



Conformément aux prescriptions légales, l'éditeur s'est efforcé de régler les droits de reproduction visuels et littéraires. Les détenteur-trices de droits qu'il n'aurait pu retrouver malgré ses recherches sont prié-es de se faire connaître afin de satisfaire au plus tôt à la législation en la matière.

© Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI)
Louvain research institute for Landscape, Architecture, Built environment (LAB)
Université catholique de Louvain (UCLouvain)
Place du Levant, 1 – 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Comité éditorial :

Damien Claey's, Gauthier Coton, Brigitte de Terwangne, Corentin Haubruge, Nicolas Lorent, Catherine Massart, Giulia Scialpi, Dorothée Stiernon

Vous souhaitez continuer à recevoir la revue papier, réagir à un article ou proposer un article ? Écrivez-nous à lieuxdits@uclouvain.be

Retrouvez ce numéro de *lieuxdits* et les précédents sur :
<https://ojs.uclouvain.be/index.php/Lieuxdits/>

Des leviers

Se définissant depuis son origine comme revue facultaire, *lieuxdits*, parallèlement à la création récente du Louvain research institute for Landscape, Architecture, Built environment (LAB), déploie ses ailes et se définit désormais comme la revue de valorisation scientifique et pédagogique de LOCI+LAB. Ce positionnement se trouve confirmé, au sein de ce numéro, par différents articles.

À commencer par une thèse en art de bâtir et urbanisme, défendue en février dernier par Barbara Le Fort. Son sujet ? La richesse des tissus urbains hétérogènes bruxellois, qui combinent une variété de types de bâti, de types de parcelles et de types d'espaces publics, et son rôle de ressource pour l'adaptabilité urbaine.

S'ensuit une visite du pavillon allemand de Mies van der Rohe à Barcelone, guidée par le professeur Wittevrongel. Il nous invite à questionner le "masque", entendez ici l'habillage en architecture, notamment la nature de celui-ci, pour mieux approcher les idées de Gottfried Semper, par exemple.

Dans son article, Martin Outers s'appuie sur les projets de l'architecte Philippe Rahm – auteur de la conférence inaugurale de LOCI+LAB en novembre 2021 – pour montrer en quoi le concept d'architecture météorologique intègre et dépasse les préceptes véhiculés par le standard passif.

André Stephan saisit la perche tendue par *lieuxdits* avec, dans ce numéro, la version accessible à tou-ttes d'un article qu'il a publié, en avril dernier, dans le *Journal of industrial Ecology*. Son article, en anglais, discute des requis des modèles informatiques qui visent à quantifier à la fois la performance environnementale sur l'ensemble du cycle de vie et les flux de matière des stocks bâtis urbains.

Côté enseignement, Caroline Bolle et Corentin Haubruge nous plongent dans leur projet pédagogique et culturel, mené avec les étudiant-es de LOCI-Tournai, dans le cadre du double anniversaire de la cathédrale de Tournai. L'article est illustré de magnifiques propositions d'étudiant-es visant la mise en valeur et la restauration/réaffectation de son chœur gothique.

Les cinq articles décrits *supra* sont un échantillon des leviers que vous offre la revue *lieuxdits* :

- augmenter la diffusion de votre recherche (éventuellement doctorale), l'expliquer, la valoriser ;
- donner à apprécier, à affiner sa perception, à étendre sa culture générale ;
- faire connaître une démarche de conception résolument originale ;
- offrir une caisse de résonance supplémentaire à l'un de vos articles, paru dans une revue scientifique internationale avec *peer-review* ;
- partager un retour critique sur votre projet pédagogique.

À nos auteur-es, nous garantissons une diffusion affinée, l'*open access* et le référencement de leur article via les moteurs de recherche, une relecture de qualité et un accompagnement éditorial professionnel.

Les pages de *lieuxdits* vous sont ouvertes.

Brigitte de Terwangne

Tissus urbains hétérogènes

Une ressource pour l'adaptabilité urbaine : le cas de Bruxelles

Auteure

Barbara Le Fort

Architecte, urbaniste et docteure
en art de bâtir et urbanisme

Chargée de cours au master de
spécialisation en urbanisme,
chargée de recherche et
formatrice

CREAT, LOCI+LAB,

UCLouvain

© 0000-0001-6997-1911

Résumé. *L'étude des tissus urbains hétérogènes à Bruxelles répond à différents enjeux et urgences. Premièrement, l'actualisation de la théorie de la morphologie urbaine, en abordant un objet trop peu étudié, celui de l'hétérogénéité urbaine. Ensuite, la construction d'une connaissance morphologique fine de cette hétérogénéité pour le cas de Bruxelles. L'angle d'approche particulier, associant les domaines théoriques de la morphologie urbaine et de la résilience et mettant ces derniers à l'épreuve du terrain, a permis de porter un regard nouveau sur les processus morphologiques des tissus urbains et d'ouvrir la réflexion sur leurs potentielles adaptations futures.*

Mots-clés. *hétérogénéité urbaine · tissus urbains · morphologie · adaptabilité · Bruxelles*

Abstract. *The study of heterogeneous urban fabrics in Brussels engages with various challenges and needs. It updates the theory of urban morphology by tackling an under-studied object, that of urban heterogeneity, and constructs detailed morphological knowledge of this heterogeneity for the case of Brussels. An unusual approach associating the theoretical fields of urban morphology and resilience, by putting the latter to the test in the field, has made possible new perspectives on the urban fabrics' morphological processes and broadening our understanding of their potential future adaptations.*

Mots-clés. *urban heterogeneity · urban fabrics · morphology · adaptability · Brussels*

La thèse résumée dans cet article est le fruit de plus de huit ans de travail encadré par les professeurs Yves Hanin et Jean-Philippe De Visscher et accompagné par les professeurs Priscilla Ananian (UQAM, Canada) et Pierre Vanderstraeten. Cette thèse a pris sa source en 2013 à partir d'une recherche visant à proposer un cadre pour une densification qualitative des tissus urbanisés wallons. Cette première étape m'a servi de socle théorique et méthodologique lorsque j'ai intégré en 2016 l'équipe du Metrolab Brussels pour développer une recherche intitulée *Le bâti existant comme ressource de fabrication de la métropole*. L'énoncé de l'appel à candidature est le point de départ et le cadre général de cette recherche. Le cas d'étude imposé – la Zone du canal de Bruxelles et ses micro-opérations de transformation urbaine – a initié les premières hypothèses de recherche. Une collecte d'indices de transformation du bâti a ouvert le questionnement sur l'adaptabilité urbaine. Le caractère hétérogène et instable de la Zone du canal est apparu comme le corpus de recherche à définir en premier lieu. En tant qu'architecte-urbaniste, j'ai considéré ce caractère hétérogène sous l'angle de la forme urbaine (fig. 1). Ensuite, le lien entre ce caractère hétérogène et instable d'une zone urbaine et sa qualité à présenter

un haut potentiel de mutation est apparu comme une hypothèse fondamentale à clarifier et à vérifier.

Cette recherche a visé avant tout la constitution d'un socle de connaissance en morphologie urbaine, sur un objet particulier : les tissus urbains hétérogènes. Elle était nécessaire aujourd'hui pour trois raisons.

Premièrement, elle répond à une actualité. Celle du processus de reconstruction de la ville sur la ville qui est particulièrement intense dans la Zone du canal à Bruxelles. Des modifications importantes des tissus urbains peuvent y être observées. Ces modifications se traduisent par l'invention de restructurations morphologiques, de nouvelles typologies architecturales et de nouveaux espaces publics insérés dans le tissu. Or il n'existe pas à ce jour de connaissance fine de ce tissu, cette matière première, cette ressource. Et donc pas de recul pour en évaluer la consommation ou le gaspillage ni, potentiellement, la perte d'une qualité typo-morphologique héritée.

Deuxièmement, ce constat à Bruxelles fait écho à un manque général de connaissance sur l'hétérogénéité urbaine dans le champ de la morphologie urbaine, champ théorique développé



dans les années 1960 et 1980 en réaction au modernisme. Ce n'est que très récemment que des recherches s'intéressent à des configurations non homogènes notamment celles des *high streets* londoniennes. Cette recherche doctorale complète ces travaux en amenant un objet d'étude nouveau, non linéaire et ordinaire.

Enfin, en guise de posture, j'ai considéré l'étude morphologique comme un outil au service de la fabrique de la ville et de ses transformations et donc au service de la planification urbaine. Face à un monde urbanisé de plus en plus complexe, incertain et ambigu, il est aujourd'hui nécessaire de repenser le rôle de la forme urbaine pour concevoir la ville adaptable. Cette posture personnelle s'adosse au champ théorique de la résilience urbaine et s'inscrit dans la lignée de travaux récents croisant analyse morphologique et résilience.

L'hypothèse sous-jacente à la constitution de ce socle de connaissance est que les tissus urbains hétérogènes observés à Bruxelles présentent une qualité, une richesse dans leur configuration propice à leur adaptabilité.

Cadre théorique et méthodologique

Cette hypothèse a été développée à partir d'un cadre d'analyse réinterprétant les classiques de la morphologie au regard du cas d'étude bruxellois et de la théorie de la résilience urbaine. Cette réinterprétation des classiques de la morphologie m'a amenée à développer une approche exploratoire – à partir du cas d'étude bruxellois –, plurielle – en combinant plusieurs outils de la morphologie urbaine –, et multiscalaire puisqu'elle traverse les différentes échelles urbaines. En découle les trois grands chapitres de la thèse : l'identification et la cartographie des tissus hétérogènes, l'étude

de leur cycles adaptatifs, et l'étude de la robustesse et de l'adaptabilité des tissus hétérogènes lors de leurs phases de déclin et de réorganisation.

