de l'art s'est lancé dans les années soixante et septante dans une critique de la période moderne avec la publication d'une série de livres. Dans son ouvrage de référence<sup>14</sup>, il décrit les modes de gestion de l'environnement : le mode conservatif consiste à isoler des conditions externes par la masse et l'inertie des murs. Le mode sélectif est le fait de permettre le passage de certains flux, au moyen d'éléments constructifs mobiles ou non. Le mode régénératif enfin, consiste en l'utilisation d'une source d'énergie externe, pour contribuer à la gestion de l'environnement interne.

Ces modes permettent une véritable relecture de l'histoire de l'habitat, pertinente pour traiter ce sujet du point de vue énergétique.

### *L'époque préindustrielle*

#### Premiers outils

Dans l'impitoyable monde préhistorique, le plus adapté et performant survivait. Les humanoïdes de cette époque ont commencé à créer des outils pour effectuer leurs tâches quotidiennes élémentaires. Le premier outil est vraisemblablement la pierre qui, jetée, lui permettait une chasse plus efficace ainsi que de maintenir à distance des prédateurs naturellement plus armés, à moins que ce ne soit le bâton, (ou l'os, comme suggéré par Stanley Kubrick dans *2001 : l'Odyssée de l'espace* dans la fameuse scène de l'aube de l'humanité) qui s'avérerait somme toute plus efficace que les mains nues pour en venir à bout d'une proie ou d'un congénère rival.

À partir de ce moment, l'Homme a commencé à façonner son environnement direct, utilisant et transformant des ressources plutôt que de les consommer directement. Allant de pair avec sa compréhension croissante du monde environnant, les outils d'abord rudimentaires n'ont depuis pas cessé de se complexifier.

#### L'environnement

Comme l'explique Eduardo Prieto, deux visions s'opposent pour la domestication de l'ignition<sup>15</sup> : celle de Vitruve et celle d'Alberti. Le premier soutient une approche énergétique – le feu dompté rassemble, pousse au développement d'un langage socialisant les êtres, et conduit à l'établissement et à la construction, dans cet ordre précis – alors que le second plaide pour une version tectonique, où la maîtrise du feu en vint à être développée au sein d'une construction contenant déjà un intérieur abrité des conditions extérieures, qui créait un microclimat. Dans un cas comme dans l'autre, certes selon différents modes initiaux, il est toujours question d'altérer localement l'environnement naturel pour y créer des conditions plus favorables. Unifier les différentes définitions du terme foyer supporte d'ailleurs l'idée du lien fondamental existant entre la source de chaleur et les prémices d'une

civilisation. Le terme *foyer* se définit comme le feu lui-même, l'endroit prévu pour celui-ci, mais aussi la cellule d'habitation familiale.

Sa maîtrise du feu fut certainement le premier moment où l'*Homo* essaya consciemment d'altérer son environnement. Ceci est arrivé bien avant sa sédentarisation<sup>16</sup>, permettant de trancher entre les deux visions exprimées ci-dessus. Il semble donc que l'*Homo* ait commencé à influencer son environnement direct en consommant selon un mode purement régénératif, plutôt que d'imaginer limiter les déperditions. En même temps, peut-on lui en vouloir ? Les ressources étaient, de son point de vue, illimitées...

#### Habitats primitifs

Ce n'est que relativement récemment, lors du Néolithique, que l'Homme s'est sédentarisé. Cela lui a permis de développer des habitats plus perfectionnés qu'auparavant : s'abriter est devenu habiter.

Loin de l'image fantasmée de la *Cabane primitive* de Marc-Antoine Laugier sur les origines de l'architecture, les découvertes archéologiques semblent indiquer que les premiers habitats construits aient été des huttes rudimentaires, rapprochant la vérité de l'idée du revêtement, défendue par Gottfried Semper. Philosopher sur ces théories de l'architecture empreintes de poésie et d'idéologie n'apporte pas une contribution significative au sujet, c'est pourquoi ce point ne sera pas plus développé.

Remarquons tout de même que les habitats ont jusqu'à ce moment été conçus selon les modes conservatifs et régénératifs.

#### L'architecture vernaculaire

Quelle que soit la plus ancienne architecture dont nous ayons des vestiges aujourd'hui, il est difficile de se résoudre à croire qu'une seule souche ait influencé l'architecture à travers le monde d'alors. Les déplacements humains n'étant pas une caractéristique connue des sédentaires, il semble plus probable que des groupes se sédentarisant dans différents climats produisent spontanément des habitats primitifs, considérant en premier lieu les priorités découlant des conditions locales et faisant avec les ressources à disposition.

Les techniques les plus efficaces pour un climat donné se sont alors développées incrémentalement jusqu'à une stabilité, où un plateau a été atteint. Celui-ci correspond au concept développé par Bernard Rudofsky dans son ouvrage déjà mentionné<sup>17</sup>. Ces constructions dites *non-pédigrées* n'étaient en ces temps pas désignées par le terme vernaculaire, ni même considérées comme de l'architecture. L'usage du terme n'était appliqué qu'aux constructions *nobles* réalisées pour les détenteurs de pouvoir et de richesse, qu'ils soient seigneuriaux, religieux ou autres.

Jusqu'à l'essor de l'industrie – et ce pour des raisons que nous verrons ci-après – il n'y avait pas d'architecte pour l'habitat des gens communs : les constructeurs appliquaient simplement les techniques connues des anciens et éprouvées par le temps. Il s'agissait donc de faire le meilleur usage (techniques) des matériaux disponibles localement en fonction des contraintes climatiques.

#### La révolution industrielle

Une révolution, en effet, qui affecta radicalement la lente mécanisation, en cours depuis des siècles de par l'Europe. Déjà à cette époque, quelques typologies plus denses que les habitations de villages paysans pouvaient exister. Ils étaient généralement collectifs et associaient une fonction autre que celle de simplement loger, tels les hôpitaux, les cloîtres, et les monastères associés à de petites manufactures. Aussi, quelques essais typologiques remontant au XVIIIe siècle, tels que le phalanstère de Charles Fourier, ou la Saline d'Arc-et-Senans de Claude-Nicolas Ledoux établirent des précédents, avec toutefois des cadres idéologiques bien spécifiques.

La forte croissance économique a été rendue possible par les progrès de la mécanisation, couplée à l'utilisation du charbon comme source d'énergie primaire en raison de sa densité énergétique<sup>18</sup> plus élevée que le bois. Les premières machines à vapeur de la fin du XVIIIe siècle sont d'ailleurs des pompes consommant du charbon pour extraire l'eau des mines... de charbon, prouvant la valeur cruciale qu'avait cette ressource. Lentement toutefois, la production s'est industrialisée et mécanisée, produisant quantités de matériaux et de biens industriels alors qu'ils étaient jusque-là artisanaux voire impossibles à manufacturer. Les modes de production et de consommation ont ainsi progressivement été altérés : on ne travailla plus seulement au champ pour s'alimenter, mais également en usine pour gagner de la monnaie d'échange pour vivre et acheter les biens produits.

#### L'exode rural

La centralisation du travail conduisit à l'exode rural et à la densification progressive des villes, nécessitant de construire différemment pour loger le prolétariat.

La densification eut comme répercussions l'insalubrité et une augmentation de la mortalité. Le problème des conditions de vie du prolétariat avait également des conséquences sur la capacité des ouvriers à travailler en usine, ce qui éveilla la conscience – ou l'intérêt ? – des propriétaires d'industries qui parfois, construisaient des habitations à proximité pour permettre des conditions décentes, ce qui donna naissance aux cités-ouvrières. Aussi, les taudis insalubres des centres médiévaux saturés devaient faire place à de nouvelles typologies, développées par des architectes et urbanistes de plus en plus conscients de leur responsabilité envers les conditions de vie de tous. Leur développement ne s'est toutefois pas effectué immédiatement mais fut progressif durant tout le XIXe siècle, accompagnant l'industrialisation.

Ces nouvelles typologies furent développées considérant différents critères :

- les aspects sociaux, le fait d'accéder à la propriété par exemple
- la mobilité, en considérant la proximité avec les industries pour le travail
- la salubrité, découlant sur des plans et règles d'urbanisme, ou définissant des conditions minimales de vie dans un logement
- les matériaux à disposition, qu'ils soient issus ou non de l'industrie

#### L'hygiénisme

Avec les conditions de vie déplorables des ouvriers et les problèmes sanitaires subséquents, tout un nouveau courant de pensée s'est constitué : l'hygiénisme, qui influa sur les idéologies et conduisit au développement de typologies nouvelles. C'est véritablement à ce moment-là que, des règles et principes, vont naître les normes.

#### Tenements

Ainsi, on trouve dans les villes industrielles d'Écosse des *tenements*, caractéristiques de Glasgow et d'Edinburgh. La typologie de ces petits immeubles contigus est relativement stricte : ils se développent de manière linéaire, pour former des barres ou des îlots. Une cage d'escaliers axée, donnant sur la façade arrière, dessert généralement deux 3 pièces. La façade avant contient le salon et la chambre, tandis que la cuisine et la salle de bain occupent l'espace jouxtant la cage d'escaliers. Un seul de ces appartements contenait en principe au minimum quatre occupants, dormant dans des alcoves aménagées dans la cuisine, le salon et éventuellement la chambre. Chaque pièce disposait d'une cheminée. Cette typologie possède donc une densité élevée, tout en permettant des conditions de vie tolérables pour les ouvriers et leur famille.

### Cité linéaire

La *Ciudad Lineal* est un des districts de la ville de Madrid, unique réminiscence d'une typologie urbaine développée par Arturo Soria y Mata pour lutter contre les effets néfastes de la densification. La cité linéaire qu'il a imaginée, et en partie réalisée (un tronçon de 5 km sur les 53 prévus) en 1882 avait pour objectif d'urbaniser la campagne et de ruraliser la vie urbaine, de lutter contre la spéculation foncière, et de fournir au prolétariat des habitations confortables, avec une desserte généreuse de transports collectifs et tous les équipements techniques imaginables de l'époque, comme l'éclairage nocturne des rues, les réseaux de gaz, d'eau et même le chauffage à distance.

Dans son projet, des règles d'urbanisme pour la construction des bâtiments étaient édictées de manière très précise, afin d'en cadrer le développement et d'assurer que les conditions de vie soient garanties. Son projet finit par succomber à la pression spéculative : les parcelles se sont densifiées et les maisons ont fait place aux immeubles.

### Garden cities

En Angleterre à la fin du XIXe siècle, Ebenezer Howard développa le concept de la cité-jardin en tant qu'alternative aux centres industrialisés. Ces cités seraient reliées par route et rail aux pôles plus fortement industrialisés. Ils offriraient, tout comme la cité linéaire de Mata, à la fois les avantages de la campagne et de la ville, par un tissu urbain assez peu dense, et néanmoins une proximité avec des industries et emplois au salaire décent.

Howard, Raymond Unwin et Richard Barry Parker, deux architectes et urbanistes proches du mouvement *Arts & Craft*, et sensibles à la condition ouvrière, participèrent à la construction en tant qu'architectes de la première *Garden-City* de Letchworth en 1902. Unwin prendra ensuite part à l'élaboration du rapport Tudor Walters, qui proposa six plans types d'habitations, et différentes normes et directives à suivre<sup>19</sup>. Les habitations suivent généralement ces recommandations : elles sont individuelles ou mitoyennes, ne dépassent que rarement rez-de-chaussée plus un étage, et construites en briques, parfois enduites.

### Les constructions rurales

L'exode rural du XIXe siècle a certes conduit une portion significative des populations à aller habiter près des centres urbains, cependant, on continuait à construire et à habiter à la manière *d'autrefois* partout dans les campagnes au début du XXe siècle. Le savoir-faire qui produisait l'architecture vernaculaire dans certaines régions de France persistait, et l'extinction, aujourd'hui muette, de cet artisanat s'est véritablement produite dans le fracas des guerres mondiales.

C'est lors de ces deux épisodes traumatiques que la France envoya au front les ouvriers bâtisseurs, car eux-seuls avaient à leur disposition les connaissances permettant de construire et stabiliser les structures comme les tranchées<sup>20</sup>, essentielles à l'effort de guerre. Le savoir-faire s'est donc éteint avec les hommes dans les tranchées, et le besoin d'une reconstruction rapide après 39-45 fit qu'on se tourna vers d'autres solutions constructives. Ce fut surtout l'expérience des bâtisseurs en terre crue qui a irrémédiablement été perdue, et dans une moindre mesure les techniques de travail du bois.

