



Noura Arab et François Fleury (Dir.)

# Ressources pour l'architecture écologique

Tome 2 - Climat et ambiances



Noura Arab et François Fleury (Dir.), *Ressources pour l'architecture écologique. Tome 2 – Climat et ambiances*, Paris, Presses des Mines, collection Énergie et développement durable, 2024.

© Presses des MINES - TRANSVALOR, 2024  
60, boulevard Saint-Michel - 75272 Paris Cedex 06 - France  
presses@mines-paristech.fr  
www.pressedesmines.com

ISBN : 978-2-38542-600-2  
Dépôt légal : 2024

Couverture :

|           |           |           |           |           |           |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>1a</b> | <b>1b</b> | <b>1c</b> | <b>1d</b> | <b>1e</b> | <b>1f</b> |
| <b>2a</b> | <b>2b</b> | <b>2c</b> | <b>2d</b> | <b>2e</b> | <b>2f</b> |

- 1a : <https://www.gettyimages.fr/detail/photo/dandelion-in-the-wind-image-libre-de-droits/200194596-001> ;  
auteur: Buena Vista Images
- 2a : [https://twinnustainabilityinnovation.com/?attachment\\_id=697](https://twinnustainabilityinnovation.com/?attachment_id=697)  
Description: tours à vent dans le quartier Beddington Zero Energy Development (BedZED), UK. Zedfactory Architects
- 1b : <https://mrwallpaper.com/wallpapers/walk-the-orange-lined-road-of-autumn-qk8pc39msj2i4w4v.html>.  
2b : Photographie des auteurs  
Description: mur isolé en ballots de paille
- 1c : <https://www.needpix.com/photo/1337168/>; auteur: Larisa Koshkina
- 2c : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alexander\\_Pushkin\\_Museum\\_in\\_Vilnius09.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alexander_Pushkin_Museum_in_Vilnius09.jpg); auteur: Alma Pater  
Description: le poêle hollandais en tuiles vertes dans le support d'un vase dans le salon, musée Alexandre Pouchkine à Vilnius, Lituanie
- 1d : <https://fotomelia.com/?download=paysage-desert-de-sable-coucher-de-soleil>
- 2d : <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alahambra4.jpg>; auteur: Patrick Charpiat  
Description: arcade obturée par un «moucharabieh», Alhambra de Grenade Espagne
- 1e : <https://wallpapers.com/picture/rain-pictures-jcvqg2g534ceqier.html>
- 2e : Photographie des auteurs  
Description: citerne souterraine du palais de l'Alcazar à Séville
- 1f : Photographie des auteurs  
Description: espace publique à Séville
- 2f : Photographie des auteurs  
Description: dispositifs de protection solaire en toile dans la Plaza Canónigo Torres Molina à Cordoue, près de la Mezquita (l'ancienne mosquée)

Cette publication a bénéficié du soutien de l'Institut Carnot M.I.N.E.S.  
Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et d'exécution réservés pour tous les pays.

# Ressources pour l'architecture écologique

Tome 2 – Climat et ambiances

## Collection Énergie et développement durable

Dans la même collection :

Audrey Tanguy et Marc Vautier

*Quelle place pour la low-tech  
dans un monde en transition ?*

Olivier Pialot, Béatrice Bellini  
et Guillaume Busato

*Nouvelles perspectives pour l'écoconception*

Noura Arab et François Fleury  
*Ressources pour l'architecture écologique*

Jacques Percebois  
*Les prix de l'électricité*

Association Événement OSE  
*La place du numérique dans la transition énergétique*

Mélanie Douziech  
*L'empreinte chimique*

Renaud Gicquel  
*Systèmes énergétiques, tomes 1, 2 et 3*

Association Événement OSE  
*Le rôle du Carbon Capture Utilization and Storage  
(CCUS) dans la transition énergétique*

Julien Garcia, Tatiana Reyes,  
Stéphane Le Pochat, Louis Dupuy  
et Anne-Laure Capomaccio  
*Monétarisation*

Marilyn Pradel (Dir.), Guillaume Busato,  
Stéphanie Muller,  
*Mineral resources in Life Cycle Assessment -  
EcoSD Annual Workshop 2020*

Lynda Aissani (Dir.)  
*Spatialization in LCA  
Interests, feasibility and limits of eco-design*

Isabelle Blanc  
*EcoSD Annual Workshop*

Junqua Guillaume, Brulot Sabrina  
*Écologie industrielle et territoriale*

Association Événement OSE  
*Énergie, citoyens et ville durable*

Labaronne Daniel  
*Villes portuaires au Maghreb*

Emmanuel Garbolino  
*Les bio-indicateurs du climat*

Bruno Peuportier (dir.)  
*Eco-conception des ensembles bâtis et des  
infrastructures*

Bruno Peuportier (dir.)  
*Livre blanc sur les recherches en énergétique des  
bâtiments*

Association Événement OSE  
*Smart grids et stockage*

Ouvrage coordonné par Gilles Guerassimoff  
et Nadia Maïzi  
*Smart grids. Au-delà du concept comment rendre les  
réseaux plus intelligents*

François Mirabel  
*La Déréglementation des marchés de l'électricité  
et du gaz*

Fabrice Flipo, François Deltour,  
Michelle Dobré, Marion Michot  
*Peut-on croire aux TIC vertes ?*

Benjamin Israël  
*Quel avenir pour l'industrie dans les places portuaires ?*

Association Événement OSE  
*Eau et Énergie*

Ouvrage coordonné par Bruno Duplessis  
et Charles Raux  
*Économie et développement urbain durable 2*

Ouvrage coordonné par Gilles Guerassimoff  
et Nadia Maïzi  
*Eau et Énergie : destins croisés*

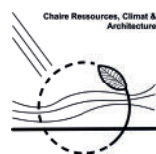
Noura Arab et François Fleury (Dir.)