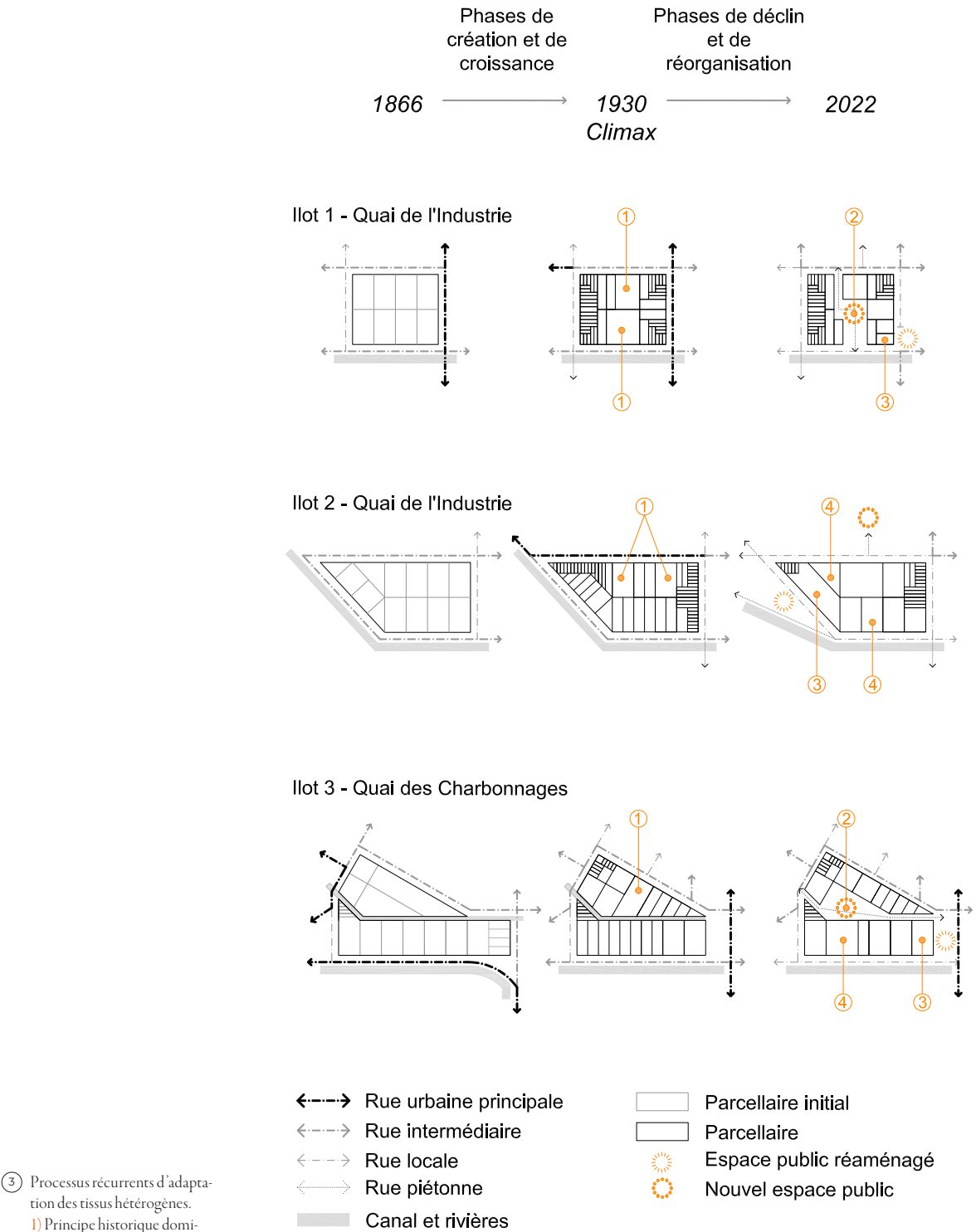
Résultats

L'identification et la cartographie des tissus hétérogènes (fig. 2) ont révélé des modes d'assemblage récurrents des fronts de rue qui rencontrent pleinement les attributs de diversité, de redondance, d'efficacité et de connectivité. Sur base

- ① L'hétérogénéité urbaine se définit par une variété de types de bâti, de parcelles et d'espaces publics. Le quartier Heyvaert présente une hétérogénéité historique à première vue complexe qui est cependant organisée. On observe clairement un espace rue défini par une couronne d'ilot faite de maisons et d'immeubles mitoyens et un intérieur d'ilot occupé par de l'activité. © 2020 Google Images ; © 2020 Aerodata International Surveys Maxar Technologies, Données cartographiques

- ② Carte de la diversité typomorphologique de la Zone du canal de Bruxelles, détail du quartier Heyvaert.
Source : BRUGIS 2015.
Traitement : Barbara Le Fort.
- typologie productive
 - typologie mixte maison-atelier
 - typologie mixte maison-boutique
 - typologie résidentielle
 - équipements et bureaux





de cette nouvelle définition inédite de l'hétérogénéité urbaine, j'ai pu réaliser la carte des fronts de rue hétérogènes à Bruxelles qui nous montre une répartition des tissus hétérogènes bien au-delà de la Zone du canal et s'organisant suivant des logiques linéaires, en *cluster* ou encore en quartiers hétérogènes.

Les modes d'implantation particuliers observés sur cette carte (fig. 2) sont le résultat des phases de création et de croissance des tissus hétérogènes analysées à partir d'une morphogenèse de la macroforme bruxelloise et d'une étude approfondie des phases de déclin et de réorganisation de trois quartiers : les quartiers Nord, Léopold et Heyvaert. Trois éléments ressortent de ces analyses. Premièrement, un gabarit trop imposant du bâti et du parcellaire pose la question de son adaptation future. Ensuite l'échelle des espaces publics et leur aménagement influencent et diminuent le rôle des interfaces. Enfin, les rôles du cycle économique créant de la pression foncière, de la régulation et de la planification conditionnent la transformation du tissu. Le maintien des attributs de robustesse et d'adaptabilité dépend donc d'une certaine vision planificatrice.

Cette vision planificatrice doit cependant s'appuyer sur une connaissance fine de la robustesse et de l'adaptabilité des tissus urbains, comme l'a visé le troisième grand chapitre de la thèse. L'étude approfondie des phases de déclin et de réorganisation de tissus dans le quartier Heyvaert a permis de mettre en évidence les synergies entre les composants lors des différentes phases de leur cycle adaptatif. Elle a révélé que le composant viaire est le plus robuste, il conditionne l'organisation de l'ensemble du tissu. La diminution de sa diversité et de sa connectivité lors de la phase de réorganisation, engendre dès lors des modifications structurelles conséquentes des autres composants morphologiques.

Cette analyse a révélé des processus récurrents d'adaptation (fig. 3) mettant en lumière la richesse de l'organisation morphologique comme potentiel pour l'adaptabilité des tissus. Ils montrent en même temps le risque de voir diminuer cette richesse. Cette observation plaide en faveur de la mise en place d'un suivi et d'une vision globale d'évolution des tissus hétérogènes, notamment sur le maintien d'une hétérogénéité du réseau viaire pour éviter de voir disparaître cette organisation riche et adaptable.

Conclusion

Être une ressource signifie offrir des possibilités d'action. Et cette recherche a montré que les tissus hétérogènes, par la diversité des types de rues, de parcelles, de bâti, d'interface et leur redondance au sein des fronts de rue, par l'efficacité de leur organisation et leur connectivité, multiplient les possibilités d'action, d'adaptation, d'appropriation d'espaces. Cette recherche pose la première pierre de ce qui pourrait devenir un laboratoire de morphologie urbaine au service de la connaissance de l'hétérogénéité urbaine. L'analyse de la forme urbaine devrait y être au cœur des enjeux de planification urbaine, envisagée dans une double démarche de production de connaissance et d'aide à la décision dans l'encadrement des transformations des tissus urbains pour fabriquer une ville plus adaptable.

Faut-il dès lors planifier l'hétérogénéité urbaine ? À mon sens la solution doit se trouver non pas dans une régulation rigide mais dans la constitution d'une "chambre de qualité pour l'hétérogénéité" qui pourrait se charger du monitoring de l'hétérogénéité et d'accompagner les acteurs publics et privés engagés dans des projets de transformation et d'extension urbaine. ■



4

Médiagraphie sélective

Allain, R. (2004). *Morphologie urbaine : géographie, aménagement et architecture de la ville*. Paris : Armand Colin.

Caniggia, G., & Maffei, G. L. (2000[1979]). *Composition architecturale et typologie du bâti : 1. lecture du bâti de base* (traduit par P. Larochelle). Versailles : Ville Recherche Diffusion.

Dovey, K., Pafka, E., & Ristic, M. (2018). *Mapping Urbanities. Morphologies, Flows, Possibilities*. New York : Routledge.

Feliciotti, A., Romice, O., & Porta, S. (2017). Urban regeneration, masterplans and resilience: The case of Gorbals, Glasgow. *Urban Morphology*, 21(1), 61–79.

Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49.

Törmä, I., Griffiths, S., & Vaughan, L. (2017). High street changeability: The effect of urban form on demolition, modification and use change in two south London suburbs. *Urban Morphology*, 21(1), 5–28.

④ Code QR pour visualiser la
soutenance publique.

Masquer le masque

Auteur

Bernard Wittevrongel
Architecte, professeur
LOCI, UCLouvain

Résumé. La question de l'habillage en architecture est un fait. La relation qui s'établit entre habillage et habillé, entre Kernform et Kunstform est cruciale chez Karl Bötticher. Gottfried Semper quant à lui s'attache à la nature de l'habillage – ou du masque – pour faire entrer la construction dans le domaine de l'architecture. C'est le pavillon allemand de Barcelone qui nous sert de support à cette proposition semperienne.

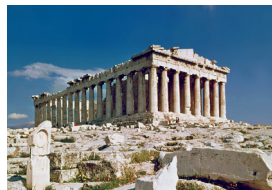
Mots-clés. habillage · Kernform/Kunstform · Bötticher · Semper · Mies van der Rohe · pavillon de Barcelone

Abstract. Dressing in architecture is a fact. The relationship established between dressing and dressed, between Kernform and Kunstform, is crucial for Bötticher. Gottfried Semper, on the other hand, focuses on the nature of the dressing - or the mask - to bring construction into the realm of architecture. The Barcelona Pavilion serves as an example in this Semperian proposal.

Keywords. dressing · Kernform/Kunstform · Bötticher · Semper · Mies van der Rohe · Barcelona Pavilion



①



②



③

Vu le nombre d'articles et d'ouvrages qui lui sont consacrés près d'un siècle après son édification, le pavillon de Barcelone (fig. 1) reste un sujet d'étude fascinant. Dans cet édifice, comme dans tant d'autres édifices de Ludwig Mies van der Rohe, la matérialité s'avère déterminante, non pas en raison d'une quelconque fascination de l'architecte pour un matériau plutôt qu'un autre, mais principalement par l'attention qu'il porte aux propriétés de chaque matériau. L'importance des circonstances matérielles dans l'acte de construire – ce n'est pas pour rien que Mies utilise souvent le terme de *Baukunst* (art de construire) au lieu d'architecture – est d'ailleurs pleinement revendiquée quand il décrit les circonstances dans lesquelles le pavillon fut conçu (Mies van der Rohe, 1961) :

Quand j'ai eu l'idée de ce bâtiment, j'ai dû regarder autour de moi. Il n'y avait pas beaucoup de temps, très peu de temps en fait. C'était l'hiver en plein et on ne peut transporter du marbre hors d'une carrière en hiver car il est encore humide à l'intérieur et pourrait geler en éclats. J'ai visité de nombreux dépôts de marbre et dans l'un d'entre eux j'ai trouvé un bloc en onyx. Le bloc avait certaines dimensions et vu que c'était la seule possibilité qui s'offrait à moi, j'ai conçu le pavillon deux fois la hauteur du bloc.