### Le modernisme

Même si on peut retracer certains concepts originels du mouvement à l'école de Chicago, notamment en raison des gratte-ciels, de leur usage des matériaux industriels et du nécessaire recours à la technique des bâtiments, c'est surtout après la première guerre mondiale que s'opéra une transition majeure en architecture. En effet, l'influence des courants artistiques du début du siècle, combinée à la recherche d'une esthétique purement industrielle firent glisser l'architecture vers une méthode de conception différente, consistant à concevoir un bâtiment selon des considérations artistiques de forme, de volume, de transparence et de fluidité de l'espace, et d'éléments répétitifs et standardisés, soulignant le caractère industriel et moderne. Le point commun de beaucoup des constructions qui allaient suivre est certainement qu'en s'affranchissant partiellement du mur grâce au béton armé et

optant pour la transparence des grands vitrages, elles dépendaient en grande partie des progrès réalisés au XIXe siècle dans le domaine des techniques du bâtiment, comme théorisé par Siegfried Giedion<sup>21</sup>. Les différentes tendances étant complexe et variée, et n'étant qu'un épiphénomène certes très intéressant, du présent sujet, elle ne sera pas détaillée en profondeur. Toutefois, nous pouvons en avoir une certaine lecture, rapide, soutenant notre propos.

Empreintes des idéologies artistiques, des approches géométriques universalisantes se sont affranchies des contraintes du lieu pour proposer des architectures abstraites de leur environnement physique et culturel, et exploitant le potentiel des produits industriels et standardisés. Peu après, les concepts d'habitabilité et de fonctionnalité programmatique des espaces ont été développés, soutenus par la normalisation des matériaux et équipements, ainsi que celle des activités. Vint ensuite l'idée que l'homme étant au centre de l'architecture, c'est selon sa physiologie et ses perceptions qu'il faudrait concevoir, menant l'architecture à raccrocher au site et au contexte par le biais du paysage et des points de vue généralement, après toutefois s'être affranchi du contexte climatique.

L'architecture brutaliste, courant du mouvement moderne, des Smithson évoquera paradoxalement une sobriété esthétique par l'exaltation des dispositifs techniques. Toutefois, la frénésie d'appropriation du brutalisme – terme si interprétable et interprété que très rapidement, il finira par ne plus être véritablement définissable<sup>22</sup> – fera que certains vont tenter de concilier l'usage récent du béton brut avec l'architecture traditionnelle, tendant parfois vers ce qui s'apparenterait à une tentative de gestion passive de certains paramètres de l'environnement interne, mais se résumant souvent à l'ambiance lumineuse.

Cette lecture quelque peu réductrice et simpliste de l'évolution du mouvement moderne a pour but de démontrer le fait que son origine était l'abstraction du site, et que le contexte n'y est revenu, à de rares exceptions près, que par sa composante paysagère. Les villas isolées, tout comme les sanatoriums, sont un type de programme caractéristique de l'architecture moderne. Elles ont été rendues possibles par le transport automobile individuel d'une part, à l'image de la villa Savoye de Le Corbusier basée sur les dimensions du rayon de braquage d'une automobile, mais surtout par le recours massif à la technique, alimenté en carburant fluide et donc plus aisément transportable, permettant de concevoir de véritables machines à habiter, comme la fascination pour le paquebot, propre à cette époque, le rappelle.

Cette architecture reposait donc avant tout sur le mode régénératif, qui supportait techniquement les volontés artistiques, stylistiques, conceptuelles et idéologiques, en assurant la gestion du climat interne. Les éléments tectoniques, dont le rôle était jusqu'alors défini par les modes conservatifs et sélectifs, ont alors pu se libérer de cette mission pour devenir façonneurs de spatialités.

### *Le confort oui, mais à quel prix ?*

De manière analogue à l'*Homo Erectus* qui domestiqua le feu, et tout comme la noblesse et le pouvoir au Moyen Âge, l'Homme moderne, devant une telle accessibilité à l'énergie et aux ressources, a commencé à développer des utilisations avant de se préoccuper de l'efficacité énergétique<sup>f</sup>. Dans ce contexte, utiliser et distribuer était plus important que de conserver. Il y a là un principe général qui traverse les âges : la loi du moindre effort. Tant que le combustible est disponible, et s'il paraît illimité, pourquoi isoler alors qu'il suffit d'en apporter plus. Cette tendance à la surconsommation s'est effectivement maintenue jusqu'au moment où l'accessibilité des combustibles a chuté, avec le premier choc pétrolier qui arrivera bien plus tard.

Le développement de la notion de confort en occident est donc véritablement à coupler avec le recours massif aux combustibles fossiles pendant les *trente glorieuses*, comme le graphique suivant en atteste.

---

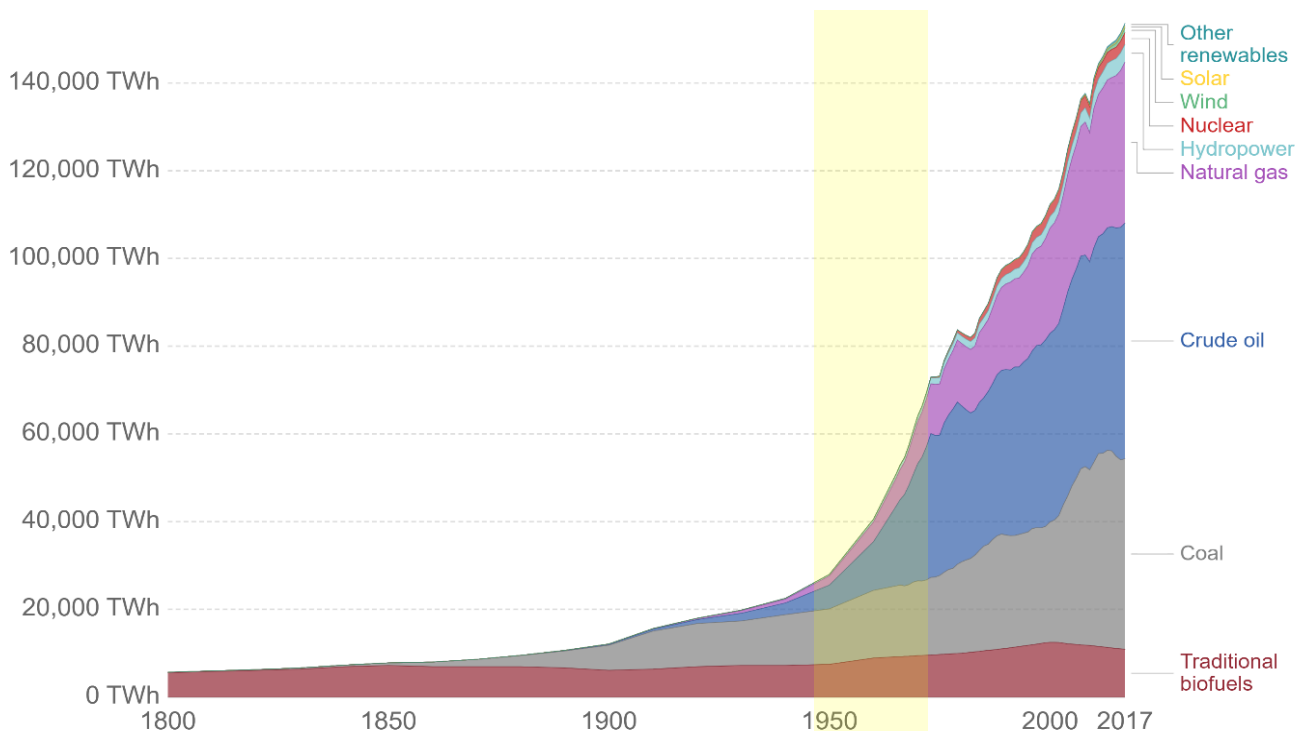
<sup>f</sup> Les rendements ont toutefois toujours été recherchés, car synonymes de performances, mais pas l'économie de ressources, largement disponibles.

C'est l'énergie qu'ils contiennent qui, avec l'avènement des techniques du bâtiment, rendirent le confort de plus en plus accessible, jusqu'à ce qu'il devienne commun, puis normalisé et enfin obligatoire. En plus d'avoir fourni à tous la notion de confort actuelle, cette courte période s'est accompagnée par une production matérielle accrue de biens de consommation, contribuant à façonner nos habitudes. Le luxe, propre à une époque, de pouvoir dépenser de l'énergie pour maintenir un environnement bien tempéré et agréable à vivre a fait place au luxe de pouvoir sacrifier des quantités d'argent déraisonnables pour certains biens matériels.

## Global primary energy consumption

Global primary energy consumption, measured in terawatt-hours (TWh) per year. Here 'other renewables' are renewable technologies not including solar, wind, hydropower and traditional biofuels.

Our World  
in Data



Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

CC BY

Ce regard sur le passé doit nous faire comprendre le caractère exceptionnel des conditions obligatoires aujourd'hui, dans lesquelles nous vivons. Il est également nécessaire de comprendre que cet état n'est pas plus naturel qu'il n'est durable dans les conditions actuelles puisqu'il repose sur des ressources énergétiques accumulées durant les âges, dont l'unique source est le soleil, et que le mode de vie occidental (Europe et Amérique du nord), qui a longtemps fait office de modèle pour les populations de nombreux pays en développement, dépasse largement ce que cette source offre en termes énergétiques. Le statut de modèle de l'occident ne tient plus vraiment à l'heure actuelle, dépassé par ses propres émules, les pays arabes du Golfe Persique qui, profitant de la manne pétrolière, font comme l'occident en mieux – et donc quelque part, en pire – malgré un *greenwashing* parfois intense, comme la construction de Masdar City à Abou Dabi le laisse à penser.

Nous en sommes revenus au point où le constat suivant doit être fait : il est incontestable que cette position n'est pas durable, mais personne ou presque ne souhaite perdre le confort acquis. Pourtant, à moins d'une profonde remise en question globale des modes de vie, ou d'une échappée technologique vers un nouveau paradigme énergétique, comme le serait la maîtrise d'une fusion nucléaire propre par exemple, accéder à l'énergie nécessaire pour habiter un environnement bien tempéré redeviendra tôt ou tard sous nos latitudes, un luxe.

## L'architecture bioclimatique

*NB : Nous aborderons l'architecture bioclimatique d'un point de vue occidental, correspondant donc aux types de climats qui sont communs à l'Europe et à l'Amérique du nord, avec une saison froide et une saison chaude. Sans précisions contraires, nous considérerons que nous nous trouvons dans l'hémisphère nord. Il va sans dire que des réflexions bioclimatiques appliquées à l'architecture sont bienvenues sous d'autres climats où d'autres stratégies seront déployées. Aussi, nous nous concentrerons sur les conceptions correspondant aux problématiques liées au programme d'habitation.*

Quelques expérimentations d'habitations solaires sont apparues depuis les années trente aux États-Unis, de manière anecdotique, et souvent issues du monde académique<sup>23</sup>. Mais le développement véritable de l'architecture bioclimatique est concomitant des réflexions des années soixante, et des modes de vie alternatifs prônés par le mouvement hippie notamment. Aller vers la réduction de la consommation énergétique pouvait sembler être une voie radicale, sinon absurde, en ces temps : pourquoi faire l'effort d'avoir recours à des moyens passifs quand le coût de l'énergie, et les technologies étaient à ce point accessibles ? Qui contreviendrait à la loi du moindre effort ?

Il ne fallut pourtant pas attendre bien longtemps pour sortir ces utopies de la marginalité : en effet, les premiers chocs pétroliers des années septante remirent en question les modes de vie et de consommation des ressources énergétiques, et donna de plus en plus de crédibilité à ces alternatives naissantes, favorisant par là même leur développement.

L'un des pionniers de l'architecture bioclimatique est Victor Olgyay, architecte, urbaniste et professeur à Princeton, qui voyait dans l'expression architecturale des constructions (ailleurs qu'en occident surtout, parce qu'épargnées des bouleversements des deux guerres en Europe, ou de la standardisation et de l'industrialisation en occident) une réponse aux conditions climatiques. Sa volonté, exprimée dans un ouvrage publié en 1963 intitulé *Design with climate : Bioclimatic approach to architectural regionalism*<sup>24</sup>, était de faire la synthèse des architectures traditionnelles (une année avant qu'elles ne soient qualifiées de vernaculaires par Bernard Rudofsky), adaptées à leur climat, et des possibilités apportées par les avancées techniques.