# Ressources pour l'architecture écologique

Tome 2 – Climat et ambiances



Cet ouvrage est publié avec le concours du laboratoire Architecture, Territoire, Environnement (ATE, EA 7464) de l'École nationale supérieure d'architecture de Normandie et du ministère de la Culture, Direction de l'architecture et du patrimoine, Bureau de l'enseignement et de la recherche architecturale, urbaine et paysagère (BRAUP).





---

## COMITÉ SCIENTIFIQUE

---

**ARAB Noura** : docteure, maîtresse de conférences STA-CIMA, ATE, ENSA Normandie.

**BELMAAZIZ Mohamed** : docteur, professeur STA-CIMA, Project[s], ENSA Marseille.

**DUFRASNES Emmanuel** : docteur, professeur STA-CIMA, AMUP, ENSA Strasbourg.

**FERRUCCI Margherita** : docteure, FISTEC, Università Iuav di Venezia.

**FLEURY François** : HDR, professeur STA-CIMA, ATE, ENSA Normandie.

**NOUACEUR Zeineddine** : docteur, maître de conférences en géographie, UMR IDEE, Université de Rouen.

**REQUENA RUIZ Ignacio** : docteur, maître de conférences TPCAU, AAU-CRENAU, ENSA Nantes.

**SIRET Daniel** : HDR, ingénieur de recherche hors classe, AAU-CRENAU, Ministère de la culture.

---

## AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

---

Cet ouvrage rassemble les contributions écrites faisant suite au séminaire «Le climat, ressources ambiantales en architecture», qui s'est tenu à l'École nationale supérieure d'architecture de Normandie, les 23 et 24 février 2023. Il s'agissait de la deuxième rencontre d'un cycle de trois intitulé «Entre ressources et écologie, l'architecture en question – Méthodes, mises en œuvre, formes produites» et organisé par la chaire partenariale d'enseignement et de recherche «Ressources naturelles renouvelables, Climat et Architecture» labellisée par le ministère de la Culture et portée par le laboratoire «Architecture, territoire, environnement». Chacun des trois séminaires se concentre en effet sur l'un des trois piliers de la chaire: les ressources matérielles, climatiques et bâties, le but étant d'interroger l'évolution des méthodes de leur intégration en architecture vers une écologie constructive.

En tant que produit de cette chaire partenariale, la particularité de ce livre en trois tomes réside dans la variété complémentaire des propositions de différentes natures, avec des contributions scientifiques – aux théories, outils, critiques – des synthèses bibliographiques, des retours d'expérience pédagogiques. Une diversité méthodologique qui permet d'exposer toute la dynamique actuelle de la question des ressources en architecture et de s'adresser à un public varié: enseignants-chercheurs, praticiens architectes, ingénieurs ou urbanistes, jeunes chercheurs, doctorants et étudiants en architecture, en ingénierie ou en urbanisme.

Les organisateurs tiennent à remercier les membres du comité scientifique pour l'ensemble de leur travail, de la sélection des résumés à l'expertise des textes rassemblés ici. Nous tenons à remercier également les différents services de l'École nationale supérieure d'architecture de Normandie qui ont participé au bon déroulement du séminaire à l'origine de cette publication.

Toutes les contributions ont été relues et corrigées par Cécile Torquebiau, dont le professionnalisme, l'efficacité et l'écoute méritent d'être soulignés ici.



---

# TABLE DES MATIÈRES

---

|   |     |
|---|-----|
| ARCHITECTURE ET ÉCOLOGIE, LE CLIMAT COMME ALLIÉ.....                      | 13  |
| Noura ARAB et François FLEURY   |     |
| PARTIE 1 : THÉORIE .....  | 25  |
| Modélisation des ambiances pour évaluer le stress thermique.....          | 27  |
| Flavia BARONE, Mathias BOUQUEREL, Frédéric KUZNIK et Lucie MERLIER        |     |
| Relire l'histoire récente des économies d'énergie dans le bâtiment.....   | 47  |
| Antoine PERRON  |     |
| L'inertie thermique en architecture. L'exemple de la terre crue .....     | 67  |
| Clément GAILLARD  |     |
| PARTIE 2 : OUTILS.....  | 79  |
| Cartographier les ressources : le climat comme matériau du projet.....    | 81  |
| Gianluca CADONI, Chiara SILVESTRI et Christel MARCHIARO                   |     |
| Optimisation de la ressource solaire par morphologie générative.....      | 107 |
| Abdelkader BEN SACI et Laila KOUBAA TURKI                                 |     |
| Perceptions de la conception climatosensible et biodiversitaire.....      | 121 |
| Claire DOUSSARD et Muriel DELABARRE                                       |     |
| PARTIE 3 : CRITIQUES .....  | 143 |
| Concevoir/évaluer l'architecture bioclimatique, question de méthodes..... | 145 |
| Amélie FLAMAND et Rémi LAPORTE  |     |
| Le discours de la performance comme moteur d'innovation du projet ? ..... | 169 |
| Marie-Hélène GAY-CHARPIN, Caroline VARLET et Jean-Baptiste VIALE          |     |
| Rénovation énergétique : de la critique à la conception.....              | 187 |
| Martin FESSARD  |     |
| BIOGRAPHIE DES AUTEURS.....   | 211 |
| INDEX .....   | 217 |