Cette attention particulière pour le matériau ne signifie pas pour autant qu'il y aurait une correspondance parfaite entre l'édifice construit et l'édifice révélé. Structure et construction restent des moyens manipulables à souhait, dans l'histoire de l'architecture. Sinon, comment interpréter les colonnades continues sur les quatre côtés du Parthénon

(fig. 2) ou dans le gymnase de Losone de Vacchini (fig. 3), indifférentes aux charges à supporter et au sens de portée ? On pourrait conclure avec Souto de Moura (2012, p.89) "qu'il n'y a pas plus de beauté vraie que de vérité en architecture".

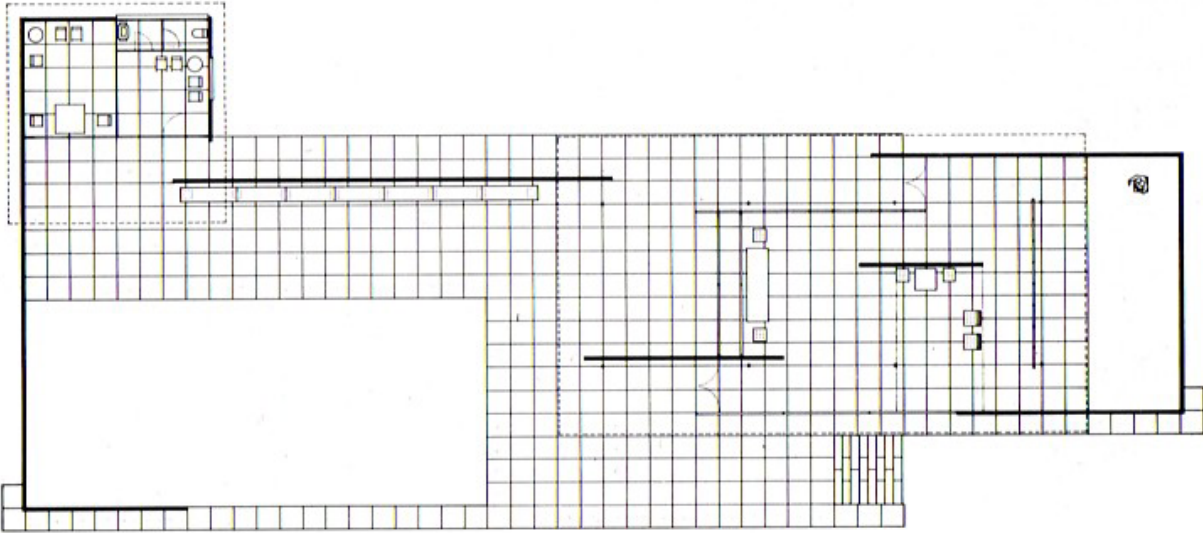
La question du rapport entre l'œuvre construite incluant sa dimension cachée et l'œuvre révélée nous renvoie à Karl Bötticher (1852) quand il distingue la *Kunstform* – ou l'expression artistique – en opposition à la *Kernform* – la nécessité matérielle et structurelle. Nous analysons ici en quelle mesure cette distinction est d'application dans le pavillon de Mies.

Le plan du pavillon (fig. 4) se compose d'une série de cloisons indépendantes, vitrées ou non, organisant une succession d'espaces ouverts. La mise en place des parois n'est pas sans rappeler le système spatial proposé pour la maison de campagne en brique de 1923 (fig. 5). À la différence de cette dernière, c'est une structure de huit colonnes (fig. 9) qui prend en charge la statique de l'édifice et non les murs maçonnés. Dans son étude du pavillon, Paolo Amaldi (2006) nous décrit la chronologie du projet et démontre que l'apparition et la disposition des fameuses colonnes en croix (fig. 6), à jamais associées à Mies, s'opère après la mise en place de l'organisation spatiale. Ces colonnes, au nombre de six ou de huit dans les versions successives continuent de nous interroger. Leur présence fut même remise en question Frank Lloyd Wright (1932) qui, de surcroît, les qualifie de dangereuses.

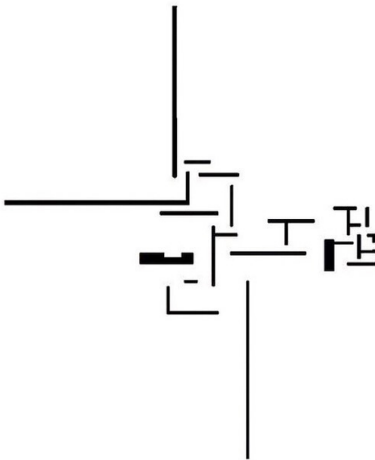
① Ludwig Mies van der Rohe, Vue intérieure du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022

② Parthénon, Athènes.

③ Livio Vacchini, Gymnase multifonctionnel, Losone, 1990-97.



4



5

La prédominance de la paroi – qui prend en charge l'organisation spatiale et pré-suppose la présence d'un élément porteur distinct – sur la structure se retrouve dans les théories de Gottfried Semper et plus particulièrement dans *les quatre éléments*. Dans les premières constructions, Semper distingue, à côté du foyer, le toit, la clôture et le terre-plein. Pour lui, ce sont les aptitudes techniques des êtres humains qui s'organisent à partir de ces éléments. Aussi, la structure est le dispositif à la fois nécessaire mais secondaire qui soutient le toit et auquel les parois textiles de ces constructions primitives viennent se fixer. Selon Semper, cette dissociation entre la structure et la peau que nous assimilons d'ordinaire à l'architecture moderne est à l'origine de la discipline.

Dans le pavillon de Barcelone, cette distinction entre la structure et l'organisation spatiale est un fait que Mies semble souligner, du moins quand nous observons le plan. Quiconque fait l'expérience de l'espace a du mal à percevoir l'évi-

dence du plan : la disposition des différentes parois, vitrées ou non, empêche une perception globale de l'ordre mis en place. Il n'est pas impensable que la révélation de cet ordre n'ait pas été la préoccupation majeure de Mies. L'ordre est là sans clamer sa présence.

Les matériaux mis en œuvre sont précieux : le travertin, le marbre vert et l'onyx doré, du verre clair ou translucide ainsi que du métal nickelé. Mies nous laisse suffisamment d'indices pour qu'on perçoive le statut de ces différents matériaux : l'appareillage en carrelage des parois et la fixation visible des tôles (fig. 7) indiquent qu'il s'agit de revêtements. Il assume clairement l'habillage de la colonne, optant pour une fixation vissée, au lieu de la fixation discrète que lui propose son collaborateur Sergius Ruegenberg. Il confirme ainsi la présence de la structure, derrière le revêtement, ôtée du regard. Ces indices nous amènent à explorer la dimension cachée de l'édifice, la *Werkform*, pour reprendre le vocabulaire de Bötticher.

Le toit joue un rôle déterminant dans la perception du plan libre. Les coupes et les photos de chantier nous révèlent sa constitution ainsi que la mise en œuvre du mince porte-à-faux, nécessaire à l'expression de légèreté souhaitée par Mies (fig. 8). La toiture ne témoigne plus d'une structure en acier, résultat d'un assemblage de profilés, plaques et goujons : elle s'abstrait et se résout à n'être qu'un plan, délicatement posé sur quelques colonnes en croix. Ces dernières se constituent de quatre cornières, unifiées visuellement grâce à leur habillage en tôle nickelée, tel "un manteau qui suggère la physionomie de celui qui le porte, il l'esquisse discrètement, tout en développant une vie autonome qui repose sur les caractéristiques de l'étoffe et du modèle" (Wieser, Deplazes, 2013). La robe que dessine Henry Van de Velde



6



7

- ④ Ludwig Mies van der Rohe, Plan du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022
- ⑤ Ludwig Mies Van der Rohe, Plan de la maison de campagne en brique, 1923.
© sabam Belgium 2022
- ⑥ Ludwig Mies van der Rohe, Vue intérieure du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022
- ⑦ Ludwig Mies van der Rohe, Détail de fixation des tôles du pavillon allemand, Barcelone, 1929.



8



10

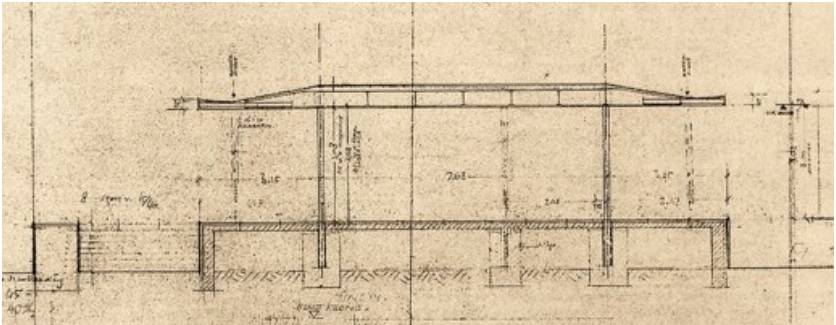


9 Ludwig Mies van der Rohe, Coupe et vue de chantier du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022

9 Ludwig Mies van der Rohe, Coupe du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022

10 Ludwig Mies van der Rohe, Détails d'angle du pavillon allemand, Barcelone, 1929.

11 Otto Wagner, Postsparkasse, Vienne, 1904-1912.



9

pour son épouse Maria Sèthe explore de manière littérale ce rapport entre habil-
lage et habillée (fig. 12).

La paroi en onyx vient habiller un noyau
maçonné. Mies nous envoie des mes-
sages contradictoires : alors que l'appa-
reillage ne laisse planer aucun doute sur
le statut d'habillage du marbre précieux
(fig. 10), il refuse que ce statut se révèle
aux angles, là où les minces plaques de
marbre devraient se rejoindre, comme
c'est le cas à certains endroits du socle.
Aussi, aux extrémités de la paroi en
onyx, il substitue aux panneaux d'habil-
lage un bloc en onyx massif.

On est au sein d'une architecture mas-
quant délibérément la construction. Ce
qui est particulier, c'est que Mies ne
semble pas vouloir adopter une posi-
tion de principe consistant à révéler de
manière conséquente le statut des diffé-
rents matériaux comme l'avait fait avant
lui Otto Wagner dans la Postsparkasse
de Vienne (fig. 11). Dans la grande halle,
la distinction entre *Kunstform* et *Kern-
form* prend une dimension didactique.
Deux expressions du projet se côtoient :
en simplifiant, on pourrait dire que ce qui
se trouve à hauteur d'homme participe
à l'expression artistique du projet, à la
Kunstform ; le contraste avec la partie
supérieure, démasquée, de l'ordre de la
Kernform, révèle la structure dans toute
sa nudité. La dualité entre *Kunstform*
et la *Kernform* est rendue directement
lisible.