### Fondements

La différence majeure de l'architecture bioclimatique est qu'elle donne une importance plus grande au climat du site d'implantation, pour tirer parti de son potentiel et fournir à l'occupant des conditions confortables pour effectuer ses activités, contrairement à d'autres types de conception, qui imposeraient une forme construite et son programme et s'emploieraient dans un second temps à normaliser les conditions internes. Elle privilégie ainsi les modes conservatifs et sélectifs, plutôt que régénératifs.

La conception prend avantage des conditions externes, pour que la forme construite produise passivement les conditions internes nécessaires au programme, dont l'occupant est l'acteur principal. Il s'agit donc d'une conception plus écologique – selon la définition donnée en introduction – puisqu'elle considère avant tout les relations et flux entre occupant, habitat et milieu. En vertu de cela, elle va aussi considérer l'impact qu'une construction aura sur son environnement, qu'il soit direct, par les conditions extérieures que sa présence va influencer, ou (si la conception est cohérente) plus distant, comme l'énergie grise des matériaux de construction et la pollution que cela pourrait engendrer, ou les déplacements que la conception engendrerait lors de son utilisation.

Aussi, des systèmes actifs sont parfois utilisés pour contribuer au maintien des conditions internes, mais ceux-ci sortent légèrement du cadre de l'architecture bioclimatique, où l'aspect passif et *low-tech* restent prédominants. Il s'agit souvent de capteurs solaires qui consomment un peu d'électricité pour

alimenter une pompe dans le but d'augmenter le rendement d'une installation. La production d'électricité d'origine photovoltaïque en revanche ne fait pas partie de ce type de conception.

### *L'environnement*

Le choix du site, de l'implantation et l'orientation précises du bâtiment constituent la première étape importante dans une conception bioclimatique.

L'environnement se définit selon plusieurs paramètres :

- les éléments de topographie, proches et lointains, que sont le relief, l'hydrographie et les constructions environnantes
- la course solaire, qui varie au cours de l'année
- l'évolution annuelle des températures
- le vent
- les précipitations
- la végétation

Ces paramètres constituent le site et en décrivent toutes les spécificités, dont la réalisation va tirer avantage selon une stratégie, de laquelle va découler des principes et dispositifs architecturaux, tous deux passifs, et éventuellement des systèmes, actifs. Ce type d'architecture vise à maintenir le confort de l'occupant en considérant son activité, particulièrement s'agissant du confort hygrothermique (température et humidité), respiratoire (qualité de l'air), visuel, et acoustique dans une moindre mesure, car les matériaux utilisés sont en général plutôt absorbants, et les volumes ne suivent pas une géométrie pure et rationnelle d'un point de vue mathématique et ondulatoire.

### *Typologies*

Une réflexion sur les besoins liés à l'utilisation des pièces est essentielle pour concevoir la typologie. Cette réflexion se fera sur plusieurs aspects : le besoin d'éclairage des espaces, la stratégie pour gérer au mieux les apports solaires, le vent et la végétation environnante.

Afin d'optimiser l'illumination naturelle, dans le but de limiter la consommation électrique et assurer une ambiance agréable, l'organisation des sous-parties du programme devra considérer les besoins de chacune d'entre elles, et la course solaire, pour dimensionner les ouvertures de chaque espace. Les zones de jour (séjour, cuisine, bureau) nécessitent un apport lumineux pour les activités qui y sont prévues, tandis qu'on réservera surtout aux espaces secondaires un emplacement orienté au nord, procurant des espaces tampon, voire abrité des apports solaires suivant la fonction.

Aussi un zonage thermique peut être effectué pour grouper des espaces dont les besoins en chauffage sont similaires, et mettre en place des zones tampon pour isoler certains espaces de certaines conditions extérieures, comme un vent froid en hiver par exemple.

### *Dispositifs et systèmes*

Dans ce type de conception, des systèmes et principes vont contribuer à maintenir des conditions internes confortables, ce qui demeure la priorité en architecture bioclimatique.

### *Gestion des apports solaires*

Dans les climats que nous allons considérer, la stratégie consistera avant tout à capter, stocker et retenir les apports solaires durant la période de chauffe pour minimiser les besoins de chauffage, ceux-ci étant très gourmands en énergie, ainsi que de limiter les apports et avoir un concept de rafraîchissement en période estivale, pour éviter les surchauffes et maintenir le confort.

Différencier les apports solaires entre les saisons est effectué en tenant compte de la course solaire. Premièrement, les journées plus courtes hivernales et le soleil bas font que c'est principalement de la façade sud que les apports proviennent, et afin de les maximiser, il convient d'y avoir les plus grandes ouvertures. En été toutefois, des protections solaires horizontales y sont indispensables pour éviter les phénomènes de surchauffe. Ceux-ci ont l'avantage de bloquer les rayons avec un angle d'incidence faible, tout en permettant aux rayons solaires hivernaux d'incidence plus élevée de pénétrer dans le bâtiment. Il peut s'agir d'un avant-toit ou de tout autre élément tectonique, fixe, ou d'une protection mobile comme un store horizontal. Deuxièmement, pour limiter les apports en période estivale, il convient d'observer que ce sont les façades est et ouest, ainsi que le plan horizontal (toiture) qui reçoivent le plus d'énergie. Il est donc nécessaire de protéger les ouvertures au moyen d'équipements mobiles tels que stores, volets ou persiennes. Prendre avantage de la végétation, ou en imposer une, peut aussi être une bonne stratégie pour réduire l'impact des apports solaires estivaux : des arbustes à feuillage caduc permettront de fournir une ombre fraîche bienvenue lors des chaudes journées d'été.

Quel que soit le système de captage (une fenêtre, une double-peau, un mur Trombe, une véranda ou un jardin d'hiver), il fonctionnera généralement sur le principe de l'effet de serre, qui consiste à laisser pénétrer l'énergie sous forme lumineuse pour réchauffer les matériaux à l'intérieur et contenir cette énergie calorifique au sein d'une enveloppe. Cet apport d'énergie réchauffe l'air, mais est majoritairement stocké dans la masse de matériaux, qui selon leurs propriétés thermiques (conductivité thermique, capacité thermique volumique) feront augmenter l'inertie thermique du bâtiment.

Il est souvent intéressant d'avoir une inertie thermique élevée car elle permet d'atténuer le ressenti intérieur des variations de température quotidiennes (jour/nuit) extérieures. Dans de rares cas, majoritairement quand l'occupation varie beaucoup et qu'il est plus économique de ne pas chauffer à la température de consigne pendant de longues périodes, il peut être intéressant d'avoir une faible inertie. Par exemple, pour un chalet occupé que quelques semaines par année, en hiver, le volume se chauffera plus vite s'il possède une inertie faible : l'énergie consommée pour chauffer réchauffera l'air et les matériaux à faibles conductivité thermique et capacité thermique volumique, comme le bois. Par contre, si les éléments de construction étaient en maçonnerie, l'énergie utilisée pour les amener à une température confortable serait nettement plus élevée. C'est aussi ce qui explique que les saunas traditionnels sont en bois, afin que l'air n'ait pas à chauffer de matériaux à l'inertie plus élevée, mais que ce soient des pierres (volcaniques, généralement) qui servent à conserver la chaleur et stabiliser la température.

Nous avons brièvement évoqué différents systèmes de captage. Voici une courte liste et une explication du fonctionnement de chacun d'entre eux.

#### Fenêtre

La fenêtre est le plus basique des capteurs solaires. Elle transmet une certaine portion (définie par le facteur  $g$ , qui dépend des caractéristiques physiques du vitrage) du rayonnement énergétique solaire, et résiste au flux de chaleur sortant, certes moins efficacement qu'une partie opaque. Si elle est ouvrante, des infiltrations d'air sont à prévoir au niveau des joints, ce qui n'est pas négligeable sur l'aspect thermique.

#### Double-peau

La double-peau est une surface vitrée et sert à contenir une lame ou un volume d'air sur l'extérieur du bâtiment, qui va se réchauffer au contact de la surface où arrive le flux énergétique solaire. Cela va permettre de faire monter la température de l'air et faire que la différence de température entre l'intérieur du bâtiment et l'intérieur de la double-peau s'atténue, pour conduire à un flux de chaleur moins grand quittant le bâtiment, voire que celui-ci s'inverse. Il peut à ce titre être intéressant d'y placer des murs épais et massifs, de sorte à profiter d'un déphasage bénéfique.

Cet apport supplémentaire est bénéfique en période de chauffe, mais peut conduire à des excédents en été, c'est pourquoi il peut être nécessaire de la ventiler en l'ouvrant en partie basse et en partie haute pour profiter de l'effet de cheminée qui va aspirer de l'air plus frais en bas. Aussi, la résistance supplémentaire de cette lame d'air vient s'ajouter à la résistance thermique totale, faisant baisser la valeur U de l'enveloppe. Elle a aussi un impact intéressant sur les ponts thermiques.<sup>25</sup>

#### Isolation translucide

Il s'agit d'un type d'isolation qui transmet la lumière et donc les apports solaires. Elle se place à l'extérieur de la façade, permettant à l'énergie incidente du soleil d'être transmise plus loin vers l'intérieur que la face extérieure des éléments composant l'isolation. On l'appelle aussi fréquemment mur capteur.

#### Mur Trombe

Il fonctionne sur le même principe que l'isolation translucide pour ce qui est du captage, la différence étant qu'un espace est laissé entre la couche extérieure et la partie massive du mur, et que des clapets permettent de faire circuler l'air réchauffé par le soleil selon plusieurs configurations : en circuit fermé ou ouvert. En circuit ouvert, en hiver, il réchauffe l'air extérieur et l'envoie à l'intérieur, tandis que l'été, il peut servir à évacuer l'air chaud vers l'extérieur. En configuration fermée, il est ouvert sur l'extérieur l'été afin de ne pas trop accumuler de chaleur, et nécessite éventuellement une protection solaire adéquate. L'hiver, la journée il envoie de l'air intérieur réchauffé vers l'intérieur, et les clapets se ferment la nuit pour que la chaleur interne doive traverser le mur capteur avant de traverser le vitrage pour s'échapper de l'enveloppe.

#### Véranda et serre

Leur intérêt est multiple. Premièrement il s'agit d'un espace tampon, qui additionne donc la résistance thermique de cette nouvelle enveloppe à celle du mur, le protégeant également de la pluie et du vent. Deuxièmement, découlant de ce premier point et du fait qu'elles sont vitrées, elles fonctionnent comme une isolation translucide. Troisièmement, on peut profiter de cet air frais réchauffé pour ventiler l'intérieur, que ce soit par convection naturelle, ou par ventilation forcée. Enfin, il s'agit d'un espace supplémentaire qui peut être utilisé, cependant, il ne devrait pas être chauffé car la résistance thermique des éléments le composant ne sont pas performantes en soi.

Aussi, en période estivale, il convient de ventiler et éventuellement de protéger ce type d'espace des apports solaires, toujours dans le but d'éviter les surchauffes.

#### Capteurs solaires actifs

Il en existe principalement trois différents types : les capteurs plans non-vitrés, les capteurs plans vitrés, et les tubes évacués. Leur fonctionnement est identique : ils captent l'énergie radiative du soleil, la convertissent en chaleur, transmettent cette chaleur à un fluide caloporteur qui va chauffer un espace, ou un stockage (eau chaude sanitaire, masse minérale). La différence entre chacun d'entre eux est leur capacité à conserver l'énergie une fois captée, ce qui se traduit par leur rendement. Les capteurs les mieux isolés (tubes évacués, capteurs vitrés, capteurs non-vitrés, dans l'ordre décroissant) seront les plus performants et adaptés dans les climats froids.

#### Ventilation et renouvellement d'air

Comme nous l'avons déjà expliqué, il est nécessaire d'apporter régulièrement de l'air frais aux intérieurs pour ne pas voir y apparaître de concentrations excessives de divers polluants. Cette ventilation peut être assurée de diverses manières. La plus simple consiste à ne rien faire, reposant uniquement sur les infiltrations de l'enveloppe, mais il va sans dire que cette stratégie n'est pas optimale. Une autre consiste à générer par moments un courant d'air par l'ouverture de deux fenêtres par exemple, qui va traverser l'intérieur.

La ventilation mécanique n'est pas une solution bioclimatique à proprement parler, toutefois elle peut malgré tout s'avérer être une option envisageable pour assurer ce besoin. La ventilation mécanique répartie (VMR) consiste à extraire l'air des pièces humides en laissant la dépression générée infiltrer de l'air à travers l'enveloppe (joints de fenêtres notamment), ou au travers d'un système de type puits canadien. La ventilation mécanique contrôlée (VMC) permet une ventilation automatique à des moments prédéfinis dans la journée ou quand un capteur détecte une concentration élevée d'un polluant.