---

# ARCHITECTURE ET ÉCOLOGIE, LE CLIMAT COMME ALLIÉ

---

NOURA ARAB ET FRANÇOIS FLEURY

L'architecture écologique n'est pas seulement une architecture qui réduit ses impacts sur l'environnement, tels qu'évalués par l'analyse de cycle de vie normalisée. La définir ainsi la placerait dans un rapport unilatéral avec son milieu qui, lui, n'aurait pas d'impact sur l'architecture, et qu'il n'est pas même utile de caractériser. En éliminant la spécificité du milieu, disparaît également de façon opportune son interaction avec l'habitant, rapport qui influe pourtant directement sur les conséquences pour l'environnement du fait de l'habiter. L'architecture écologique est nécessairement une architecture qui considère son milieu – avec ses occupants – comme une ressource.

Considérer le milieu comme la seule ressource oblige à en prendre soin. Il n'est alors plus possible de considérer ces richesses matérielles – en particulier celles qui ne sont pas renouvelables – uniquement sous l'angle de leur exploitation. Pour l'architecture écologique, la ressource est à comprendre comme une opportunité, un appui pour repenser l'architecture avant de la matérialiser.

Le premier tome, *Matériaux de construction*<sup>1</sup>, portait sur la matière avec laquelle l'architecture prend corps. Il montrait comment il est possible de s'engager dans un autre rapport aux matériaux de construction, remplaçant toutes les implications – écologiques, économiques, sociales, culturelles – de leur cycle de vie au centre de notre créativité. Les contributions présentées s'attachaient à décrire les nouveaux systèmes de potentialité associés à cette écologie des matériaux, à montrer comment cela appelle des pédagogies spécifiques et à développer des propositions pour se saisir de la variabilité de la plupart des matériaux locaux, bio- et géosourcés, ou de réemploi. Ce premier tome concluait en traquant nos certitudes et présupposés implicites, en mettant au défi notre capacité à changer profondément nos modèles, nos pratiques et nos modes de vie.

Cette injonction est au cœur de ce deuxième tome, qui s'en saisit en reconnaissant que notre manière de vivre l'architecture – qui caractérise la troisième étape de son cycle de vie, après la fabrication de ses composants et sa fabrication – est fondamentalement liée à notre relation au climat. Il s'agit d'explorer les conséquences de considérer le climat comme une ressource, et non plus seulement comme un aléa dont il faudrait d'autant plus se protéger que nous le modifions.

---

1 Arab N. et Fleury F. (Dir.), *Ressources pour l'architecture écologique. Tome 1 – Matériaux de construction*, Presses des Mines, 2023.

Dernière catégorie de ressource considérée dans cet ouvrage et objet du troisième tome, le bâti existant se voit attribuer de nouvelles valeurs, associées pour partie aux efforts, à l'énergie et aux émissions de gaz à effet de serre (GES) impliqués dans son édification. Mais ces édifices ne sont pas simplement des gisements. Il s'agit d'une ressource intelligente en quelque sorte, pour peu que l'on redécouvre les qualités spécifiques de ces architectures et leurs cohérences avec leurs contextes originels.

## DEUXIÈME TOME : CLIMAT ET AMBIANCE

Depuis que l'architecture existe, elle compose avec le climat, s'établissant là où il est propice, là où la combinaison du soleil et de la pluie a façonné un environnement généreux. Mais le climat est plus qu'une ressource pour l'architecture, il en est l'une des raisons d'être. Depuis toujours et jusqu'à peu, il en a déterminé – en partie – nombre de ses caractéristiques. En standardisant les matériaux et les modes de construction, l'industrialisation a également uniformisé les formes architecturales et le confort, sans avoir désormais à se préoccuper des spécificités climatiques régionales. En dédaignant les opportunités du climat local, l'hyperconditionnement de l'ambiance intérieure<sup>2</sup> a généré une débauche de consommation d'énergie fossile ayant largement contribué au dérèglement climatique. La plupart des habitants et des promoteurs s'adaptent aujourd'hui en installant la climatisation, qui contribue à renforcer l'îlot de chaleur urbain en rejetant les calories – devenue véritable pollution – dans l'espace public, climatisation qui consomme une énergie toujours aussi fossile, et dont la fabrication même émet son lot de gaz à effet de serre. Comment sortir de cette spirale ?