Chez Wagner, cette nécessité de venir
masquer les éléments de construction
renvoie explicitement à Semper (1834-
1869) qui fait de l'habillage en architec-
ture une nécessité, porteuse de sens :

*Je pense que l'action consistant à
revêtir et masquer (maskiren) est
aussi vieille que la civilisation elle-
même, et que la joie qu'elle procure
est identique à ce plaisir de créer
qui conduisit les hommes à être
sculpteurs, peintres, architectes,
poètes, musiciens, dramaturges,
artistes en un mot. Toute création
artistique, tout plaisir artistique sup-
pose une certaine humeur festive,
pour m'exprimer de façon moderne
— les effluves des cierges de la fête
constituent la véritable atmosphère
de l'art.*



11

Chez Mies, la référence à Semper dans
le rapport entre l'habillage et l'expres-
sion artistique est implicite. Les maté-
riaux se chargeant de la *Kunstform* ont
ceci en commun : la réflexion. Qu'ils
soient pierreux, ferreux ou de verre,
leur état de surface génère la réflexion.
Cette réflexion de la matière traverse
toute la première partie de l'œuvre de
Mies. Il en est déjà question à propos du
projet pour le gratte-ciel en verre de la
Friedrichstrasse (fig. 13). Dans le pavil-
lon, le verre, le marbre poli et la colonne
prennent à bras le corps le rôle de sur-
face réfléchissante jusqu'à perturber la
lecture de l'espace (fig. 14, 16). Une des
photos sélectionnées par Mies à des fins
de publication nous montre combien
cette réflexion jusqu'à l'obtention d'une
transparence confirmée par des pho-
tos prises dans le pavillon reconstruit
(fig. 15).

C'est là que Semper et Mies se re-
joignent : l'habillage, le masque, dont
nous parle Semper sert à "l'anéantis-
sment de la réalité et de ce qui relève
de la matière". Pour Semper, une forme
d'amnésie doit faire jour afin "d'oublier
les moyens auxquels on doit faire appel"
pour parvenir au résultat voulu. Ces
moyens, ceux mis en place pour le gros
œuvre dont il faut, toujours selon Sem-
per, *une parfaite maîtrise*, sont indisso-
ciablement liés à l'habillage.

Chez Mies, l'habillage, le masque, n'est pas celui de Wagner. Le masque de Mies tend vers l'absence. De cela aussi, Semper (1834-1869, p.333) nous parle :

C'est dans cette direction que leur sensibilité intacte guidait les hommes primitifs dans toutes les entreprises artistiques anciennes, vers cela même que revenaient les grands et véritables maîtres de l'art, quelle que soit la discipline considérée, sauf que dans les temps de haut développement artistique ceux-ci masquaient aussi la matière même du masque.¹

C'est en ce sens qu'il faut voir les matériaux mis en œuvre dans le pavillon, l'onyx et le revêtement des colonnes en particulier : ils masquent non seulement l'élément de construction – l'effort nécessaire à la construction – mais diluent aussi la présence du masque même. La matière du masque devient reflet et s'en trouve masquée (fig. 16).

Alors que le toit plâtré et le sol en travertin se répondent par leur tonalité écriue (fig. 16), deux autres matériaux viennent se surajouter à la construction : le tapis noir et le rideau en velours rouge.

Mats, épais et lourds, ils marquent l'espace de leur présence *rapportée*. On pourrait les mettre en relation avec l'origine textile de la paroi et du sol, thèmes, qu'à nouveau, nous retrouvons chez Semper pour qui le tapis ou l'élément tissé vient délimiter l'espace. Cela participe à l'attitude qui prévaut dans le pavillon, la juxtaposition et l'autonomie des éléments en termes spatiaux et fonctionnels : ainsi la paroi de verre clôt l'espace alors que le rideau prend en charge l'occultation.

Le rapprochement entre Mies et Semper qui est fait tout au long de l'article peut sembler paradoxal. En effet, que ce soit dans les conversations compilées par Moisés Puente (2008) ou dans les "Lohan Tapes" transcrites par Fritz Neumeyer (2020), le nom de Semper n'apparaît nulle part. Parmi les architectes du XIX^e et du début du XX^e, Schinkel et Berlage, par contre, semblent avoir exercé une forte influence sur Mies. C'est donc indirectement, à travers l'œuvre de ces deux éminents architectes que Mies rencontra ces idées qui étaient, sans aucun doute, dans l'esprit du temps. ■

⑫ Henry Van de Velde, Robe pour Maria Sèthe, 1902.
© sabam Belgium 2022

⑬ Ludwig Mies van der Rohe, Gratte-ciel en verre, Friedrichstrasse, Berlin, 1921.
© sabam Belgium 2022

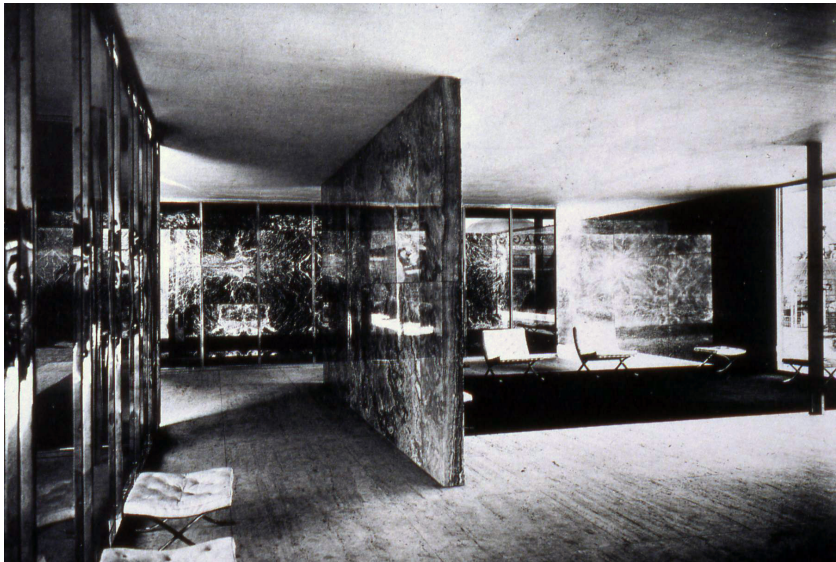
1 - Les traductions peuvent s'avérer très différentes d'un ouvrage à l'autre. Cette traduction de Jacques Soullou est à mettre en comparaison avec celle dans *Architecture d'Aujourd'hui* (2001) : "C'est là que conduit le sentiment intact dans toutes les premières tentatives artistiques des hommes primitifs, c'est là que retournent les véritables grands maîtres dans tous les domaines de l'art ; aux époques de fioritures artistiques maximales où ceux-ci travestissaient les matériaux."



⑫



⑬



14



15

- 14 Ludwig Mies van der Rohe, Photo d'époque du pavillon allemand, Barcelone, 1929, vue intérieure.
© sabam Belgium 2022
- 15 Ludwig Mies van der Rohe, Vue intérieure de la reconstruction du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022
- 16 Ludwig Mies van der Rohe, Vue intérieure du pavillon allemand, Barcelone, 1929.
© sabam Belgium 2022



16

Médiagraphie

- Amaldi, P. (2006). *Mies van der Rohe, Espace et densité*. Gollion : Infolio.
- Bötticher, K. (1852). *Die Tektonik der Helle-nen*. Potsdam : Riegel.
- Mies van der Rohe, L. (1961). Pavillon de Barcelone, 1929, Peter Carter *AD*, 31(3), 100.
- Neumeyer, F. (Ed.) (2021). *The lost, last words of Mies van der Rohe : The Loban tapes from 1969*. Berlin : DOM publishers.
- Paczowski, B. (2001). Couleur, peau et structure. *L'Architecture d'Aujourd'hui*, 334, 40–45.
- Puente, M. (Ed.) (2008). *Conversations with Mies van der Rohe*. New York, NY : Princeton Architectural Press.
- Semper, G. (1834-1869[2007]). *Du style et de l'architecture, Écrits, 1834-1869* (traduit par J. Soullillou). Marseille : Parenthèses.
- Souto de Moura, E. (2012). Dans Machabert, D., *Souto De Moura, Au Thoronet, le diable m'a dit...* Marseille : Parenthèses.
- Wieser, C., Deplazes, A. (2013). Gros-œuvre, second œuvre, gros-œuvre noble. Dans A. Deplazes, *Construire l'architecture* (2^e éd.). Zurich : ETH, : Bâle, Birkhauser.
- Wright, F. L. (1932). *Some day let's per-suade Mies to get rid of those damned lit-tle steel posts that look so dangerous, interfering in his lovely design*. Lettre à Philip Johnson, 26 février 1932, MOMA.

Du standard passif à l'architecture météorologique

Auteur

Martin Outers

Ingénieur architecte, maître de
conférence invité

LOCI, UCLouvain

Associé du bureau d'architecture

Matador

© 0000-0003-2060-8286

Résumé. Ce texte, écrit initialement en 2015, s'appuie sur des projets de Philippe Rahm pour exposer les particularités de sa démarche de conception. Il pointe l'originalité de celle-ci au regard des préceptes véhiculés par le standard passif qui constituent, depuis, le socle de la nouvelle réglementation belge en matière de performance énergétique. Le présent article vise à analyser les motivations et contraintes inhérentes au standard passif et de montrer dans quelle mesure le concept d'architecture météorologique inventé par Philippe Rahm, les intègre et les dépasse.

Mots-clés. Philippe Rahm · architecture météorologique · standard passif · développement durable · projet d'architecture

Abstract. This text, originally written in 2015, is based on Philippe Rahm's projects and discusses the specifics of his design approach. It highlights the originality of this approach with regard to the precepts conveyed by the passive standard, which have since become the basis of new Belgian regulations on energy performance. This article analyses the motivations and constraints inherent to the passive standard and shows to what extent the concept of meteorological architecture invented by Philippe Rahm, integrates and exceeds them.

Keywords. Philippe Rahm · meteorological architecture · passive standard · sustainable development · architectural project

Introduction

"Voilà, j'ai peut-être été un peu long là [...] je ne vais pas avoir beaucoup de temps pour présenter mon travail", disait Philippe Rahm à mi-chemin de la conférence inaugurale qu'il donnait à Louvain-la-Neuve ce 18 novembre 2021, entendant par-là que son propos avait fait la part belle à ses récentes recherches au détriment de ses travaux pratiques, ses projets d'architectures.