Les systèmes VMC actuels sont généralement à double flux, permettant de transférer une partie de la chaleur de l'air sortant à l'air frais, entrant. Les systèmes mécaniques ne sont pas parfaits pour autant. D'une part, ils peuvent générer de la condensation dans les conduites, favorable au développement de moisissures, et d'autre part, il s'agit de systèmes qui consomment de l'énergie, et qui peuvent être sujets aux pannes.

Une véritable approche bioclimatique pourra s'inspirer des vents caractéristiques du site pour concevoir une forme architecturale possédant des systèmes et principes qui ventileront passivement et efficacement le volume bâti. Ce genre de dispositifs est souvent plus commun aux architectures vernaculaires des pays chauds, qui n'ont donc pas les mêmes contraintes thermiques que sous nos latitudes. Les tours à vent typiques de l'architecture persane en sont un bon exemple. Ce dispositif fonctionne par captation des courants d'air plus frais qu'à la hauteur du sol, couplé à l'inertie thermique des matériaux le constituant, parfois utilisant l'évaporation de l'eau pour rafraîchir, et plus rarement des stocks de glace accumulés avant la fin de l'hiver. Il se sert également de l'effet de cheminée pour aspirer de l'air et générer des courants d'air lorsqu'il n'y a pas de vent.

Le puits canadien est un autre exemple de dispositif bioclimatique de ventilation. Il fonctionne en faisant circuler de l'air frais dans le sol, permettant un réchauffement de l'air avant qu'il ne pénètre dans l'enveloppe du bâtiment. Son nom rappelle fidèlement une nécessité qu'ont pu avoir les habitants de ce pays froid. Il s'agit du même dispositif que le puits provençal sauf que son objectif est le rafraîchissement préalable de l'air.

La stratégie de ventilation peut aussi profiter d'un des dispositifs de gestion des apports solaires décrits précédemment, comme la véranda, la serre, le mur Trombe, ou éventuellement la double-peau, qui permettent de réchauffer de l'air extérieur durant la journée.

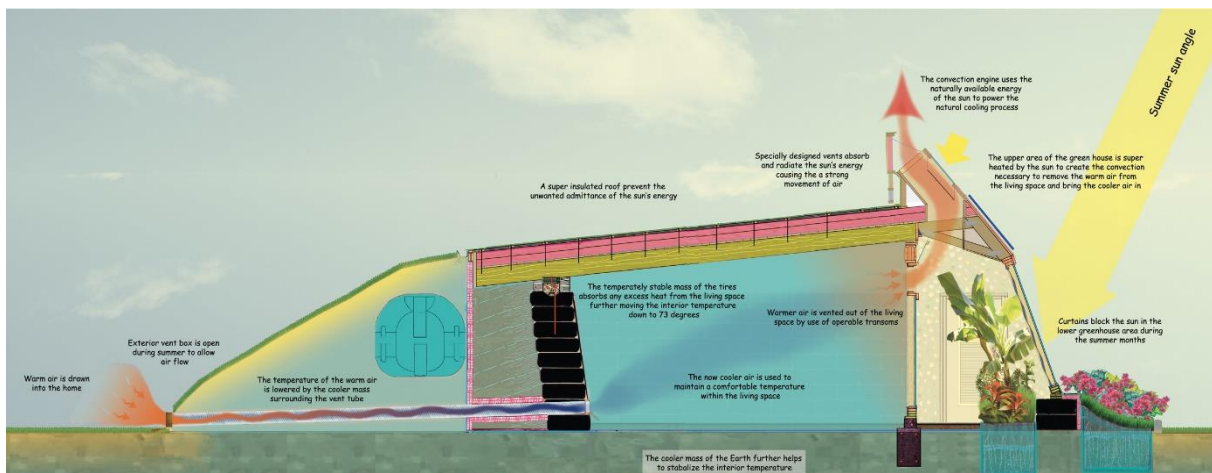
### *Exemples passés...*

Comme nous l'avons suggéré en évoquant la pensée de Victor Olgyay, l'approche bioclimatique n'a pas attendu les hippies pour exister, car l'architecture vernaculaire en était déjà une. Cependant, nous pouvons tout de même distinguer la production préindustrielle de celle issue de réflexions post-industrielles.

Aux États-Unis, c'est principalement par la constitution d'*Earthships*, marque déposée par l'architecte Michael Reynolds, que sont nées des architectures véritablement bioclimatiques, et non pas seulement solaires.

Diplômé dans la fin des années soixante, cet architecte aux fortes tendances anarchistes et hippies commença à construire des habitations alternatives, mêlant différentes approches : les principes bioclimatiques d'une part, les déchets, recyclés en tant que matériaux de construction d'autre part, et de manière plutôt cohérente visait une autonomie totale. Aussi, nous tâcherons d'en décrire les aspects spécifiquement bioclimatiques en faisant abstraction des autres principes, qui restent néanmoins intéressants d'un point de vue technique, constructif ou ornemental, à l'image de l'utilisation qu'il faisait des bouteilles de verre, ou des pneus notamment.

Tout comme *Taliesin West*, l'école et résidence d'hiver de Frank Lloyd Wright, les premières expériences architecturales de Reynolds prirent place dans des lieux reculés (à l'époque, du moins), sauvages, voire quasi désertiques, semi-arides, mais où le prix du terrain était accessible. En revanche, l'avantage de ces sites était leurs températures plutôt élevées bien que variables entre été et hiver, et un soleil abondant, rendant moins compliquée la problématique de capter et conserver la chaleur accumulée lors des journées d'hiver pour la nuit. L'aspect plus technique consistait à maintenir des températures internes acceptables durant les mois d'été.



By Amzi Smith - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17982140>

Pour ce faire, l'architecte utilise majoritairement quatre stratégies, qu'il applique dans bon nombre de ses projets. La première consiste à mettre en place des zones tampon sous forme de serres, au sud, ventilées par les excédents de chaleur internes, végétalisées (pour profiter des effets rafraîchissants de l'évapotranspiration de plantes), et protégées par des protections mobiles, de sorte à limiter les apports solaires estivaux. En hiver par contre, ces zones vont fonctionner comme des capteurs solaires. La seconde va avoir recours à la masse thermique des matériaux en enterrant partiellement ces habitations : le côté nord de l'habitat est adossé sur toute sa hauteur à une large butte de terre qui va absorber les excès en température l'été, et diffuser sa chaleur l'hiver. Troisièmement, des puits canadiens à travers cette butte permettent une ventilation naturelle, prodiguant aux espaces un air rafraîchi par la terre lors des périodes chaudes. L'aspiration de cet air frais se fait par effet de cheminée, en évacuant l'air chaud des serres côté sud. La ventilation est donc traversante. Et quatrièmement, une toiture très isolée pour résister au flux de chaleur traversant cette partie de l'enveloppe.

L'approche *low-tech* des *Earthships* est pleine de principes judicieux, fonctionnant magnifiquement bien dans ces climats, et dont certains principes seraient probablement profitables dans de nombreuses autres conditions. Toutefois, il convient de noter que ce type de



By Amzi Smith - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17930366>

grands espaces caractéristiques des États-Unis, et la culture qui en découle (la liberté de chacun de faire comme bon lui semble notamment), tolèrent une densité faible. Ces typologies seraient difficilement applicables dans des zones urbaines européennes par exemple. Sur le vieux continent, le regain d'intérêt pour des modes de vie plus simples, une consommation réduite, et pour ce type d'architecture, conduit parfois certains à construire dans des zones rurales, accentuant l'étalement urbain, et réduisant ainsi les biotopes naturels, ce qui peut constituer un problème. Aussi, cela engendre une quantité non négligeable de déplacements supplémentaires, car les possibilités de travail à distance sont encore faibles, même si elles sont supposées croître dans les années à venir. Il semble donc que cette voie ne soit pas celle à suivre.

### *...et récents*

De plus en plus de d'écoquartiers voient le jour en Europe, ce qui ne suffit pas à en faire des conceptions bioclimatiques pour autant. Un exemple ayant véritablement ce type d'approche (certes parmi d'autres considérations) est le quartier BedZED<sup>26,27</sup>, construit au Royaume-Uni au début des années 2000. Notons que le climat britannique est moins clément que celui de l'exemple précédent.



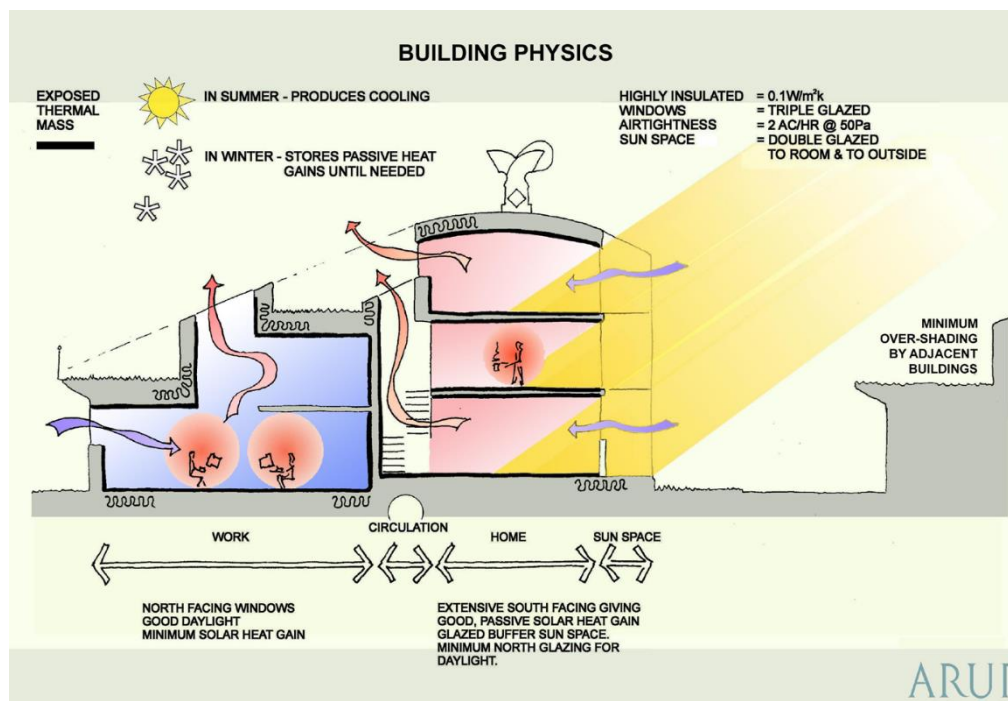
Par Tom Chance, CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=11884918>

Comme souvent dans ces conceptions, différents principes sont nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. Tout d'abord, l'implantation, l'orientation et la réflexion en coupe assurent des conditions optimales. La compacité des bâtiments est également très importante pour conserver les apports solaires au maximum.

Le concept énergétique de la partie habitation est relativement simple et efficace : le but est de profiter au maximum des apports solaires en période hivernale, ce qui est réalisé avec des vérandas qui occupent toute la façade sud. Celles-ci sont à la fois un espace tampon limitant les déperditions nocturnes et un capteur solaire. Une grande quantité de masse thermique apparente permet de stocker efficacement la chaleur accumulée la journée, et une isolation épaisse contribue à la conserver. En période estivale, les vérandas sont ventilées la journée afin d'éviter les surchauffes, et l'effet de

cheminée produit par les différences de températures dans l'espace de circulation est utilisé pour créer un courant d'air traversant tirant l'air frais nocturne à travers les vérandas et les appartements. Utilisée la nuit, cette ventilation permet à la masse thermique de déstocker la chaleur accumulée durant les journées d'été, pour lui permettre d'absorber les excédents de la journée suivante et ainsi maintenir une température intérieure agréable.

Une ventilation passive s'effectue en continu avec un système s'apparentant à une tour à vent, avec toutefois un degré de sophistication supplémentaire : les éléments caractéristiques de ces toitures s'orientent comme des girouettes pour s'axer sur le courant d'air et le capter de manière optimale. La géométrie de ces éléments force l'air frais à passer dans un échangeur double-flux, afin de rapprocher l'air extérieur d'une température convenable, puis, le diffuse aux intérieurs. Ce fonctionnement repose uniquement sur l'énergie cinétique du vent.