L'architecture peut contribuer à atténuer le dérèglement climatique et ses effets, tout en restaurant le lien avec l'environnement dont nous sommes orphelins, à condition de la repenser comme interface entre climat et ambiance, et de réactualiser un certain nombre de questions qui, sans être nouvelles, se posent de façon beaucoup plus insistantes depuis que les effets du changement climatique se font clairement sentir. Ces dernières étaient proposées selon les quatre axes suivants.

Le soleil, l'air et l'eau sont des éléments puissants, essentiels, qui peuvent détruire ou favoriser la vie, et vis-à-vis desquels l'architecture est médiatrice. De fait, l'une des fonctions – ou l'un des effets – de l'architecture est de filtrer le climat, de le moduler, depuis l'îlot de chaleur ou de fraîcheur urbain jusqu'à l'ambiance d'un

2 Le terme d'hyper-conditionnement est emprunté à Daniel Siret et Ignacio Requena qui ont dirigé le dossier thématique « Architectures des milieux hyper-conditionnés » des *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère* [En ligne], 6, 2019 (<http://journals.openedition.org/craup/3036>).

stade ou d'une salle de bain. S'il est admis que ce climat «intérieur» contribue subtilement à l'expression architecturale, nous n'en avons certainement pas épuisé les modes de perception, les représentations, les outils de conception, ni mesuré la contribution potentielle à la conscience environnementale. Ce fut l'un des thèmes proposés à la réflexion pour cet ouvrage.

D'un autre côté, tout comme pour les matériaux, le climat est standardisé dans des normes, ce qui autorise à ne plus en faire un véritable enjeu de conception, sa prise en compte se limitant à l'ajustement de l'épaisseur de l'isolant en fonction du lieu. La norme a d'emblée suscité la critique chez les architectes, mais serait-il temps aujourd'hui d'évaluer honnêtement les tentatives contemporaines de replacer le contexte climatique au centre de la conception, de faire le point sur le bénéfique – pour l'architecture – d'aller au-delà de la norme?

Le troisième axe de questionnement considérait les composantes du climat comme des sources d'énergie renouvelable peu émissive, peu émissives de GES. De la forêt d'éoliennes à la tour à vent, du champ de panneaux solaires à la toiture équipée, l'impact sur les écosystèmes et sur le bâti est prégnant. Ces objets peuvent-ils être pensés comme des opportunités de paysage ou d'architecture relevant d'un rapport respectueux, enthousiaste et sensuel à l'environnement?

Enfin, les effets du changement climatique se faisant sentir de façon de plus en plus évidente, cela nous oblige à nous protéger nous-mêmes en même temps que l'environnement, et ceci de manière urgente. Bien des hiérarchies de valeurs pourraient être remises en cause, ouvrant sur des doctrines nouvelles. Quels sont les nouveaux conflits? Verra-t-on se reproduire les travers des plans stratégiques de la rénovation énergétique? L'inadéquation des modèles réglementaires au confort d'été serait-elle une opportunité d'architecture?

## LES CONTRIBUTIONS

Dans une dynamique tridisciplinaire entre architecture, sciences de l'ingénieur et ingénierie du paysage et de l'urbanisme – mais ouverte à la diversité des perspectives – les chercheurs, praticiens et experts étaient invités à partager leurs analyses, méthodes et résultats de manière à susciter l'échange autour de la problématique d'intégration du climat comme ressource en architecture. Sur les 12 propositions reçues en réponse à l'appel à contribution, 11 ont été retenues pour une communication orale lors des deux jours de séminaire<sup>3</sup> et 9 textes ont

---

3 Les présentations orales sont accessibles sur le site de la chaire «Ressources naturelles renouvelables, climat et architecture» (<https://rnarchi.hypotheses.org/climats>).



finale­ment été soumis pour publication. Ils sont rassem­blés ici après leur double expertise par le comité scientifique.

Cet ensemble constitue une variété de contributions qui rend compte aussi bien de recherches fondamentales, du développement de modèles et d'outils d'aide à la conception que d'analyses de projets et d'expérimentations. Universitaires et experts de collectivités territoriales<sup>4</sup> ont partagé des travaux issus de différents domaines : l'architecture – majoritaire et représentée par les laboratoires des écoles nationales supérieures d'architecture<sup>5</sup> – l'aménagement et la géographie<sup>6</sup>, les sciences sociales<sup>7</sup>, l'ingénierie<sup>8</sup>. Bien que la recherche sur l'interaction entre climat, urbanisme et architecture doive logiquement rassembler ces différentes disciplines – voire encore au-delà – il est rare de les voir réunies autour d'un projet de recherche fédérateur et nous espérons que cet ouvrage puisse contribuer à montrer la voie.