À la fois théoriques et pratiques, les travaux de Philippe Rahm brouillent les limites entre sciences et arts. Ainsi, ses projets s'appuient toujours sur un fond scientifique – des hypothèses radicales – et témoignent de leurs effets par la découverte de nouvelles formes architecturales, des façons d'habiter inédites. "Si la cause de l'architecture est climatique [...], si les conditions aujourd'hui sont climatiques, est-ce que les outils de l'architecture peuvent être aussi climatiques ? [...] pourquoi on ne pourrait pas composer avec des principes climatiques ?" poursuivait Philippe Rahm.

Le standard passif (SP) énonce une série de règles qui orientent le processus décisionnel de conception. Ces règles, constituées de contraintes et de motivations, constituent les bases d'un projet. Par ailleurs, ces règles ont des implications directes sur le plan de l'architecture, tant au niveau de la construction

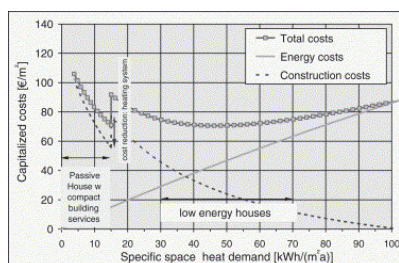
que de l'habitation. Ainsi, le SP peut-il être considéré comme un projet d'architecture générique, sa caractéristique étant d'inclure une multitude d'édifices possibles.

Le présent article vise à analyser les motivations et contraintes inhérentes au projet standard passif et à montrer dans quelle mesure le concept d'architecture météorologique (AM) inventé par Philippe Rahm, les intègre et les dépasse.

Le projet standard passif

"Une maison passive est une maison qui assure un confort intérieur en été comme en hiver. Les pertes de chaleur sont minimisées de manière optimale afin de réduire votre facture énergétique et de diminuer, par la même occasion, votre empreinte environnementale." (PMP, 2013) Le SP entend réduire l'énergie de chauffage consommée dans nos habitations, s'intégrant ainsi dans un projet de société plus large : le développement durable. Si comme le stipule la présentation du standard passif (SP) par la Plateforme Maison Passive (PMP), cette diminution de l'énergie permet de réduire l'empreinte écologique de l'habitat, l'argument principal avancé est bien économique, le bénéfice écologique étant présenté comme un avantage supplémentaire.

Cette prégnance de la composante économique est d'ailleurs à l'œuvre dans la définition même des exigences promues par le SP. En effet, si tous et toutes s'accordent à penser que réduire son empreinte écologique tout en économisant de l'argent est vertueux, encore faut-il mettre une borne à cette réduction. Le SP propose que la performance à atteindre permette de se passer d'un système de chauffage traditionnel et, par-là, de produire une économie sur les coûts d'investissement, lors de la construction. Cette réduction des coûts est appelée "effet tunnel", et fixe la valeur maximale des besoins en énergie de chauffage à 15 kWh/m².an (fig. 1).



①

La relation entre les coûts (d'investissement et de fonctionnement) et les besoins de chauffage présente un autre optimum économique pour les habitats dits "basse énergie". Le choix du standard passif de se baser sur le premier optimum est donc fidèle à son objectif de réduction de la "facture énergétique" et de "l'empreinte environnementale", au détriment des coûts d'investissement et de l'énergie grise.

La seconde motivation du SP concerne le confort de l'habitant.e. En effet, le SP entend réduire les besoins de chauffage, tout en maintenant une ambiance intérieure caractérisée par une température de 20 °C et un renouvellement d'air hygiénique suffisant. Cette motivation contribue, elle aussi, à fixer la borne des 15 kWh/m².an. En effet, d'une part, les besoins de chauffage sont directement proportionnels à la température de consigne que l'on souhaite atteindre. D'autre part, la suppression du système de chauffage traditionnel est rendue possible par la capacité de l'air hygiénique à chauffer l'édifice. La définition même du standard passif exige donc, implicitement, un système de chauffage particulier. Ainsi le SP se fonde sur des motivations écologiques (réduction des besoins de chauffage), économiques (réduction des coûts d'investissement et de fonctionnement) et de confort (température et renouvellement d'air intérieur). Il contraint donc les dispositifs

techniques, notamment par l'utilisation d'un système de chauffage sur la ventilation. Mais là n'est évidemment pas le seul prix à payer pour atteindre le SP.

Le premier est, sans aucun doute, la constitution d'une enveloppe unitaire et continue définissant le volume chauffé. Soit l'interface entre un intérieur chauffé et un extérieur non chauffé. L'enveloppe se caractérise par ses propriétés isolantes et d'étanchéité à l'air. Les premières sont calculées, les secondes mesurées lors de la construction de l'édifice.

En outre, la définition du standard passif présente des aspects implicites en termes techniques comme de confort. L'exigence de réduction drastique des besoins de chauffage et l'abandon d'un système de chauffage traditionnel impliquent, dans la pratique, d'utiliser un système de ventilation mécanique double flux, avec récupérateur de chaleur. Ce système requiert des réseaux de pulsion et d'extraction de l'air ainsi que leur croisement, réseaux qui ont donc des implications sur la spatialité de l'habitat (organisation des pièces pour que le transfert de la pulsion à l'extraction puisse s'opérer, présence de faux plafonds et de gaines afin de permettre le passage des conduits, etc.). Ce système de ventilation fait "d'une pierre deux coups" : il réchauffe les lieux tout en assainissant l'air intérieur. Sa régulation dépend donc en même temps de ces deux paramètres. Ainsi, lorsque la demande de chauffage est importante, les débits d'air dépasseront ceux nécessaires pour la seule ventilation hygiénique.

Le chauffage de l'habitat par l'intermédiaire de l'air pulsé a comme autre conséquence l'uniformisation des températures dans tous les locaux. Le programme de certification du SP prévoit d'ailleurs une seule température de consigne, fixée à 20 °C. Notons enfin que le standard passif nécessite aussi la définition de paramètres de base tels que la caractérisation du climat extérieur (dont dépendent directement les besoins de chauffage) et l'évaluation du nombre d'occupant-es (afin de fixer certaines valeurs de confort et une partie des gains internes).

Le SP a, depuis sa création, étendu ses exigences à la seule réduction des besoins de chauffage. La minimisation des consommations énergétiques des appareils et auxiliaires ainsi que la limitation des surchauffes d'été sont des préoccupations qui ont été ajoutées, depuis. Elles tentent de pallier deux travers des

① Effet tunnel (Schnieders et Hermelink, 2006).

constructions qui respectent le SP à savoir, une technicité importante qui peut s'avérer énergivore, et une sur-isolation pouvant grever le confort d'été et par-là, nécessiter un système de refroidissement tout aussi énergivore.

Critique du standard passif

Contrairement à l'idée souvent véhiculée affirmant que le SP pourrait être atteint pour tout type d'édifice, les motivations inhérentes à ce standard impliquent la constitution d'une enveloppe unitaire fortement isolée et étanche et l'utilisation d'un système de chauffage couplé à la ventilation mécanique double flux. Par ailleurs, il contraint le confort par l'homogénéisation de l'ambiance intérieure. Or, force est de constater que nombre de constructions actuelles satisfont aux critères de SP tout en optant pour un système de chauffage traditionnel. L'optimum économique n'est donc plus vérifié, et la borne des 15 kWh/m².an n'est plus légitimée. En outre, l'homogénéisation des températures de consigne dans tout l'habitat augmente les besoins de chauffage puisqu'elle empêche une régulation adaptée à l'occupation et l'activité.

L'architecture météorologique

Le concept d'architecture météorologique (AM) a été développé par Philippe Rahm. Ce terme qui rassemble bon nombre de projets est défini dans un ouvrage du même nom (Rahm, 2009). Tout comme le SP, l'AM entend réduire les consommations énergétiques dans le secteur de l'habitat. L'AM suit la même démarche conceptuelle que le SP : elle fixe des valeurs de confort et adapte les dispositifs constructifs et spatiaux afin de pouvoir les atteindre tout en réduisant la consommation énergétique de l'édifice. Toutefois, alors que le SP se définit avant tout au travers de performances à atteindre, l'AM entend intégrer les contraintes énergétiques afin d'en faire un ressort de conception (Rahm, 2009, p. 6).

Il nous faut aujourd'hui s'interroger sur cette mission climatique de l'architecture, ne plus l'accepter uniquement comme objectif mais également comme moyen. Le climat doit être intégré en amont du projet d'architecture, dans son langage même. Il doit en modifier les éléments, la structure, les modes de composition et, finalement, les critères esthétiques.

Pour ce faire, l'AM procède à un déplacement : alors que le SP se focalise sur

une résolution technique en insistant sur la part bâtie de l'architecture, l'AM met l'accent sur le vide, la part spatiale de l'architecture. Ainsi, la notion de *confort* est précisée tant en termes qualitatifs que quantitatifs. En effet, l'espace est envisagé comme le lieu de la synesthésie, le lieu d'association de plusieurs sens. L'architecture doit se construire sur la multiplicité des singularités qui définissent l'espace (volume, température, lumière, couleur, humidité, odeur, aliment) et sur la diversité des perceptions corporelles de celui-ci (toucher, respiration, ingestion, radiation, transpiration, activité physique, habillement, perception hormonale) (Rahm, 2009, p. 29). Le confort est donc étendu puisque la lumière, les couleurs, les odeurs le caractérisent tout autant que la température, l'humidité ou le taux de dioxyde de carbone. Chacun de ces critères est quantifié en fonction de l'activité humaine. Constatant que cette activité produit et nécessite des ambiances intérieures différentes, l'architecture météorologique les caractérise de façon hétérogène. Par exemple, l'AM se différencie du SP dans la définition d'une température de consigne suivant l'habillement et l'activité de l'occupant-e. Enfin, chaque critère de confort étant caractérisé par un gradient, l'AM étudie les phénomènes physiques assurant cette variation. Ainsi, si le SP se concentre sur la conduction thermique, l'AM considère tout autant les phénomènes de convection, de dépression et de radiation.