<https://www.bioregional.com/resources/bedzed-the-story-of-a-pioneering-eco-village>

Le projet visait aussi à offrir des places de travail sur site, de manière à réduire activement les déplacements motorisés. La stratégie thermique pour ces zones est de profiter d'une très bonne isolation et d'une grande inertie, afin de profiter au maximum des apports générés par les occupants et équipements (ordinateurs par exemple).

D'autres volontés ont contribué à sa conception, rendant ce projet pertinent à tout point de vue : citons entre-autres une gestion raisonnée de l'eau, avec la récupération de l'eau de pluie (rappelons qu'il est situé en Angleterre), et un traitement naturel des eaux-usées sur place, la récupération et le recyclage de matériaux utilisés pour sa construction, la réutilisation d'éléments de construction et le choix d'utiliser des matériaux à faible empreinte carbone, une stratégie pour la mobilité, une production d'énergie d'origine photovoltaïque sur place.

Le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire sont assurés par une chaudière à pellets, dans une volonté de ne pas dépendre pour cela des énergies fossiles.

### **Le problème de la densité**

Une problématique délicate à aborder est celle de la densité à laquelle faire face dans les villes européennes. L'habitat bioclimatique rural, ou dans des espaces profitant d'un bon dégagement, comme

le projet BedZED, peut aisément trouver des surfaces de captages (passif et actif, thermique comme photovoltaïque d'ailleurs) supplémentaires pour subvenir aux besoins de ses occupants.

Un habitat bioclimatique passif est-il donc possible en zone urbaine densément peuplée ? Dans une certaine mesure, et profitant de conditions favorables tel qu'un dégagement adéquat, certainement. Mais dans le cas contraire, l'économie d'énergie faite par l'utilisation des apports solaires nécessitera des systèmes actifs, consommant une fraction de ce qu'ils permettraient d'économiser.

Toutefois ce n'est pas toujours le cas en zone urbaine, où les bâtiments ont tendance à s'élever, augmentant la densité, et ne laissant que très peu d'apports solaires directs aux étages les plus bas, particulièrement avec un soleil rasant en hiver, nécessitant donc des systèmes actifs, donc une consommation d'énergie, pour redistribuer la chaleur captée en toiture.

Le rayonnement solaire reçu par un mètre carré de surface horizontale au sol varie au cours de l'année en raison de la course solaire, ce qui produit les écarts de température entre les saisons. La quantité d'énergie reçue par cette même surface une journée d'été est environ dix fois supérieure à celle reçue une journée d'hiver, alors que c'est bien évidemment en hiver que le besoin en apports solaires thermiques se fait ressentir. Stocker l'énergie thermique d'une saison à l'autre est délicat et coûteux, et serait une installation à mettre en place à grande échelle pour devenir rentable. Un stock de chaleur, accumulée pendant l'été est-il envisageable ?

Nous avons vu que le principe inverse (un stock de froid) pouvait être réalisé d'une manière traditionnelle en Iran, avec les *yakhtchal*, ces stocks de glace qui permettaient de rafraîchir l'air chaud estival, couplés à une tour à vent. Pour conserver la chaleur, c'est quelque part déjà ce qui est fait avec le puits canadien, mais le stock repose en grande partie sur la quantité de masse thermique disponible plutôt que sur la différence de température, rendant des applications telles que la production d'eau chaude sanitaire impossible. Elle demeure en revanche très efficace pour assurer une ventilation passive ou active à moindre coûts énergétiques pour que l'air arrive à une température acceptable.

En effet, pour la même géométrie, la surface d'enveloppe et le volume contenu ne croissent pas ensemble linéairement, ce qui implique que plus un tel dispositif serait grand, plus il serait efficace et rentable. La question de la compacité aussi, relative à l'implantation d'un projet en climat froid est la même que celle qui prévaudrait pour un tel stockage : à surface d'enveloppe égale, et donc un flux thermique égal quittant le système, une masse plus compacte contiendra un volume plus élevé et aura une capacité de stockage plus grande.

## Le BIM

### *Principes fondamentaux*

Le BIM, pour *Building Information Modelling*, est un processus générant une multitude de *workflows* possibles, permettant une meilleure gestion de l'information dans le domaine de la construction. Il s'agit d'associer de l'information à une géométrie modélisée, de fédérer la donnée, afin de retirer une efficacité accrue pour leur traitement, se traduisant par des bénéfices divers. Centraliser les données et utiliser des formats ouverts permet une interopérabilité entre divers outils numériques, qui évitent des coûts liés à leur ressaisie et aux problèmes de communication entre applicatifs.

Alors qu'autrefois on ne travaillait généralement qu'en deux dimensions – le plan qui était complété par la coupe et l'élévation – le BIM en ajoute des supplémentaires. Géométriquement d'abord, la modélisation en 3D admet une conception complète de la forme, évitant des incohérences constructives, et permettant une compréhension plus intuitive de géométries complexes parce que la représentation n'est plus uniquement un plan de coupe mais peut devenir une vue se rapprochant de celle de l'être humain. On utilise la terminologie LOG (*Level Of Geometry*) pour qualifier la granularité du modèle du point de vue géométrique.

La donnée alphanumérique ensuite, associée par le fait de créer et de renseigner des paramètres, permet d'intégrer au modèle les informations nécessaires au bon déroulement du processus défini. On parle du LOI (*Level Of Information*) pour décrire la précision de ces informations textuelles. Ce sont les données comme celles-ci qui constituent les autres *dimensions* que sont le temps (4D), le coût (5D), les informations liées aux propriétés physiques des matériaux, permettant de lancer diverses simulations (6D), les données liées à l'exploitation du bâtiment (7D), et ainsi de suite. Le nombre de *dimensions* n'est pas fixé car de nouveaux besoins pourraient nécessiter d'intégrer de nouvelles gammes de données au modèle par la création de paramètres spécifiques.

### *Mutation des processus*

Le processus établi par la norme SIA 112 a jusqu'à maintenant cadré la gestion du projet. Sa décomposition en phases était très pertinente pour une méthode traditionnelle en conception assistée par ordinateur (CAO), car elle indiquait les prestations et responsabilités selon la phase pour chaque intervenant.

Dans une méthodologie BIM, le processus dépend fortement des besoins du mandant établis en tout début de projet. Ceux-ci, qualifiés d'*Exigence d'Information du Projet* (EIP), sont la base sur laquelle on identifie les mandataires et définissent ainsi un PDB (Plan de Développement BIM).

### *Utilisation*

En déterminant l'objectif final, il devient possible d'identifier quelles informations, à quel niveau de précision (en LOI et LOG), par qui et à quel moment, doivent être intégrées au modèle, pour être rendues exploitables par l'un ou plusieurs des acteurs. Le terme LOIN<sup>28</sup> (*Level Of Information Need*) tend à s'imposer pour qualifier les besoins du mandant dans ses appels d'offres. Ces objectifs et exigences, en fonction des phases et des disciplines, permettent d'élaborer un plan d'utilisation.

### *Modélisation*

Le BIM représente surtout une meilleure gestion de l'information dans la conception et la réalisation d'un projet, c'est pourquoi il est nécessaire que des règles de modélisation sont établies.

On va y définir quels modèles seront utilisés et produits en fonction de la discipline, si un éventuel découpage du projet dans une discipline est nécessaire, la codification de nommage des fichiers, des paramètres et des attributs, et en fin de compte, tout ce qui permet d'intégrer à la maquette numérique des données qui soient correctement structurées dans, et donc aussi hors du modèle.

### *Coordination*

Tout n'est toutefois pas encore fixé puisqu'il faut d'une part identifier quels outils seront utilisés, quels formats sont supportés par ces logiciels (interopérabilité) et de quelle manière les échanges de fichiers doivent être effectués entre les différents acteurs en vue de la coordination. Ceci est défini par le plan de coordination, de même que les échéances, les contrôles de qualité des modèles, et les responsabilités concernant les corrections à apporter aux modèles.

### *Une inquiétude légitime ?*

Le BIM n'est donc qu'une méthode nouvelle de pratiquer l'architecture, en assimilant le potentiel offert par des outils numériques en perpétuelle évolution. En conséquence, le BIM génère souvent de la réticence de la part des acteurs de la construction, principalement des architectes, qui ne saisissent pas l'évolution nécessaire. Ils pressentent que leur métier pourrait leur échapper, et qu'ils ne seraient plus les acteurs centraux de l'acte de concevoir et construire. Cette menace est tout aussi réelle que l'est le besoin d'évoluer avec la transition numérique. C'est pourquoi la gestion du changement, l'accompagnement et la formation est une nécessité, pour que l'architecte de demain conserve le contrôle du projet architectural.

D'autres, par contre, voient cette transition comme une opportunité, et se positionnent en fonction pour être plus concurrentiels dans leur pratique professionnelle.

### *La place du non-standard dans la gestion du standard*

De plus en plus de fournisseurs embrassent la transition vers ces solutions logicielles et les nouveaux processus, et mettent à disposition leurs produits au travers de bibliothèques et banques d'objets. Les données relatives à ces produits standardisés sont déjà renseignées par le fabricant et facilitent ainsi la conception.

Une dynamique analogue à celle des débuts de l'époque moderne pourrait voir le jour par l'aisance de conception avec les produits d'aujourd'hui : rappelons-nous le soin qu'avaient les modernes dans leur quête d'une esthétique – à l'image des colonnes du Pavillon de l'Allemagne conçu en 1929 par Ludwig Mies van der Rohe, formées par le rivetage de différents profilés métalliques standards – et d'un langage propres aux possibilités de leur époque, la fluidité de l'espace notamment.



By Sandro Maggi architetto - Flickr: bcn 01-31, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=16798014>

Or, cette dynamique est déjà enclenchée aujourd'hui. L'erreur dans le raisonnement ci-dessus consiste à considérer le BIM comme un outil de modélisation, alors qu'il s'agit plutôt d'une méthode de gestion des informations du projet. En effet, des acteurs de la discipline ont, par l'utilisation du BIM en tant qu'outil de gestion des données, déjà fait la synthèse des moyens de production et des outils de modélisation contemporains, que nous aborderons plus loin avec l'architecture paramétrique. Le projet du Louvre Abu Dhabi de Jean Nouvel<sup>29</sup>, complété en 2017, et plus particulièrement sa coupole filtrant la lumière du puissant soleil des Émirats arabes unis, démontre très bien cette synthèse. Nous voyons donc, comme nous le prouvent des projets contemporains, que le non standard dans les formes et dimensions, mais industriel et standardisé du point de vue des propriétés des matériaux, est maîtrisé.



Par Slywire — Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68888071>

La construction d'architectures paramétriques spectaculaires traduit un progrès technique certain, et est très adaptée à un certain nombre de programmes, mais l'est-elle pour l'habitat urbain commun ? Déjà que le projet de ce type de programme se développe dans l'espace résiduel d'une liberté architecturale toujours plus contrainte par les normes, quand on ajoute à cela le besoin de rentabilité de l'investisseur, peut-on encore espérer obtenir des architectures qui ne soient pas elles-mêmes standardisées si en plus le concepteur se trouve condamné à se conformer aux standards des fabricants et des constructeurs ?

La question posée ici est véritablement celle de la place du *ni standard ni industriel*, donc des matériaux naturels, dans le BIM, conçu semble-t-il pour l'industrie. Les matériaux locaux sont généralement d'origine naturelle, et leurs propriétés ne peuvent que difficilement être certifiées, contrairement aux matériaux standardisés et normés issus de l'industrie. Leurs imperfections leur confèrent d'ailleurs certaines qualités esthétiques. L'imprévu a-t-il encore sa place dans un environnement de travail

numérique où tout semble maîtrisé ? L'aléa et l'imprécision y sont-ils encore possibles ? Les matériaux non standardisés peuvent-ils prendre une autre place que celle d'un remplissage ?

Il est bien sûr possible d'intégrer au modèle des éléments non-standardisés, dont les propriétés fluctuent quelque peu. Néanmoins, il convient de noter que ces fluctuations auront des répercussions sur la précision des résultats obtenus par l'utilisation des données. Par exemple, faire la simulation thermique d'un bâtiment dont les matériaux de construction ne sont pas normés et calibrés (tels que la terre crue, ou le pisé, dont les propriétés thermiques vont dépendre de la composition de la terre utilisée ainsi que de la mise en œuvre du matériau, dont les bonnes pratiques ont disparu au cours de l'histoire) conduira à des résultats prévisibles, mais variables.