Contrairement au premier tome, qui confrontait plusieurs situations pédagogiques impliquant des pratiques d'expérimentation<sup>9</sup>, aucune contribution ne porte ici sur l'enseignement. Sans doute faut-il y voir une tradition d'expérimentation pédagogique moins ancienne que dans le domaine de la structure et de la construction, alors que les phénomènes eux-mêmes semblent moins tangibles visuellement et matériellement. Cet aspect constitue une réelle difficulté autant pour l'architecte que pour l'enseignant, qui ne peut s'appuyer avec autant de fiabilité sur son intuition ou celle des étudiants. Par ailleurs, bien que ce deuxième tome ne comporte pas de partie spécifiquement dédiée à la controverse, les contributions présentent toutes ici un caractère scientifique marqué, qui leur confère la légitimité à nourrir la contestation de la doctrine moderne du contrôle des ambiances, ses normes et réglementations, responsables d'appauvrir

---

4 La Métropole Rouen Normandie et le Conseil d'architecture, d'urbanisme et de l'environnement 76 ont contribué uniquement à l'oral. Leur intervention est à retrouver ici : <https://rnarchi.hypotheses.org/climats>

5 L'Unité mixte de recherche (UMR) *Ressources* de l'École nationale supérieure d'architecture (ENSA) de Clermont-Ferrand; l'équipe CRESSON du laboratoire *Ambiances architecturales et urbaines* de ENSA de Grenoble; le laboratoire *Project[s]* de l'ENSA de Marseille; les équipes IPR-AUS et AHTTEP de l'UMR *Architecture Urbanisme Société: savoirs, enseignement, recherche* de l'ENSA Paris-Belleville; le laboratoire LACTH de l'École nationale supérieure d'architecture et de paysage de Lille et enfin l'École nationale d'architecture et d'urbanisme de Tunis).

6 Équipe CRIA de l'UMR *Géographie-cités* de l'Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.

7 *Pacte*, laboratoire de sciences sociales, UMR de l'Université Grenoble-Alpes et de Sciences Po Grenoble.

8 UMR CETHIL, *Centre d'énergétique et de thermique de Lyon*, de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon.

9 En effet les consignes données au comité scientifique avaient décliné les critères de qualité en quatre groupes : les contributions scientifiques, les synthèses, les controverses et les retours d'expérience pédagogique. Arab N. et Fleury F. (Dir.), *Ressources pour l'architecture écologique. Tome 1 – Matériaux de construction*, Presses des Mines, 2023, p. 18.

l'expérience sensorielle de nos lieux de vie sans réellement parvenir à réduire la facture énergétique.

Les trois parties de cet ouvrage présentent les articles selon le processus méthodologique de la production scientifique, qui commence par la formalisation de cadres théoriques fondés sur la littérature (première partie), avant de construire les outils pour nourrir la pratique à partir de ces savoirs (deuxième partie) et de terminer par l'analyse critique d'études de cas concrets pour mettre ses méthodes à l'épreuve (troisième partie). Cette organisation permet de visualiser dans l'ordre les démarches scientifiques portées par les chercheurs participants, comme une pensée continue articulant plusieurs argumentaires complémentaires tendant à démontrer le bien-fondé à considérer le climat comme une ressource pour l'architecture, à condition d'intégrer les différentes échelles – depuis celle de la ville jusqu'à celle du dispositif technique – et d'impliquer tous les acteurs.

La première partie, «Théories», rassemble les contributions qui cherchent à mieux comprendre les interactions générales existant entre le climat et l'architecture, phénomènes qui influencent le confort thermique extérieur et intérieur. Ces travaux se fondent essentiellement sur l'état de l'art ou l'analyse de corpus de textes scientifiques, réglementaires, historiques. À travers la présentation des outils de simulation numérique ou l'histoire des réglementations et des techniques, il s'agit de remettre en perspective l'activité de conception, la situer dans son environnement technique et doctrinal.

La deuxième partie, «Outils», présente une recherche moins fondamentale, visant plutôt à développer des modèles, algorithmes, méthodes, ou dispositifs d'aide à la conception. Cette partie fait la part belle aux méthodes qui permettent cette transcription opérationnelle des connaissances. Dans les trois articles, ces outils aident à situer le travail de conception dans un contexte donné, qu'il s'agisse des composantes du climat régional, de typologies morpho-constructives, de la course du soleil en un point précis ou de la culture d'une population urbaine. Des mises en œuvre concrètes montrent le potentiel de ces outils, qui sont également susceptibles de créer un savoir de portée plus générale que la situation de projet considérée.

Enfin, cherchant à évaluer les doctrines ou théories – généralement peu scientifiques – à l'œuvre dans la conception architecturale, les articles réunis dans la troisième et dernière partie, «Critique», leur confrontent la réalité d'édifices construits ou transformés. Il s'agit d'identifier les critères et modèles mobilisés lors du processus de conception et de critiquer le résultat auquel ils conduisent en mobilisant d'autres systèmes d'évaluation, scientifiques cette fois. Les méthodes sont ici variées, incluant l'analyse de discours ou de documents techniques,

l'observation socioarchitecturale d'un édifice ou encore l'instrumentation. Cette partie illustre concrètement comment la recherche peut informer le cycle de la création architecturale d'un espace culturel donné qui enchaîne critique, théorisation, conception, critique, théorisation, etc.