Projets

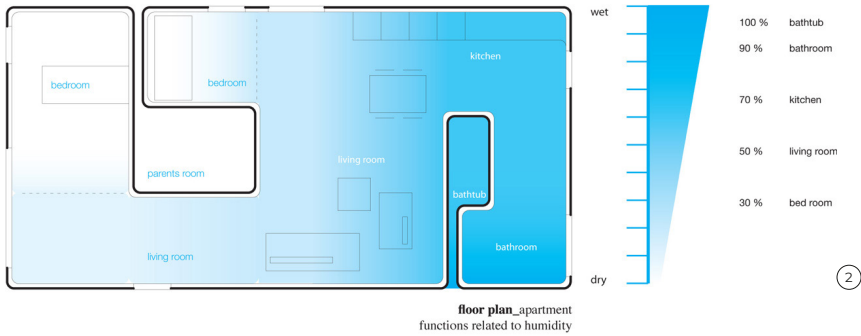
Contrairement au standard passif, l'architecture météorologique ne s'est pas encore incarnée dans un habitat construit, sinon sous forme d'installations muséales. Ce projet n'est donc que de papier et ne peut pas, comme le SP, bénéficier d'une vérification *réelle*. L'AM reste à ce jour spéculative, malgré les nombreux projets initiés par P. Rahm. Ceux-ci, repris notamment sur le site internet de l'architecte, permettent toutefois d'illustrer de façon concrète la méthode de conception proposée par l'AM.

Qualité de l'air

La qualité de l'air est définie par son taux d'humidité ou sa teneur en oxygène. Le flux produisant une variation de ces caractéristiques climatiques est produit par une ventilation mécanisée.

Humidité

Le projet de logements collectif *Vapor apartments* (2009) différencie les activités en fonction du taux d'humidité qu'elles dégagent (fig. 2). Un flux d'air parcourant tout l'appartement est provoqué par une ventilation mécanique



double flux (avec échangeur de chaleur). La composition générale garantit la continuité du parcours de ce flux d'air et les coins arrondis permettent d'éviter des effets de turbulence. L'humidité devant être évacuée du logement, le parcours du flux d'air débute dans les ambiances les plus sèches et aboutit dans celles présentant le plus grand taux d'humidité. Cette règle régit l'implantation des différentes affectations. La typologie ainsi obtenue propose une proximité de la cuisine et de la salle de bains plutôt que la distinction habituelle entre les espaces de jour et de nuit.

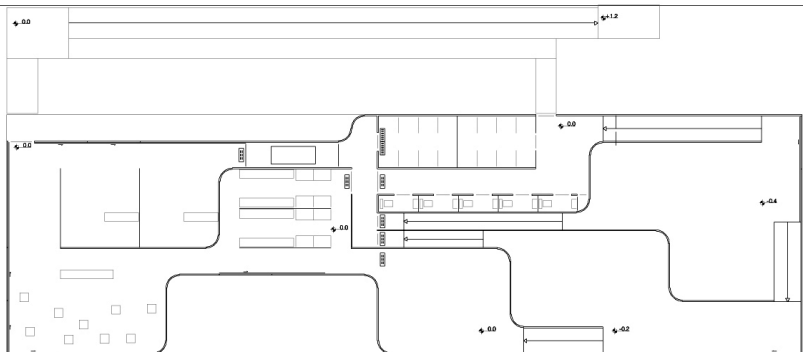
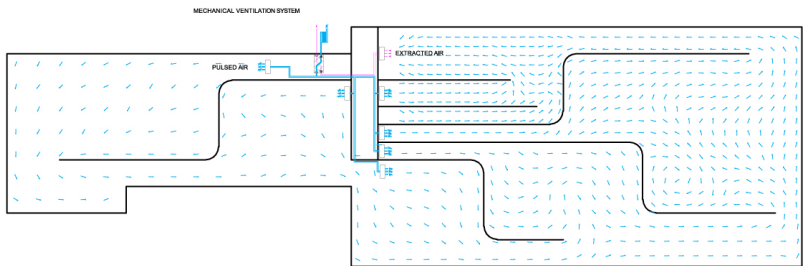
Oxygène

Le projet de centre sportif sur l'eau à Lyon, *Airscape* (2008), définit différents taux de renouvellement d'air en fonction des activités présentes dans le programme (fig. 3). L'enjeu est ici d'apporter aux corps l'oxygène nécessaire (et suffisant) pour l'exercice de chaque activité proposée. Le parcours du flux d'air est aussi induit par une différence de pression créée par une ventilation double flux (avec échangeur de chaleur). Il s'étend depuis les lieux voués aux occupations

nécessitant le moins d'oxygène (le foyer) jusqu'à celle présentant une activité physique intense (la salle de sport). Plusieurs bouches de pulsion sont placées le long de ce parcours afin d'augmenter à chaque fois le taux de renouvellement d'air. L'extraction est quant à elle centralisée dans les douches. Un noyau technique central permet le croisement entre les flux entrant et sortant.

Odeurs et arômes

Le projet d'antenne parisienne des voies navigables de France, *Réalité filtrée* (Rahm, 2009, p. 94) propose de dilater le conduit de pulsion d'air afin de le rendre habitable. Ce conduit constitue alors le couloir de distribution de l'édifice. Le parement des cloisons qui le constitue est composé de pierres calcaires reproduisant sur sa longueur la stratification des sols érodés par le vent, que l'on retrouve depuis l'océan Atlantique jusqu'au Bassin parisien. L'air entrant dans les différents locaux est donc chargé des odeurs caractérisant les différents sols que l'on retrouve depuis Le Havre jusqu'à Paris.



- ② *Vapor apartments*, étage type.
(Site internet de P. Rahm).
- ③ *Airscape*, flux et aménagements.
(Site internet de P. Rahm)
- ④ *Réalité filtrée*, plan de ventilation ;
géologie : localisation ; roches :
utilisations. (Site internet de P.
Rahm).

Température

Plusieurs projets de Philippe Rahm proposent de créer des ambiances différenciées par leur température. Cette variation des températures recherchée s'accompagne d'un flux de chaleur créé soit par conduction, soit par convection.

Conduction

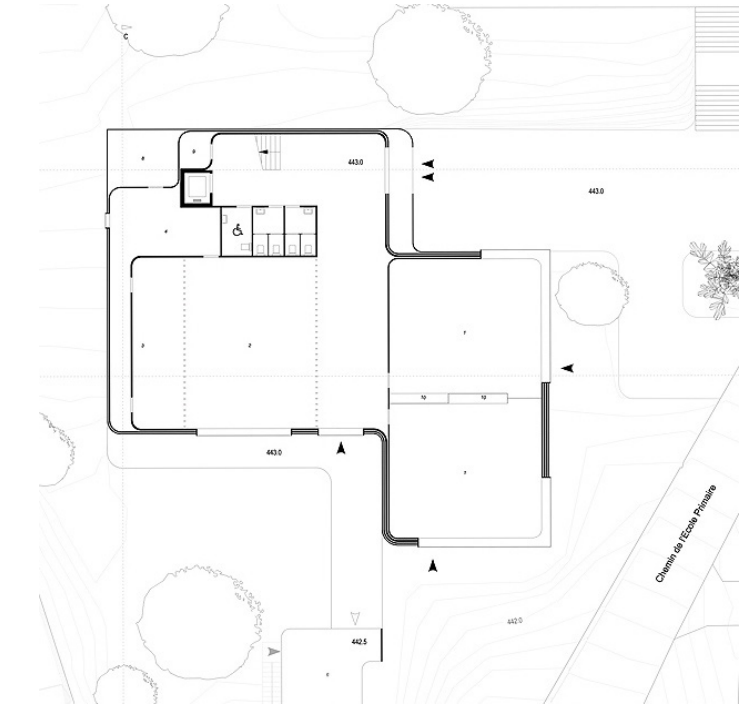
Le projet d'école primaire à Neuveville en Suisse (2007) propose que l'édifice soit constitué de plusieurs enveloppes emboîtées (fig. 5). Actant que les activités de l'école requièrent des températures de consignes différentes (les classes sont par exemple chauffées à 20 °C alors que les espaces de circulation le sont à 15 °C), les espaces sont agencés de façon à ce que les pièces les plus chaudes soient entourées de pièces nécessitant des températures de confort moins importantes. Ainsi,

on retrouve depuis l'extérieur, les sanitaires et les espaces de stockage, les circulations et halls communs et enfin les classes. Ces couches habitées sont séparées par des enveloppes isolantes qui se désolidarisent et se rejoignent en fonction des conditions de mitoyenneté des différents espaces. (Outers, 2016)

Convection

a) *Principe d'Archimède*. Le projet de maison *Archimède* (Rahm, 2009, p. 110) se base sur la définition de T° de consignes différenciées en fonction des activités et de l'habillement de l'habitant-e (circuler : 12 °C, stocker et laver : 12 °C, déféquer : 15 à 18 °C, cuisiner : 18 à 20 °C, dormir : 16 à 18 °C, s'occuper : 20 °C, se laver : 22 °C) (fig. 6). Selon le principe d'Archimède, l'air chaud a tendance à monter, créant un transfert de chaleur par convection. Tout local chauffé présente donc une stratification des températures allant des plus basses, au sol, aux plus hautes, au plafond. Partant de ce constat, le projet propose une organisation verticale de la maison, permettant à la convection naturelle de s'opérer. Les affectations sont ensuite implantées dans cette verticalité afin d'obtenir la température de consigne qu'elles requièrent. La typologie obtenue se démarque par l'empilement des différentes pièces constituant la maison et par l'éloignement des chambres et de la salle de bains.

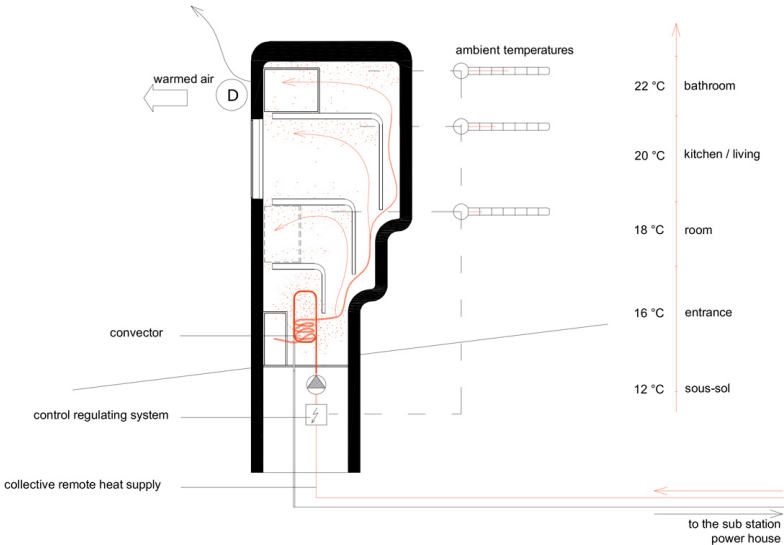
b) *Source chaude et froide*. Le projet de Musée d'art contemporain à Wrocław, *Convective Museum*, (2008) propose une stratification des températures allant de 16 °C à 22 °C afin de rencontrer les conditions dictées par le programme : 16-17 °C en l'absence d'occupation (archivage), 17-18 °C pour la circulation (couloir, lobby), 18-20 °C pour une activité physique faible (expositions, ateliers, cuisines), 20-21 °C



5

5 École primaire à Neuveville, plan du rez. (Site internet de P. Rahm).