Aussi, à l'image des facteurs de sécurité, différents selon qu'un ingénieur dimensionne une structure en bois ou en acier (car d'origine naturelle et variable ou industrielle et standardisée), un matériau aux propriétés non certifiées et donc incertaines nécessitera des facteurs de sécurité adaptés, ce qui peut éventuellement devenir problématique et bloquant si la qualité et les pratiques de mise en œuvre sont fortement variables. L'utilisation de tels matériaux n'est donc pas incompatible avec le BIM, et disons même qu'elle en est indépendante. En effet, la problématique liée à leur utilisation se situe à un tout autre niveau.

Par ailleurs, des études et essais<sup>30</sup> sur l'utilisation du BIM et la mise en place de tels processus impliquant les artisans, révèlent que les petites, voire très petites entreprises ont aussi un intérêt certain à l'adopter. Concrètement, ils disposent déjà actuellement des mêmes possibilités (smartphone, tablette, ordinateur, et connexion) au travers de leurs outils de communication de tous les jours, que n'importe qui et sont donc susceptibles de profiter d'une gestion de l'information optimisée.<sup>31</sup> Il en va même de leur survie économique car les plus grandes structures se positionnent toujours plus par rapport à ces processus optimisés, et ils pourraient ne plus être concurrentiels.

Tout comme les architectes, il est important voire essentiel qu'ils gardent le contrôle de leur pratique. De l'information ainsi que de la formation doivent donc être prodigués pour permettre à ces acteurs d'embrasser ces pratiques nouvelles, et afin qu'ils réalisent que l'adoption du BIM est aussi leur intérêt.

## Le BEM

Comme établi précédemment, le BEM est la 6<sup>ème</sup> dimension du BIM. Il traite des aspects énergétiques d'un bâtiment en fonction de son usage. Ses applications peuvent donc concerner l'aspect thermique pour dimensionner une installation de chauffage, l'autonomie en éclairage naturel, ou encore le potentiel de rendement pour une installation solaire photovoltaïque.

Afin d'effectuer ces simulations, le modèle a besoin de connaître les données climatiques du site : par exemple, identifier la température extérieure au cours de l'année pour une situation géographique donnée est essentiel pour déterminer les besoins en chauffage d'une construction, puisque le flux d'énergie calorifique par conduction est proportionnel à la différence de température entre intérieur et extérieur. Son objectif n'est pas de trouver la solution parfaite - celle-ci demeure subjective, et dépend des valeurs de chacun – mais bien de permettre au concepteur d'évaluer l'impact de ses choix sur les performances d'une construction, et ainsi prendre des décisions architecturales en ayant conscience de leur impact sur le bilan énergétique semble donc être un but plus louable.

## Processus

Dans l'idéal, l'utilisation du BEM ne devrait pas être ponctuelle, limitée à une phase de développement du projet, mais bien cyclique et itérative<sup>32</sup>. Elle permettrait ainsi, à différentes phases, de confronter le projet à un objectif qu'il convient d'avoir déterminé en amont, et d'optimiser les choix pris lors de la conception. Il est bien entendu que selon la phase, l'utilisation du BEM va différer. Aussi la précision des résultats obtenus est en corrélation directe avec le niveau de développement : lorsque ce dernier est plus faible, le logiciel doit faire plus d'approximations pour obtenir un résultat.

Les points suivants répertorient les utilisations du BEM selon la phase. Ils sont indicatifs, et se basent sur la norme SIA 102, impliquant des niveaux de développement (LOD) adéquats.

### *1\_Définition des objectifs*

Le BEM n'a pas vocation à être utilisé dans cette phase, plutôt, il s'agira de déterminer le standard énergétique visé, et les volontés du mandant.

### *2\_Études préliminaires*

Dans cette phase, le BEM peut contribuer à prendre des décisions de base, telles que le site, l'orientation, ou aider à déterminer un concept énergétique du bâtiment qui soit adapté au site.

### *3\_Étude du projet*

À ce stade de développement du projet, il est nécessaire d'établir quel sera le point de comparaison en termes de performance, qu'il s'agisse d'un bâtiment comparable ou d'un standard, d'une norme à atteindre, voire à dépasser. Ce prérequis permettra de visualiser l'impact de certains choix de conception, de placer stratégiquement les zones chauffées et non-chauffées et d'étudier des variantes. Aussi, Le BEM peut servir de base pour produire les calculs et justificatifs énergétiques nécessaires pour une demande d'autorisation de construire.

### *5\_Réalisation*

L'utilisation du BEM peut être utilisée pour la mise en service des installations techniques : l'équilibrage des systèmes hydrauliques par exemple.

### *6\_Exploitation*

Le modèle peut devenir la base d'une gestion technique de bâtiment (GTB, développée plus loin), ou d'une MCR (*Mesure, Contrôle, Régulation*) automatisés.

## **Formats ouverts**

### *Le gbXML<sup>33</sup>*

Le format gbXML a été développé à partir 1999, et est devenu en quelques années un standard d'interopérabilité. L'objectif était de réaliser un langage pour faciliter la communication entre les outils de conception et les outils d'analyse.

Le nom de ce format vient du langage XML, pour *eXtensible Markup Language*, et du préfixe gb pour *Green Building Studio*, du nom de l'entreprise ayant développé ce format dans ses premières années. Cette entreprise a été rachetée par Autodesk en 2008<sup>34</sup>, et une année plus tard, le développement du format est intégré dans une entreprise à but non lucratif nommée *Open Green Building XML Schema*.

Depuis, le développement du format profite de financements de divers acteurs, privés comme public, tels Autodesk et le *Department Of Energy* (DOE) des États-Unis.

### *Logiciels*

Nombreux sont donc les logiciels qui supportent le format gbXML, on en compte plus de 50 à l'heure actuelle, et certainement plus encore dans le futur. La liste de ces logiciels est affichée sur le site internet de l'organisation<sup>35</sup>.

### *Perspectives*

Les développements numériques que nous connaissons aujourd'hui offrent des possibilités qui ont un fort impact sur le secteur de la construction. Comme nous l'avons vu plus haut, ils révolutionnent les processus et les modes de production. Cela fait déjà plusieurs années que le secteur privé a saisi l'importance de la transition et le marché se réoriente progressivement. Ainsi, pour interagir de manière efficace avec ces acteurs privés qui, de plus en plus, optent pour les moyens technologiques en accord avec l'époque, le secteur public est amené à évoluer.

Des efforts sont faits dans le sens de la dématérialisation, voire de la numérisation des activités des autorités gestionnaires du territoire et de la construction, particulièrement dans le Canton de Genève. La nature du système politique suisse est telle, que les cantons ne se trouvent pas à un niveau d'égalité face à cette nouvelle manière de gérer de la donnée : certains sont pionniers, voire proprement visionnaires<sup>36</sup> comme en atteste la constitution du *Système d'Information du Territoire à Genève* (SITG), formidable banque de données fédérant l'information à l'échelle du canton, et d'autres, plus modestes suiveurs conscients.

Nous pouvons donc raisonnablement supposer, que d'ici quelques années, des dossiers de demande d'autorisation de construire et leur pendant énergétique pourront être déposés sous forme d'une maquette numérique BIM, accélérant les procédures et permettant une meilleure qualité de vérification des projets. C'est du moins ce que révèlent les liens entre les administrations cantonales, le milieu académique et le secteur privé.

Par ailleurs, une utilisation plus courante du BEM dans les différentes phases de la conception de projets permettra d'aller vers des concepts énergétiques des bâtiments plus pertinents, et des réalisations moins consommatrices en énergie. En effet, si le BEM est utilisé en tant qu'aide à la décision, il permettra de faire des choix plus avisés en termes d'énergie.

Il est nécessaire de rappeler que les simulations énergétiques poussées mais précises requièrent du temps de travail de calculateurs, ce qui a deux implications. Premièrement, cela nécessite d'avoir accès à du matériel offrant une puissance de calcul adéquate, ce qui a actuellement tendance à être délocalisé sur le *Cloud*, et deuxièmement, cela suppose une consommation d'énergie qui, bien que négligeable par rapport aux économies potentielles, réalisées sur la durée de vie d'un bâtiment, vont venir s'ajouter à l'énergie grise de la réalisation.

## La Gestion Technique de Bâtiment (GTB)

Même si ce travail a pour sujet le *high-tech* au service du *low-tech*, compris dans le sens où les analyses et simulations en BEM pourraient permettre la réalisation d'un objet architectural dénué de technologie numérique dans son exploitation, avec un recours minimum à des moyens techniques et dont seuls la géométrie et les matériaux produisent un environnement interne confortable, il reste nécessaire de s'arrêter un moment sur cette gestion, qui tout comme la conception d'un projet, se digitalise. Construire bioclimatique et passif n'est pas toujours une option envisageable pour produire un environnement inter confortable, c'est pourquoi des systèmes actifs sont parfois nécessaires.

En ces temps où de plus en plus d'objets sont connectés à internet<sup>8</sup>, le terme de domotique<sup>37</sup> tend à se démocratiser et à englober toutes les applications pouvant relever du gadget, comme allumer la cafetière ou faire couler un bain. C'est pourquoi il est nécessaire de la distinguer de la GTB qui est issue du secteur industriel, et qui avait pour but une réduction des coûts de gestion, de fonctionnement, et de maintenance des équipements.

La gestion technique centralisée (GTC) est le précurseur de la GTB. Elle permettait le monitoring d'un seul lot, par la collecte d'informations. La GTB regroupe la gestion de tous les lots au sein d'un seul système, permettant d'avoir une vision globale des lots, sans toutefois aller bien plus loin que la simple surveillance. Plusieurs types d'éléments sont nécessaires pour assurer cette gestion. Premièrement, il faut que des capteurs récoltent l'information. Deuxièmement, un réseau permet de la faire remonter. Troisièmement, une interface permet à un gestionnaire d'avoir accès à ces informations pour surveiller le système, voire prendre des mesures pour corriger un problème.

La MCR est l'étape suivante. L'interface et le gestionnaire sont remplacés par une unité centralisée (ou mini-ordinateur) qui va récupérer l'information, et en fonction de scénarios programmés, va

---

<sup>8</sup> *Internet of Things* : IoT

automatiquement prendre des mesures effectives. Un scénario plausible serait de « baisser les stores, si la température interne dépasse 24°C, et si on se trouve dans la période entre le 20 juin et le 22 septembre » ceci afin d'éviter les surchauffes estivales et ainsi conduire à un confort accru et des économies d'énergie.

## L'optimisation et le paramétrique

### *L'optimisation*

Inévitablement, la recherche de performance, quelle qu'elle soit, évoque l'optimisation. Nous pratiquons tous l'optimisation au quotidien au travers de chacun de nos choix, car nous sommes à la recherche de performance, qu'importe la définition de celle-ci et le but à atteindre. Elle se résume souvent au retour sur investissement, qui découle sur la loi du moindre effort développée dans le présent travail. Or, nous avons vu que celle-ci conduit parfois à des impasses, voire qu'elle y mène inévitablement sur la durée, et que la notion de performance doit par conséquent intégrer d'autres paramètres.

Il en va de même pour la performance énergétique appliquée à la conception architecturale : chercher à optimiser l'enveloppe thermique d'un bâtiment d'une surface utile donnée avec pour seules règles i) minimiser le flux de chaleur sortant, ii) les éléments ne peuvent être qu'orthogonaux, donnera systématiquement une forme s'approchant du cube<sup>38</sup> (parallélépipède possédant le rapport *volume/surface* le plus élevé, donc le plus compact) avec une enveloppe à 100% opaque, car les pertes sont plus élevées au travers des vitrages. Il va sans dire que ce type de solution se ferait au détriment de la qualité architecturale.

En tant qu'architectes, nous faisons des choix, pour que les solutions construites soient non seulement conformes à un certain système de valeurs, mais surtout pour que le résultat soit optimisé lorsqu'on le confronte aux paramètres du référentiel *système de valeurs* considéré. Traduit informatiquement, cela deviendrait extrêmement compliqué : le système de valeurs d'un individu devient un ensemble massif de règles, pondérées selon leur degré d'importance. À supposer qu'il n'existe qu'une solution optimale selon ces règles, ce qui n'est de loin pas avéré, le temps nécessaire à un ordinateur pour l'identifier parmi toutes les solutions envisageables serait prohibitif, c'est pourquoi des recherches sont faites pour réduire ce temps de calcul, notamment au moyen d'algorithmes.