## PARTIE 1 : THÉORIES

Sont regroupés dans cette partie les travaux qui soulignent la nécessité de réintroduire de la complexité dans la représentation des phénomènes d'interaction entre climat et ambiance. C'est en quelque sorte une histoire des modèles – représentations mentales, métaphoriques, physico-mathématiques, réglementaires – qui éclaire la situation présente et permet d'envisager des voies de progrès. Ces travaux sont présentés ici par ordre d'échelle d'interrogation : l'espace urbain, le bâti, et pour finir, sa matérialité.

Dans le premier article, intitulé «Modélisation des ambiances pour évaluer le stress thermique», **Flavia Barone**, **Mathias Bouquerel**, **Frédéric Kuznik** et **Lucie Merlier** dressent un état de l'art des modèles numériques susceptibles de rendre compte des interactions thermoaérauliques entre l'édifice et son environnement urbain, adaptés au calcul de différents critères tels que la consommation énergétique ou les paramètres du confort. Cet inventaire donne un bon aperçu des enjeux de la modélisation et des arbitrages à faire entre le temps de saisie des données et de calcul, la complexité des modèles et la précision attendue, en fonction non seulement des objectifs recherchés mais également de la disponibilité des données. Ayant identifié les avantages et inconvénients de chaque approche, les auteurs et autrices développent une nouvelle modélisation multiéchelle permettant de mieux saisir les échanges aérauliques et radiatifs, phénomènes importants pour caractériser le stress thermique de l'habitant. L'exemple d'application présenté montre bien le potentiel de la méthode à constituer une aide à la compréhension des phénomènes et de l'influence des variables, davantage qu'à nourrir directement le processus de conception. Sans doute ce genre d'outils permettra-t-il de reformuler des réglementations ou stratégies nationales de maîtrise des consommations dans les directions souhaitées par les deux contributions suivantes.

En effet, **Antoine Perron** propose de «Relire l'histoire récente des économies d'énergie dans le bâtiment» pour montrer comment l'adoption de modèles simples – de comportement, de performance, de solutions – nécessaires aux processus industriels de massification de la rénovation conduit à appauvrir l'expression architecturale sans générer les économies d'énergie d'usage escomptées, tout en augmentant l'énergie grise consommée dans les matériaux d'isolation carbonés. La critique des solutions toutes prêtes, limitées à reprendre

l'isolation et l'étanchéité, la ventilation mécanique contrôlée et les équipements, inclut l'absence de prise en compte du confort d'été, lequel devient de plus en plus critique avec l'augmentation des fréquences et amplitudes des canicules. L'auteur oppose alors à cette éthique conséquentialiste, qui fait l'hypothèse que nous sommes capables de prévoir de façon quantitative les conséquences des interventions, une éthique déontologique fondée sur de grands principes, plus à même de bouleverser nos habitudes. L'article conclut sur l'apport que pourrait avoir l'architecte dans cette seconde voie, dans sa capacité à synthétiser la complexité dans un processus de hiérarchisation des contraintes guidée par une telle éthique déontologique.

La contribution de **Clément Gaillard**, «L'inertie thermique en architecture. L'exemple de la terre crue», termine cette partie en prolongeant la critique d'une vision simpliste, laquelle ne focalise que sur l'isolation pour contrôler des échanges thermiques eux-mêmes réduits à la conduction en régime permanent, paradigme dominant des stratégies d'économie d'énergie dans le bâtiment depuis les chocs pétroliers des années soixante-dix. La mise en perspective historique de la compréhension de l'inertie thermique montre pourtant que le phénomène est exploité depuis longtemps par les bâtisseurs et que sa modélisation physico-mathématique permet de quantifier ses effets au moins depuis le début des années soixante. L'auteur prend l'exemple de la terre crue dont on peut facilement faire varier l'épaisseur afin d'obtenir le déphasage thermique souhaité en fonction des spécificités du climat local et de l'orientation de chaque mur. Ce déphasage étant l'une des manifestations de l'inertie thermique, Clément Gaillard conclut son article en plaidant pour «une poétique du temps en architecture» à même de réconcilier notre propre perception intuitive des flux de chaleur avec une conscience renouvelée des grands rythmes fondamentaux des phénomènes climatiques.

## PARTIE 2: OUTILS

Par rapport à la partie précédente qui partage des savoirs théoriques pour mieux comprendre le contexte et les phénomènes humains et physiques de la prise en compte du climat dans la conception, les articles rassemblés dans cette deuxième partie construisent des modèles et des simulations spécifiquement pour aider la conception. Les savoirs théoriques sont ici concentrés dans des outils dessinant les contours d'un optimum possible ou construisent des simulations autorisant la perception critique de projets. Au-delà des résultats particuliers qui sont produits, les méthodes sont développées ici en détail et constituent les principaux apports de ces travaux, ouvrant sur des stratégies de conception à fort potentiel socioécologique.