6 Maison *Archimède*, coupe. (Site internet de P. Rahm).



6

pour une activité très faible (salles de réunion, auditoire, restaurant) (fig. 7). Le gradient de température est créé par le placement de deux sources de chaleur : l'une en bas, à 22 °C, l'autre en haut à 16 °C. La différence de température de ces deux sources crée un flux de chaleur par convection présentant des températures différentes en plan et en coupe. Les affectations sont placées dans le bâtiment en fonction de la température de consigne qu'elles requièrent. Les planchers, plafonds et cloisons de l'édifice sont percés afin de permettre à l'air de circuler librement entre les différents espaces.

c) *Différence de pression (due à la ventilation mécanique)*. Le projet de hall de sport en Slovénie, *Windtrap* (2009) est conçu à la manière d'un échangeur double flux (fig. 8). Les températures de consignes sont différenciées en fonction des besoins dus aux différentes activités (de 12 °C pour les stockages à 22 °C pour les vestiaires). Un flux d'air est créé à travers tout l'édifice par la ventilation mécanique. L'échange de chaleur entre les flux sortant et entrant s'opère à travers le volume des sanitaires dont les parois sont en métal afin de permettre le transfert de chaleur. L'implantation des affectations est cohérente à la fois avec les températures de consigne et les taux d'humidité rencontrés tout au long du parcours de l'air.

Climat naturel artificialisé

L'installation *terroir déterritorialisé*, réalisée à Paris, à l'occasion de la carte blanche VIA (Rahm, 2009, p. 88), propose de recréer, dans une pièce, le climat qui régnait à Paris avant son industrialisation, soit en 1832, année qui marqua la mise en route de la première centrale à charbon, en France (fig. 9).



Trois dispositifs techniques sont conçus à cet effet. Le premier consiste à placer une ventilation double flux avec échangeur de chaleur dans la pièce. Les débits d'airs entrant et sortant sont réglés afin d'apporter un renouvellement d'air hygiénique suffisant eu égard au nombre de visiteurs et visiteuses. L'intérieur de l'échangeur est enveloppé d'essences de bois choisies en fonction de leur im-

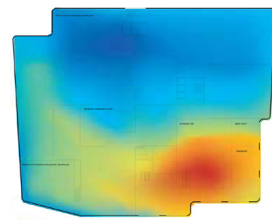
plantation passée autour de Paris et des vents dominants les balayant. Le second dispositif comprend deux plateformes chauffant à des températures différentes (22 °C et 16 °C). La disposition de ces deux plateformes dans la pièce crée un flux convectif dont la direction reprend l'orientation SO-NE, des vents dominants en 1832. Ce flux s'accompagne d'un gradient de température dans la pièce. En outre, les deux plateformes sont recouvertes des roches calcaires reproduisant, en miniature, les proportions de celles du Bassin parisien. Le troisième dispositif consiste en l'utilisation d'un éclairage économe en énergie reproduisant artificiellement la variation d'intensité de lumière naturelle qui existait à Paris le 15 mai 1832.

Critique de l'architecture météorologique

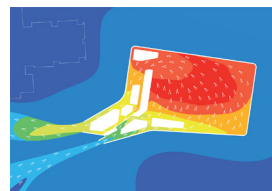
L'AM ne se donne pas d'objectif performantiel précis. Elle gage que la présence d'une enveloppe thermique fortement isolée et que la gestion mécanique de la ventilation avec échangeur de chaleur suffisent à garantir une réduction drastique des besoins en énergie de chauffage. Aucune performance précise n'est explicitement visée, mais l'utilisation des techniques prônées par le standard passif suggère que les 15KWh/m².an pourraient être atteints. Le critère économique ne contribue pas plus à définir l'AM, mais celle-ci pourrait s'inscrire, pour les mêmes raisons, dans l'optimum économique caractérisant le SP.

L'architecture météorologique se différencie toutefois du standard passif en accordant une place centrale à la caractérisation différenciée de l'ambiance. La reconnaissance ou l'établissement d'un déséquilibre engendre un flux qui discrétise la caractéristique atmosphérique étudiée (température, taux d'humidité, taux de CO₂, etc.) en un ensemble de valeurs différentes. Ces valeurs sont choisies en fonction de critères physiologiques, c'est-à-dire par la définition d'un confort modulé par rapport aux différentes activités exercées dans les lieux. Autrement dit, la variation de la caractéristique climatique le long du flux engendre la localisation d'activités spécifiques en fonction des critères de confort requis par celles-ci. Alors que le SP homogénéisait l'ambiance intérieure, l'AM l'hétérogénéise radicalement, le pari étant que cette spécification du confort génère à son tour des économies d'énergie supplémentaires.

En prenant les différentes caractéristiques de l'ambiance comme paramètres principaux de la conception architecturale, l'AM étudie les implications sur l'habitation des dispositifs techniques



7



8

7 *Convective museum*, plan de la répartition des températures. (Site internet de P. Rahm).

8 *Windtrap*, plan de la répartition des températures. (Site internet de P. Rahm).

9 *Terroir déterritorialisé*, vuc. (Site internet de P. Rahm).

usuels du SP. Ainsi, plusieurs principes de conception proposés par l'AM ne font que reprendre des contraintes implicites du SP. Par exemple, l'utilisation d'une ventilation double flux – qui pulse de l'air frais dans les pièces les plus sèches et extrait l'air vicié dans celle présentant le plus grand taux d'humidité – est déjà présente dans le SP, tout comme la différenciation des taux de renouvellement d'air en fonction des activités exercées dans les différents lieux. L'AM ne fait que pointer les dispositifs spatiaux inhérents à ces contraintes. Elle dépasse toutefois la simple opposition espace servi (défini par la pulsion d'air)/espace servant (défini par l'extraction de l'air), en discrétisant les valeurs de consigne en autant de points que d'affectations. La correspondance entre ces valeurs discrétisées et les différentes activités nécessite parfois une implantation non conventionnelle des usages, créant ainsi de nouvelles typologies.

L'emphase du vide ou la création d'ambiances différenciées ne permettent pas à elles seules de générer un projet d'architecture. D'autres paramètres implicites doivent pour cela être ajoutés tels que le programme ou le site. La taille des différents locaux, par exemple, ne peut être déduite des seuls besoins physiologiques liés aux différentes activités. L'AM, comme le SP, ne fixe pas de contraintes ergonomiques, le confort spatial reste donc à définir. Ce point met en exergue un paradoxe dans la méthode de conception proposée : la nécessité de définir un volume global préalable à toute étude des parcours et valeurs des flux et, par-là, à toute implantation des affectations. Ainsi, la majorité des projets représentatifs de l'AM s'inaugure par la définition d'un volume indépendamment des caractéristiques atmosphériques. Le volume du projet de musée d'art contemporain à Wrocław, par exemple, est déterminé en reproduisant le volume de l'ancien musée du XIX^e siècle et en y ajoutant 30 % pour les circulations et 30 % pour de futurs vides. La maison à Margocia profite quant à elle de la préexistence de l'enveloppe de l'édifice à rénover. Par ailleurs, le volume d'autres projets ne semble pas être prédéfini, mais résulter d'un va-et-vient entre la définition des caractéristiques du flux et la spécification des volumes qu'il traverse.

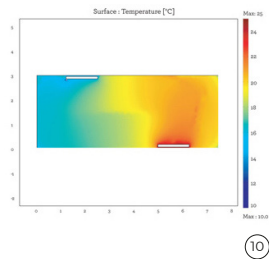
La majorité des projets représentatifs de l'AM sont conçus (et expliqués) à partir d'une – et une seule – caractéristique atmosphérique. La présentation des exemples ci-dessous s'organise d'ailleurs suivant ces différents types de caractéristiques : température, humidité, oxygène, etc. En outre, le gradient que présente chacune des caractéristiques est produit par un type de flux : conductif, convectif ou issu d'une différence

de pression. Le type de caractéristique atmosphérique est déduit de contraintes physiologiques liées à une activité alors que le type de flux est caractérisé par le dispositif qui en est la source. Chaque projet, en se focalisant sur un type de caractéristique atmosphérique et un type de flux, fait l'impasse sur les autres caractéristiques présentes ainsi que sur l'influence du flux étudié sur ces caractéristiques ignorées. L'installation *terroir détériorialisé* propose quant à elle d'étudier plusieurs contraintes atmosphériques à la fois (température, renouvellement d'air, lumière). Mais il est frappant de remarquer que les caractéristiques atmosphériques et les flux qui les caractérisent sont étudiés indépendamment, sans considérer les interactions qui, inévitablement, existent entre eux. Ainsi, la pulsion et l'extraction exercée par la ventilation double flux ne semble avoir aucune influence sur le flux conductif initié par la source chaude et la source froide (fig. 10).

La prise en compte de plusieurs caractéristiques atmosphériques dans un même projet pourrait mettre à mal l'unicité des implantations des affectations. En effet, un logement conçu sous la contrainte de l'humidité, par exemple, proposera un enchaînement des affectations du type chambre – salon – salle à manger – cuisine – salle de bains, alors qu'un logement conçu en fonction de la température proposera plutôt un enchaînement des affectations du type chambre – cuisine – salle à manger – salon – salle de bains dans le cours du flux analysé. Ainsi, la prise en compte de plusieurs caractéristiques atmosphériques simultanément pourrait mener à des contradictions qu'il faudra lever. Mais n'est-ce pas le propre de la conception architecturale que de devoir accorder des contraintes qui semblent contradictoires ?

Le projet *Jade Eco Parc*, à Taichung (Taïwan) se base sur l'analyse de plusieurs caractéristiques atmosphériques et propose de les combiner par simple juxtaposition (fig. 11). Ce projet se distingue des projets précédents de Philippe Rahm. Tout d'abord, par le fait qu'il est en cours de construction. D'autre part, par son programme de parc, qui ne nécessite pas de constitution d'une enveloppe thermique. Le volume d'intervention est donc existant et simplement défini par le site même.

Les caractéristiques atmosphériques étudiées sont le bruit, la pollution et la température. Le projet étant un projet d'aménagement extérieur, le gradient caractérisant les différentes contraintes n'a pas à être créé artificiellement. Le parti est ici de renforcer les caractères existant sur le site en utilisant deux moyens différents. Le premier consiste



10 *Terroir détériorialisé*, répartition des températures. (Site internet de P. Rahm).