### *Les algorithmes et l'intelligence artificielle*

Nous ne nous attarderons pas ici sur la complexité des algorithmes : ce domaine est extrêmement technique et requiert des compétences spécifiques. Il peut néanmoins être utile de vulgariser leur fonctionnement, lorsqu'ils sont appliqués à un problème d'optimisation complexe, toutefois moins que celui évoqué ci-dessus.

Le but d'une partie d'entre eux est d'orienter les recherches en direction de solutions optimisées, par un processus itératif analogue au processus de l'évolution de Darwin : par la sélection naturelle, et de génération en génération.

Pour cela, il va donc générer différents ensembles de solutions, confronter individuellement les solutions de chaque ensemble à l'ensemble de règles définies que l'on appellera l'environnement, afin de mesurer leur aptitude à la survie, pour finalement ne retenir par la sélection qu'un nombre restreint des solutions, celles qui tendent le plus vers l'optimal. Ce sont elles qui deviendront les parents de la génération suivante. Une nouvelle génération produira des solutions ressemblant à leurs solutions parentes, mais différant selon des principes à nouveau analogues à la génétique : par croisements entre deux solutions ou par mutations spontanées. Le même procédé peut continuer indéfiniment, se rapprochant de plus en plus de la solution optimale, toutefois sans garantie de l'atteindre.<sup>39</sup>

Appliqué à l'énergie du bâtiment, ce processus d'optimisation ne peut que difficilement permettre de déterminer une solution construite optimisée, car celles-ci sont évaluées selon différents critères

et une optimisation isolée de l'un d'entre eux se fait obligatoirement au détriment des autres. Le véritable problème ici est le nombre de critères, ainsi que la puissance de calcul que nécessiterait la réalisation des simulations thermiques pour chaque solution. Une optimisation en plusieurs étapes est envisageable, mais garantirait à coup sûr d'aboutir à une solution qui n'est pas optimale, puisque les solutions trouvées dans l'environnement A, donc selon les critères A, combinées aux solutions B trouvées à partir des solutions trouvée en A, ne permettront plus prendre en compte les potentielles solutions meilleures de l'environnement A et B.

### *Le paramétrique*

Avec l'essor du numérique est apparu un nouveau type de conception – paramétrique – aux formes à proprement parler organiques, qui se distinguent des architectures plus conventionnelles par leur aspect souvent spectaculaire qui reflète une haute maîtrise technique.

Plutôt que d'effectuer une série d'opérations ponctuelles et définitives sur un modèle par conséquent figé, comme on le ferait en conception traditionnelle, il s'agira de caractériser le projet en se servant de paramètres numériques (dimensions, nombre, données) et de règles ou contraintes définissant spécifiquement la géométrie. Cette manière de faire permet de conserver l'historique des opérations ayant généré toute une famille de formes potentiellement définitives du projet, de sorte à pouvoir faire varier la forme que prendra le projet au final, en intervenant rétrospectivement sur les paramètres.

Une réalisation par ce processus suppose aussi que la production des éléments de construction supporte la complexité inhérente de ceux-ci, ce qui implique souvent qu'elle soit aussi, au moins en partie, digitalisée. Ainsi, avec d'une part une gestion optimisée (BIM) des informations liées à un projet, et d'autre part les progrès faits en matière d'automatisation, éventuellement couplée au développement de l'impression tridimensionnelle par exemple, on peut prévoir dans un futur pas si lointain, une digitalisation quasi complète du processus (de la conception à la construction) menant à la concrétisation de certains projets, où, à la pression d'une touche, l'architecte ou le planificateur lancera la préfabrication, selon la séquence de montage définie et dans des usines hautement technologiques, des éléments de construction. Les conséquences de cette révolution industrielle numérique sur la société seront certainement loin d'être anodines, à l'image des bouleversements que la mécanisation et la vapeur conjoints ont eu sur les sociétés préindustrielles.

Les implications esthétiques de ce type de conception ne sont pas à négliger. Comme l'explique Antoine Picon<sup>40</sup>, le langage architectural s'en trouve aussi bouleversé : le langage des éléments tectoniques cède sa place à celui de la surface où la géométrie et la matérialité seules doivent évoquer les conditions qui les ont vu naître, à savoir la complexité des réseaux et des flux d'informations. Devant l'infinité théorique de formes potentielles, la concrétisation d'une forme du projet parmi les autres devient un « arrêt sur image », matérialisant par une unique occurrence un flux géométrique en constant mouvement issu des influences souvent invisibles, car virtuelles et numériques, des données. Définir quoi réaliser, parmi toutes les possibilités à notre portée aujourd'hui, revêt une dimension hautement politique.

## Conclusion

Nous avons vu au travers de cette étude, que l'état environnemental actuel de notre terre était à mettre en lien avec le besoin propre à l'humain de contrôler les conditions qui l'entourent, avec le modèle socio-économique dominant, ainsi qu'avec le rapport que nous avons aux autres. Il ne fait nul doute que ces trois principes conjugués ont conduit à une surexploitation des ressources à l'heure actuelle. Pire encore, le caractère indiscutable de nos normes de confort, associé à cet idéal vers lequel tendent beaucoup de populations en termes de mode de vie et de consommation donnent à la tendance actuelle une inertie que la conscientisation actuelle, idéaliste<sup>41</sup> et bien occidentale à défaut d'être globale, des jeunes peine à contrer, eux-mêmes étant qui plus est en proie à certaines contradictions.

Ces prises de conscience reflètent à plus d'un titre celles des années soixante qui ont vu émerger le mouvement hippie et l'architecture bioclimatique, et incitent à la redécouverte de cette architecture. La tendance à l'exode urbain pour retrouver un mode de vie plus simple et limiter sa consommation est certes intéressante, mais n'a rien de nouvelle : les alternatifs du siècle passé formaient déjà des communautés qui allaient s'installer dans des régions plus reculées. Or il est aisé de s'installer dans un lieu où la contrainte de la densité n'est pas la même qu'en milieu urbain, car on peut profiter de la surface à disposition, ce qui à son tour, contribuerait à l'étalement urbain, néfaste aux systèmes biologiques.

Maintenir une certaine densité en zone urbaine semble donc être une solution plus raisonnable considérant la problématique environnementale. Pourtant, les Hommes consommant de l'énergie, actuellement majoritairement issue de l'activité solaire passée, et dans une moindre mesure de l'activité solaire présente, malgré les efforts faits en ce sens, il peut devenir délicat d'assurer que la consommation de l'énergie solaire subvienne aux besoins de chacun, particulièrement en zone dense. Le solaire passif n'y est pas souvent une solution adaptée et requerrait des systèmes actifs, pour distribuer l'énergie captée en toiture. Les surfaces urbaines devront-elles devenir à 100% artificielles mais surtout technologiques, ne laissant que de rares parcs aménagés procurer un semblant de nature quotidienne aux urbains ? Cette voie profiterait à coup sûr des moyens numériques et de principes de type maison intelligente pour une gestion optimisée des flux d'énergie.

Nous avons par ailleurs vu dans cette étude que le BIM admettait une certaine imprécision, dans les propriétés et l'application des matériaux, toutefois, elle peut se répercuter sur les résultats que les simulations permettent de produire. Cet aspect problématique n'est néanmoins pas intrinsèque au BIM, et serait avéré qu'importe la méthode. Les simulations utilisant des données moins précises sont moins fiables, mais sans simulation, le problème ne serait pas même soulevé. Les possibilités logicielles d'aujourd'hui sont donc véritablement une aide à la décision, afin de faire des choix constructifs plus judicieux, ce qui peut contribuer à concevoir un environnement passif, au climat interne agréable et confortable tout au long de l'année.

Aussi, l'apparent paradoxe de consommer plus d'énergie lors de la conception afin d'en consommer moins sur toute la durée de vie d'un bâtiment n'en est pas véritablement un, considérant la consommation effective des simulations, et ce que coûte énergétiquement le maintien des conditions internes d'un bâtiment.

Le *low-tech* peut ainsi profiter du *high-tech*.

## L'architecte 2.0 ?

### *Son rôle*

L'architecte, est historiquement le porteur de l'acte de concevoir, planifier, et bâtir. Il voit aujourd'hui sa discipline bousculée par des impératifs environnementaux plus ou moins externes à celle-ci. Ils sont venus contraindre sa conception, et parallèlement, les outils à sa disposition se sont développés, lui offrant des possibilités pour effectuer ses tâches. De nouvelles méthodes de conception ont vu le jour, la planification est altérée par des méthodes nouvelles, et la construction sur site comme la préfabrication en usine, vont également subir les bouleversements de nouvelles techniques issues du numérique. Mais en dehors de ces évolutions, son travail reste le même.

### *Ses responsabilités*

L'architecture demeurant une discipline artistique, et l'a été durant toute l'histoire occidentale, il convient que l'architecte conserve une sensibilité lors de la conception, développant un langage architectural comportant des notions esthétiques. Il est nécessaire que ce soit le cas, sans quoi on pourrait se passer de lui, par des approches uniquement fonctionnelles et techniques, dépossédées de toute forme de poétique. Les questions esthétiques sont évidemment toujours en relation avec le contexte artistico-culturel ambiant. À chaque époque, sa mode, d'ailleurs souvent issue de fascinations pour l'état des connaissances scientifiques et des progrès technologiques.

Ainsi, il est de son devoir d'évoluer constamment avec son époque. Cela peut être résumé par le fait d'approprier les nouveaux outils et processus de conception, de concevoir en réaction aux contraintes actuelles, et de conserver une lecture critique de la facette artistique de sa discipline.

Les architectures spectaculaires que permettent ces nouvelles possibilités ont certes un grand intérêt d'un point de vue expérimental, pour constituer un langage propre à notre époque, plus que jamais par le passé, technologique. Leur but est de produire des images fortes, mémorables et sensationnelles et sont en cela caractéristiques de l'hubris de la civilisation occidentale et de son petit frère arabe, la surpassant actuellement. Il convient donc de rappeler que ce type de conceptions n'est qu'un des produits rendus possibles par les progrès de notre civilisation, ceux-là mêmes qui nous ont conduits dans cette impasse environnementale. Le remède pour un toxicomane est-il de lui fournir toujours plus de sa came, nourrissant son accoutumance par des doses toujours plus élevées ? La réponse lui est aussi insupportable que son application est douloureuse : non.

Il est donc plus que nécessaire que l'architecte garde à l'esprit l'histoire des architectures, l'évolution des théories, ainsi que les principes successifs, qui ont conduit à ce stade critique dans l'histoire de l'humanité. L'histoire est riche d'exemples qui mériteraient une attention particulière, et certainement que des réinterprétations de principes et typologies appartenant à la tradition et à l'architecture vernaculaire seraient bénéfiques aujourd'hui.

Une nouvelle manière de construire, économiquement intéressante, écologiquement responsable, technologiquement novatrice, et produisant une architecture convenable en tout point de vue pourrait-elle voir le jour, dans une sorte de fuite en avant se terminant bien ? J'en doute, du moment que les consciences restent ce qu'elles sont, et que le désir de s'élever au-dessus des autres demeure la règle. À la lecture du dernier paragraphe du *Manuel d'instruction pour le vaisseau spatial Terre*<sup>42</sup>, il semble bien que Richard Buckminster Fuller en pensait de même.

### **Construire de manière responsable**

Lors de chaque période de prise de conscience massive, des architectes ont proposé leurs solutions personnelles qui se voulaient idéales, mais qui dans la pratique ne l'ont pas forcément toujours été. Le présent travail s'est concentré sur l'une d'entre-elles, l'architecture bioclimatique, mais il aurait très bien pu approfondir les nombreuses autres propositions émises en ces temps, issues de divers courants de pensées.

L'une de ces propositions était l'arcologie, mot-valise composé d'architecture et d'écologie, de l'architecte italien Paolo Soleri. Celui-ci étudia avec Frank Lloyd Wright à Taliesin West durant quelques années, et partit expérimenter les coques en béton dans les années cinquante, à une dizaine de kilomètres de là, pour un projet nommé Cosanti, qui en quelque sorte, était une expérience alternative avant l'heure.

C'est à la suite de ces recherches qu'il développera son concept d'arcologie, dans un livre publié en 1969 : *Arcology : the City in the Image of Man*<sup>43</sup>. Un principe qu'il affectionne est la densité, qui s'oppose à l'étalement urbain typiquement américain. L'idée est d'avoir un impact minimal sur l'environnement naturel, ainsi, les arcologies qu'il dessine schématiquement sont des petites villes à la densité très élevée car la composante verticale est souvent présente.