Dans «Cartographier les ressources locales : le climat comme matériau du projet», **Gianluca Cadoni, Chiara Silvestri et Christel Marchiaro** prolongent le travail d'identification des ressources qu'une biorégion peut offrir à l'architecture, initié dans le premier tome<sup>10</sup>. Il s'agit ici de développer des méthodes pour cartographier cette fois les potentiels de différentes stratégies de rafraîchissement (ventilation naturelle et inertie) en fonction du climat local (vent, humidité spécifique, températures). Pour ce faire, l'équipe commence par rendre compte de ces conditions régionales par la fabrication – à partir de bases de données météorologiques géolocalisées – d'une année type concernant toutes les variables influentes, y compris celles qui ne sont pas directement présentes dans ces bases. La méthode consiste ensuite à élaborer le calcul de seuils de ces variables ou de leurs combinaisons à l'intérieur desquels les différentes stratégies de rafraîchissement pourront être efficaces. Parallèlement, des schèmes de solutions correspondant à ces stratégies sont extraits de l'inventaire régional de l'architecture rurale. Ce sont ainsi autant le potentiel des stratégies que leur faisabilité et leur adaptation aux modes constructifs et modes d'habiter locaux qui sont évalués.

Plutôt que la ventilation et l'inertie, ce sont les stratégies morphologiques de gestion des radiations solaires qui sont visées par l'algorithme développé par **Abdelkader Ben Saci et Laila Koubaa Turki** dans la contribution suivante, intitulée «Optimisation de la ressource solaire par morphologie générative». L'objectif est de fournir un outil qui permette au concepteur de définir des gabarits – ou enveloppes solaires – pour différents édifices en interaction, de sorte à optimiser l'apport solaire pour chacun en hiver. À partir de contraintes délimitant les zones autorisées de projection d'ombre pendant un intervalle de temps déterminé, l'enveloppe solaire est calculée. L'algorithme génère ainsi autant de volumes que de combinaisons de contraintes considérées, ce qui permet à l'utilisateur d'arbitrer entre maximiser la rentabilité foncière ou la durée d'ensoleillement, par exemple. Son application à un cas concret de deux édifices en interaction solaire montre à quel point une amélioration sensible de la puissance solaire par m<sup>2</sup> de plancher en hiver s'obtient au détriment de la compacité des édifices et de la densité urbaine. Comme dans le cas précédent, cet outil numérique permet de fiabiliser et d'objectiver des alternatives à la réglementation fondées sur une meilleure prise en compte du contexte local.

**Claire Doussard et Muriel Delabarre** s'intéressent de leur côté au photomontage comme aide à la conception d'aménagements destinés à limiter l'îlot de chaleur urbain tout en favorisant la biodiversité. Des images sont ainsi créées pour six projets représentatifs des diverses catégories de morphologies urbaines à potentiel identifiées pour Lausanne, dans le but de faciliter la perception du

---

10 Marchiaro C., Silvestri C. et Cadoni G., «Expérimenter la transformation des ressources constructives locales», dans *Ressources pour l'architecture écologique. Tome 1 – Matériaux de construction*, Arab N. et Fleury F. (Dir.), Presses des Mines, 2023.

contexte et de l'intention, ainsi que pour susciter l'adhésion du public à un projet faisable et efficace. Elles sont ensuite soumises aux habitants afin de recueillir leurs estimations d'efficacité en matière d'adaptation au changement climatique et de biodiversité. Il en ressort que les estimations de biodiversité et de fraîcheur urbaine sont corrélées, et que la couverture arborée est perçue comme la plus efficace des différentes stratégies mises en œuvre. Par ailleurs, l'analyse des résultats à la lumière des caractéristiques des images montre – notamment – que la lisibilité des différents éléments du projet ainsi que le sentiment d'ouverture de l'espace généré par l'image favorisent l'obtention d'un bon score. Ainsi les autrices montrent que recueillir l'avis des habitants à partir de photomontages réalistes et bien conçus permet aussi bien d'orienter la conception que de susciter l'adhésion par une meilleure compréhension du projet par l'image.

### PARTIE 3 : CRITIQUES

Les outils d'aide à la conception présentés dans la partie précédente ont vocation à s'appliquer de manière générale pour saisir certaines composantes de la qualité architecturale influencées par un petit nombre de caractéristiques spécifiques du lieu. Dans cette dernière partie, d'autres modèles sont examinés pour évaluer la pertinence de propositions architecturales de manière plus globale, aussi bien en phase de conception qu'en retour d'expérience d'édifices réalisés et habités. En effet, la complexité des phénomènes en jeu associée à l'importance croissante accordée à la maîtrise énergétique fait émerger le besoin de tels outils d'évaluation. Ils sont de fait omniprésents – de façon plus ou moins explicite – dans cette dernière partie qui confronte les idées, concepts et modèles à la réalité de projets singuliers. Cette confrontation fait ressortir les difficultés encore à surmonter pour aligner les intentions climatiques des concepteurs et le vécu de l'architecture qui en résulte.

**Amélie Flamand** et **Rémi Laporte** étudient justement la manière dont certains modes d'évaluation sont mobilisés pour la conception d'un édifice de logement particulier dont le grand atrium porte les objectifs bioclimatiques. À partir d'entretiens, de documents graphiques issus de publications, de certaines pièces du dossier de l'agence et de relevés originaux, différents modes d'évaluation sont identifiés qui ont pu accompagner le processus de conception, qu'il s'agisse de la guider ou de la justifier. Les auteurs notent en particulier l'absence de véritable évaluation assistée (par échange avec les usagers) et d'évaluation comparative qui auraient permis respectivement de mieux anticiper les enjeux d'usage et d'entretien de l'atrium et de ses équipements. En effet, les évaluations de performances, de confort et de qualité de vie de l'immeuble en fonctionnement qui sont ensuite menées en combinant les approches analytiques, comparatives et par entretiens

avec les usagers, montrent les limites du dispositif bioclimatique que constitue le grand atrium – y compris dans son impact sur le confort des logements – et par là celles des modèles mobilisés en conception. Il semble bien finalement que ce soit la complexité des phénomènes physiques et sociaux à l'œuvre dans un dispositif climatique qui défie les modes d'évaluation courants, en conception comme en retour d'expérience.

La situation étudiée par **Marie-Hélène Gay-Charpin, Caroline Varlet et Jean-Baptiste Viale** est celle de la conception d'un lycée dont les acteurs revendiquent le caractère innovant du point de vue écologique. L'analyse des techniques mises en œuvre et des discours tenus – lors de communications publiques ou d'entretiens – montre que l'innovation réelle se situe davantage dans la dynamique d'acteurs que génèrent les contextes politique, économique et contractuel que dans la forme architecturale, les outils ou les techniques mis en œuvre. Ces acteurs, collectivités territoriales, maître d'ouvrage, architecte, entreprise générale et bureaux d'étude, doivent s'accorder sur les objectifs – concrets et symboliques – qui formeront le système d'évaluation, lequel intègre ici la production de figures d'innovation partagées, telles que le dépassement des normes, l'intégration de la base INIES<sup>11</sup> dans le modèle BIM, le recours à des matériaux locaux bas carbone (bois) et peu usités (paille et lave volcanique). Le climat intervient ici dans le système d'évaluation sous différentes formes : implicitement dans l'objectif de réduction des émissions de GES destinée à limiter son dérèglement, de façon plus lisible en valorisant la maîtrise de l'ambiance intérieure par divers dispositifs (inertie thermique, ventilation naturelle, espaces tampons).

Le cadre théorique dont découlent les thématiques d'évaluation est davantage explicité par **Martin Fessard** dans son article intitulé «Rénovation énergétique : de la critique à la conception». C'est bien le système d'évaluation – ensemble de critères et modèles – de la rénovation énergétique lourde qui est critiqué, en ce que cette dernière ne vise que la performance énergétique du contrôle du confort, pauvrement défini par la température d'air et le débit de son renouvellement ; ceci en ne considérant que le phénomène de conduction. L'auteur propose sur cette base de nouveaux objectifs pour l'intervention sur l'existant – réduction de la consommation et des émissions de GES, rapidité d'intervention, régulation de l'humidité relative, implication de l'habitant, confort d'été, esthétique – mais aussi de nouveaux schèmes de solutions tels que l'inertie, le confort thermique par rayonnement, la régulation hydrique par les matériaux biosourcés, l'implication de l'habitant, la variété spatio-temporelle des ambiances. Une première forme d'évaluation de ces idées est ensuite donnée par leur concrétisation dans un projet d'intervention crédible sur les maisons d'une cité minière du Pas-de-Calais. Ce projet est destiné à être réalisé et observé à travers une instrumentation, des

---

11 INIES : base de données des fiches de déclaration environnementales et sanitaires quantifiant l'impact sur l'environnement du cycle de vie d'un produit pour la construction.

relevés climatiques habités, ainsi que l'analyse architecturale a posteriori du processus de conception.

Nous pouvons extraire de l'ensemble de ces neuf contributions un certain nombre de directions communes pour progresser dans l'écologie de l'architecture en considérant le climat comme une ressource. En premier lieu, l'ensemble des auteurs et autrices s'accordent sur le fait qu'une telle démarche sert la qualité architecturale dans son ensemble, la relation au climat participant d'un nouvel hédonisme de l'habiter. Mais il ressort également de ces travaux que pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de remettre en question le paradigme du volume isolé étanche, de réduire notre intuition et de réintroduire de la complexité dans nos représentations, modèles et systèmes d'évaluation. La complexité provient de couplages de phénomènes variés qui se produisent à des échelles différentes, portés ou étudiés par des entités ou acteurs hétérogènes. Il serait nécessaire de connaître aussi bien la répartition des vitesses d'air dans un logement traversant aux fenêtres entrouvertes balayé par le vent que la manière dont un habitant peut s'approprier un radiateur rayonnant mobile; d'être capable aussi bien de proposer des variétés d'ambiances modulables que de quantifier l'effet d'une canopée sur la température ressentie. Cette complexité représente un véritable défi déjà pour concevoir un édifice neuf, mais elle s'accroît encore quand il s'agit d'intervenir sur un bâtiment existant dont il faut reconnaître le potentiel et les raideurs. Ce sera l'objet du Tome 3 que d'explorer l'hypothèse selon laquelle l'architecture écologique de demain ne sera que transformation.