Poursuivant dans ces idées alternatives, il lance le projet Arcosanti en 1970, à une centaine de kilomètres plus au nord, en tant que village communautaire, s'inspirant de Taliesin West, dont l'écologie est un des thèmes principaux. Le projet peinera à atteindre la masse critique à partir de laquelle la seconde phase pourrait démarrer en vue de la finalisation du projet.

Peut-être nous rapprochons nous du jour où ces utopies existeront. Mais ne sont-elles pas dans une certaine mesure, l'issue favorable de la fuite en avant technologique évoquée plus tôt ? Une chose est sûre, créer de telles structures nécessitera des outils numériques sur toute la durée de vie du projet : pour sa conception, gestion, construction, maintenance, et probablement un jour pour son démantèlement, réutilisation recyclage.

Nous découvrons le potentiel de ces outils jour après jour.

### L'énoncé théorique du projet de master

À l'issue de ce travail, il paraît cohérent que le projet de master traite du développement d'un projet d'immeuble de logement collectif en région urbaine, mettant en place des stratégies passives et bioclimatiques dans la mesure du possible, sur une parcelle qui ne profite pas de conditions optimales (orientation et dégagement).

L'objectif sera de mettre en place un processus de projet en BIM, permettant un traitement fluide des données tout au long du projet. Ceci servira également à évaluer les premières intentions sur le plan énergétique au moyen des outils appropriés (BEM), afin de les faire évoluer vers des performances accrues. Il s'agira ensuite de poursuivre la conception jusqu'en phase d'avant-projet, toujours en continuant d'utiliser le BEM pour garantir des performances optimisées.

Dans une volonté de cohérence, la conception devra faire preuve d'une certaine sensibilité s'agissant des matériaux employés et de leur empreinte environnementale.

Des schémas de concepts énergétiques, ainsi que des détails de construction significatifs devront être produits.

## Bibliographie

« Energy-Modeling-Design-Process-Guide.pdf ». Consulté le 19 décembre 2019. <http://content.aia.org/sites/default/files/2016-04/Energy-Modeling-Design-Process-Guide.pdf>.

OLIVIER/COLLEU. *12 Solutions Bioclimatiques Pour l'habitat: Construire Ou Rénover: Climat et Besoins Énergétiques*. Eyrolles Editions, 2016.

Mengoni, Jean-Claude. *La construction écologique : matériaux et techniques*. Conseils d'expert. Mens: Terre vivante, 2011.

Fanguin, Christian, et Jérôme Grivet. *Maison basse consommation : guide de conception et de mise en oeuvre : pour la construction de maisons à ossature bois*. Collection des guides techniques. Paris: CNDB, 2009.

Pierre, Institut Supérieur de Recherche et de Formation aux Métiers de la. *Manuel de l'éco-construction*. Paris: EDIPA, Éditions Parisiennes, 2011.

Minguet, Josep María. *The New Ecological Home : Materials for Bioclimatic Design*. Sant Adrià de Besòs: Instituto Monsa De Ediciones, 2016.

Dobbelsteen, Andy van den, Machiel van Dorst, et Arjan van Timmeren. *Smart Building in a Changing Climate*. Techne Press, 2009.

Liébard, Alain, et André De Herde. *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris: Observ'ER, 2005.

---

<sup>1</sup> Prestre, Philippe Le. *La tragédie des communaux*. Presses de Sciences Po, 2015. <https://www.cairn.info/l-enjeu-mondial--9782724617504-page-15.htm>.

<sup>2</sup> George, Henry (1839-1897) Auteur du texte. *Progrès et pauvreté : enquête sur la cause des crises industrielles et de l'accroissement de la misère au milieu de l'accroissement de la richesse, le remède* / Henry George ; trad. de l'anglais sur l'édition de 1886, par P.-L. Le Monnier, 1887. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k62710x>.

<sup>3</sup> Orwell, George. *The Road to Wigan Pier*. Penguin Twentieth-Century Classics. Harmondsworth: Penguin Books, 1989.

<sup>4</sup> BrainyQuote. « Adlai Stevenson | Quotes ». Consulté le 13 janvier 2020. [https://www.brainyquote.com/quotes/adlai\\_stevenson\\_i\\_155713](https://www.brainyquote.com/quotes/adlai_stevenson_i_155713).

<sup>5</sup> Fuller, Richard Buckminster, et Jaime Snyder. *Operating Manual for Spaceship Earth*. New ed. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.

<sup>6</sup> Marsault, Xavier. *Écoconception générative : phase amont du projet d'architecture*. Vol. 1. Collection Systèmes d'information, web et société. Série Architecture et sciences informatiques. London: ISTE Editions Ltd, 2018.

<sup>7</sup> Kiss Alexandre Charles, Sicault Jean-Didier. La Conférence des Nations Unies sur l'environnement (Stockholm, 5/16 juin 1972). In: *Annuaire français de droit international*, volume 18, 1972. pp. 603-628.

<sup>8</sup> Graf, Franz, et Giulia Marino. *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXe siècle : connaissance et stratégies de sauvegarde : understanding issues and developing conservation strategies = Building environment and interior comfort in 20th-century architecture*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2016.

<sup>9</sup> <https://www.alvaraalto.fi/content/uploads/2017/12/EvaEylers.pdf>

<sup>10</sup> Connaissance des Énergies. « Votre corps, ce producteur d'énergie », 23 janvier 2013. <https://www.connaissancedesenergies.org/votre-corps-ce-producteur-d-energie-130124>.

- 
- <sup>11</sup> <http://www.marne.gouv.fr/content/download/22101/142885/file/ACTES%20du%20Colloque%20Sant%C3%A9%20infrasons%20C3%A9oliens%20de%20nov.%202018.pdf>
- <sup>12</sup> radiofréquences, Portail interministériel d'information sur les. « Que sont les ondes radiofréquences? », 28 octobre 2016. <http://www.radiofréquences.gouv.fr/que-sont-les-ondes-radiofréquences-a1.html>.
- <sup>13</sup> Rudofsky, Bernard. *Architecture without architects : a short introduction to non-pedigreed architecture*, 1964.
- <sup>14</sup> Banham, Reyner. *The Architecture of the Well-Tempered Environment*. 2nd impr. London: Architectural Press, 1973.
- <sup>15</sup> Graf, Franz, et Giulia Marino. *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXe siècle : connaissance et stratégies de sauvegarde : understanding issues and developing conservation strategies = Building environment and interior comfort in 20th-century architecture*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2016.
- <sup>16</sup> Perlès, Catherine. *Préhistoire du feu*. Paris e.a: Masson, 1977.
- <sup>17</sup> Rudofsky, Bernard. *Architecture without architects : a short introduction to non-pedigreed architecture*, 1964.
- <sup>18</sup> « Energy density - Energy Education ». Consulté le 13 janvier 2020. [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy\\_density](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Energy_density).
- <sup>19</sup> Lawrence, Roderick J. « Habiitat ouvrier et rbformes sanitaires en Angleterre », s. d., 16.
- <sup>20</sup> Catsaros, Christophe. « Le renouveau d'un matériau Entretien avec Patrice Doat ». Espazium, 26 juin 2012. <https://www.espazium.ch/fr/actualites/le-renouveau-dun-materiau>.
- <sup>21</sup> Giedion, Sigfried. *Mechanization Takes Command : A Contribution to Anonymous History*. First University of Minnesota Press edition, 2013. New York: Oxford University Press, 2013.
- <sup>22</sup> Boyd, Robin, "The Sad End of New Brutalism," *Architectural Review*, 142, no.845 (July 1967)
- <sup>23</sup> Graf, Franz, et Giulia Marino. *Les dispositifs du confort dans l'architecture du XXe siècle : connaissance et stratégies de sauvegarde : understanding issues and developing conservation strategies = Building environment and interior comfort in 20th-century architecture*. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2016.
- <sup>24</sup> Olgyay, Victor, et Aladar Olgyay. *Design with Climate : Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. [4th print.]. Princeton, N.J: Princeton University Press, 1973.
- <sup>25</sup> Hegger, Manfred. *Construction et énergie : architecture et développement durable*. Ed. française. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2011.
- <sup>26</sup> « BedZED-PresentationDetaillée-1.pdf ». Consulté le 12 janvier 2020. <https://ecoquartier.ch/wp-content/uploads/2016/05/BedZED-PresentationDetaillée-1.pdf>.
- <sup>27</sup> « The-BedZED-Story\_Bioregional\_2017.pdf ». Consulté le 11 janvier 2020. [https://storage.googleapis.com/www.bioregional.com/downloads/The-BedZED-Story\\_Bioregional\\_2017.pdf](https://storage.googleapis.com/www.bioregional.com/downloads/The-BedZED-Story_Bioregional_2017.pdf).
- <sup>28</sup> <https://bauen-digital.ch/assets/Downloads/fr/LOIN-LOD-FR-web.pdf>
- <sup>29</sup> Architecture, BIM, and Conceptual Design. « BIM et Louvre Abu Dhabi par le prisme de l'Ingénierie Buro Happold ! » Consulté le 10 janvier 2020. <https://abcdnblog.typepad.com/abcd/2016/07/bim-et-louvre-abu-dhabi-par-le-prisme-de-l-ingenierie-buro-happold.html>.
- <sup>30</sup> « Des artisans convaincus par le BIM ». Consulté le 13 janvier 2020. <https://www.lemoniteur.fr/article/des-artisans-conjuguent-le-bim-en-mode-renovation.1975934>.

---

<sup>31</sup> « Et si les artisans commençaient à s'intéresser au BIM ? » Consulté le 13 janvier 2020.  
<https://www.batirama.com/article/14198-et-si-les-artisans-commencaient-a-s-interesser-au-bim.html>.

<sup>32</sup> Hemsath, Timothy L. *Energy Modeling in Architectural Design*. New York: Routledge, 2018.

<sup>33</sup> « gbXML - An industry supported standard for storing and sharing building properties between 3D Architectural and Engineering Analysis Software ». Consulté le 13 janvier 2020.  
<https://www.gbxml.org/index.html>.

<sup>34</sup> Autodesk, Inc. « Autodesk Enhances Sustainable Design Capabilities With Acquisitions of Ecotect and Green Building Studio Analysis Tools ». Consulté le 19 décembre 2019. <https://investors.autodesk.com/news-releases/news-release-details/autodesk-enhances-sustainable-design-capabilities-acquisitions>.

<sup>35</sup> « gbXML Green Building - Supported Software ». Consulté le 13 janvier 2020.  
[https://www.gbxml.org/Software\\_Tools\\_that\\_Support\\_GreenBuildingXML\\_gbXML](https://www.gbxml.org/Software_Tools_that_Support_GreenBuildingXML_gbXML).

<sup>36</sup> « Pour une vision stratégique de la géoinformation à Genève | SITG ». Consulté le 13 janvier 2020.  
<https://ge.ch/sitg/le-sitg/vision-strategique>.

<sup>37</sup> Locqueneux, Cédric. *Le Guide de La Maison et Des Objets Connectés - Domotique, Smart Home et Maison Connectée*. Eyrolles Editions, 2016.

<sup>38</sup> Hemsath, Timothy L. *Energy Modeling in Architectural Design*. New York: Routledge, 2018.

<sup>39</sup> Marsault, Xavier. *Écoconception générative : phase amont du projet d'architecture*. Vol. 1. Collection Systèmes d'information, web et société. Série Architecture et sciences informatiques. London: ISTE Editions Ltd, 2018.

<sup>40</sup> « 20080101\_Ratti\_Nicolino\_DigitalWater\_Electa.pdf ». Consulté le 10 janvier 2020.  
[http://senseable.mit.edu/papers/pdf/20080101\\_Ratti\\_Nicolino\\_DigitalWater\\_Electa.pdf](http://senseable.mit.edu/papers/pdf/20080101_Ratti_Nicolino_DigitalWater_Electa.pdf).

<sup>41</sup> LExpansion.com. « Un documentaire explore la face cachée des énergies vertes », 26 juin 2019.  
[https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/un-documentaire-explore-la-face-cachee-des-energies-vertes\\_2086306.html](https://lexpansion.lexpress.fr/actualites/1/actualite-economique/un-documentaire-explore-la-face-cachee-des-energies-vertes_2086306.html).

<sup>42</sup> Fuller, Richard Buckminster, et Jaime Snyder. *Operating Manual for Spaceship Earth*. New ed. Baden: Lars Müller Publishers, 2008.

<sup>43</sup> Soleri, Paolo. *Arcology : The City in the Image of Man*. Cambridge, Mass: MIT Press, 1969.