à implanter des végétaux spécifiques en fonction du type de contrainte et de sa valeur à un endroit donné. Par exemple, des végétaux captant l'humidité de l'air seront implantés dans les zones les plus sèches et inversement. Le second moyen consiste à créer des machines qui renforcent artificiellement le caractère des différentes zones, comme par exemple un brumisateur, qui augmente le taux d'humidité de l'air des zones déjà humides.

La juxtaposition des caractéristiques spécifie les lieux de trois manières différentes. Le programme est donc implanté en fonction de combinaisons existant entre ces trois caractéristiques. Les jeux pour enfants, par exemple, trouveront leur place dans un lieu sans bruit, tempéré et sec.

La juxtaposition des analyses relatives aux différentes caractéristiques atmosphériques a pour effet de multiplier les ambiances créées, et donc, en toute logique, les affectations. Ainsi, la contradiction relevée pour le logement pourrait être levée en spécifiant davantage chaque activité. La cuisine, par exemple, pourrait être dispersée dans le logement en plusieurs activités définies respectivement par un couple humidité/température différent.

Conclusion

L'architecture météorologique se distingue du standard passif par deux propositions. La première est de redéfinir les critères de confort. Tant qualitativement par l'élargissement des types de contraintes à celles perçues par tous nos sens, que quantitativement, par discrétisation en fonction des actions humaines. La seconde est de considérer, dans le processus de conception, les implications des techniques utilisées, sur l'habitation, et ce, de deux façons. D'abord, en remettant ces techniques

au service d'une spatialité, soit en considérant les caractéristiques atmosphériques du vide (température, humidité, lumière, odeurs, etc.). Ensuite, en soumettant les usages aux caractéristiques atmosphériques produites. Ce faisant, l'AM postule implicitement que les architectes devraient reprendre la main sur les spécialistes en techniques spéciales.

■

Médiagraphie

Brochure maison passive (2013). PMP, avril.

Outers, M. (2016). *Comfort and energy savings: thermal zoning by inclusion*. PLEA.

Rahm, P. (2009). *L'architecture météorologique*. Paris : Archibook.

Rahm, P. Site internet. <http://www.philipperahm.com> consulté le 25/01/2015.

Schieders, J., Hermelin, A. (2006). CEPHEUS results: measurements and occupants' satisfaction provide evidence for Passive Houses being an option for sustainable building. *Energy policy*, 34(2), 151–172.

¹¹ Jade Eco Parc, zones climatiques différenciées et machines. (Site internet de P. Rahm).

Digital models for life-cycle assessment and material-flow analysis of urban built stocks

An opinion piece

Author

André Stephan
International expert in the
life-cycle assessment of buildings
and the development of digital
models
Professor of environmental
performance and parametric
design
Architecture&Climat,
LOCI+LAB, UCLouvain
© 0000-0001-9538-3830

Abstract. Buildings and infrastructure assets represent a significant share of human anthropogenic material stocks, energy use, and related environmental flows, including greenhouse gas emissions. Current methods for assessing built stocks at a city scale are neither detailed nor comprehensive enough, however. This piece provides and discusses requirements for digital models to quantify the combined life-cycle environmental performance and material-flow analysis of urban built stocks. It justifies why these models need to be bottom-up, parametric, multi-scale over the life cycle, and spatially explicit, and why they need to integrate uncertainty. The potential and limitations of such digital models are discussed.

Keywords. life-cycle assessment · urban metabolism · material flow analysis · buildings · environmental performance · environmental flows

Résumé. Les bâtiments et infrastructures représentent une grande partie du stock matériel anthropogénique, de l'utilisation d'énergie, et des flux environnementaux associés. Cependant, les méthodes actuelles d'évaluation des stocks bâtis à l'échelle urbaine ne sont pas assez détaillées et holistiques. Cet article présente et discute les exigences des modèles informatiques qui visent à quantifier à la fois la performance environnementale sur l'ensemble du cycle de vie et les flux de matière des stocks bâtis urbains. Ces modèles nécessitent des approches bottom-up, paramétriques, multi-échelle sur le cycle de vie. Ils doivent aussi être spatialisés et intégrer les incertitudes. Ces nécessités sont justifiées et discutées dans l'article, ainsi que les potentialités et les limites de ce type de modèles informatiques.

Mots-clés. évaluation de cycle de vie · métabolisme urbain · analyse des flux de matière · bâtiments · performance environnementale · flux environnementaux

Introduction

Cities are responsible for more than half of all anthropogenic energy use (Grubler et al., 2012) and associated greenhouse gas emissions (IPCC, 2014). In addition, construction materials within urban buildings and infrastructure assets also represent more than 50% of all accumulated material stocks extracted by humans (Krausmann et al., 2017). The extraction, processing, transportation, maintenance, reuse, recycling, and ultimately decommissioning of these materials require significant amounts of embodied environmental flows, including energy and water. With the climate emergency upon us (IPCC, 2018) and dwindling finite resources (Wiedmann et al., 2015), it is critical to realistically quantify and map available materials in urban built stocks and the associated life-cycle environmental flows needed to produce construction materials, operate and maintain buildings, and reuse, replace, recycle, and decommission construction materials. It is therefore critical to understand the resource flows and environmental effects resulting from constructing, maintaining, and operating buildings and infrastructure assets (built stock) to address the challenges posed by climate change and finite resources.

While there has been significant research conducted on the life-cycle assessment of buildings (Chastas, Theodosiou, & Bikas, 2016; Chau, Leung, & Ng, 2015; Dixit, 2017, 2019; Vilches, Garcia-Martinez, & Sanchez-Montañes, 2017) and on the material stocks and flow analysis of cities (Lanau et al., 2019; Mastrucci, Marvuglia, Leopold, & Benetto, 2017; Mirabella, Allacker, & Sala, 2019; Petit-Boix et al., 2017), we do not yet have the necessary tools to provide a comprehensive analysis conducted at scale. Currently, we either have detailed and holistic analyses conducted at a building scale (e.g., Birge and Berger (2019), or generally rough analyses conducted at the neighbourhood or urban scale (e.g., Lausset, Ellingsen, Strømman, and Brattebø (2019). While significant efforts have been deployed in recent years to combine a high level of detail with a high coverage of environmental flows (e.g., Stephan and Athanassiadis (2017), there is still a significant amount of research required to achieve both and thus enable a high environmental performance of built stocks.

This paper highlights the main features digital models would require to effectively quantify material stocks and flows and associated life-cycle environmental

flows of urban built stocks. This paper is by no mean exhaustive and purposely does not focus on the details due to the lack of space. For more detailed information on the topic, readers are referred to Stephan, Crawford, Bunster, Warren-Myers, and Moosavi (2022).

Digital models for material-flow analysis and life-cycle environmental performance

In order to quantify environmental performance in a meaningful manner and ensure that environmental effects are not simply shifted across time or scales of the built environment, digital models need a significant level of sophistication and complexity. They need to move closer to what Rosnay (1975) called the 'macro-scope', a tool that enables us to look into complex systems. The key features digital models for urban environmental performance need are detailed below.

Theoretical framework

Digital models that aim to replicate built stocks in cities need to adopt a 'nested systems' approach (Walloth, 2016) to represent the very nature of built stocks, i.e., construction materials (e.g., steel) manufactured into construction elements (e.g., steel rebar), joined into construction assemblies (e.g., reinforced concrete slab) placed into built assets (e.g., apartment building) situated in a neighbourhood (e.g., Soho) located in a city (e.g., London) within a region or country (e.g., the United Kingdom). This enables a model to represent material flows and quantify environmental performance at different scales while taking into account the interrelationships between these scales.

In addition, digital models need to be dynamic in order to be able to quantify the evolution of parameters over time, especially with modern society's fast rate of change and the upcoming decarbonisation of energy systems. Static modelling approaches over the long life-span of built assets simply do not enable a realistic assessment (Su, Zhang, Zuo, Li, & Yuan, 2021).

Combining a nested approach across the scales of the built environment with a dynamic temporal approach enables broad spatio-temporal coverage of built stocks which needs to be combined with a life-cycle approach (ISO, 2006) to account for life-cycle stages of nested components (e.g., a construction material) that occur outside the spatial sys-

tem of the city (e.g., the extraction of iron ore from a mine in Western Australia). The resulting theoretical framework for effective digital models aimed at urban environmental performance is depicted in Figure 1.

Scope

In order to quantify the life-cycle material and environmental flows of urban built assets, a range of indicators need to be considered. Elementary flows of material quantities, energy use, water use, greenhouse gas emissions, and waste are considered the most critical environmental flows to consider. Together, these flows represent the dominant majority of all associated environmental effects, as demonstrate by Oregi, Hernandez, Gazulla, and Isasa (2015) for energy alone. The material stock in existing and future buildings and infrastructure assets needs to be quantified, alongside material flows associated with the replacement of materials. Embodied environmental flows associated with the production of construction elements and assemblies as well as the operational flows associated with the use of built assets (e.g., heating an office building or lighting a street) need to be considered. At the urban scale, the environmental flows associated with the mobility of residential buildings' occupants need to be considered to provide a more comprehensive approach (Bastos, Batterman, & Freire, 2015). This broad scope enables the capture of an extremely broad environmental profile of built assets and their occupants, consistent with the theoretical framework detailed above.

A bottom-up approach

A bottom-up approach to modelling built assets is critical in order to enable assessment that provides a sufficient level of detail. Questions such as, "where is this material located within a building?", "When was it installed?", "What is the power rating of the gas boilers in that train station main terminal?" are essential to allow a detailed assessment. Digital models at the urban scale that do not consider the smaller scales or simply use material intensities per surface area (e.g., Tanikawa and Hashimoto (2009) to characterise buildings fail to provide the information required either for robust modelling or for assessing the built stock for urban mining or other circular-economy approaches. This information includes, but is not limited to, the bill of quantities of materials, elements, and construction assemblies, specifications of building systems, construction systems used within the building, the basic

geometry of the building, and the year of construction (and ideally of subsequent renovations).

Parametrisation

In addition to a bottom-up approach, digital models need to be parametric to enable the exploration of different urban designs and building designs and, most importantly, to test the sensitivity of environmental performance to a range of parameters (Hollberg & Ruth, 2016). Without parametrisation, digital models will be extremely costly to update and will not be flexible enough to represent a broad range of built assets (e.g., different types of streets, different types of buildings, different types of infrastructure assets).

Multi-scale life-cycle approach

A bottom-up parametric approach needs to be adopted across the nested scales of the built environment and across the life cycle of each component at each scale. Failing to do so prevents digital models from accounting for flow-on effects between scales and/or between life-cycle stages. For example, Stephan, Crawford, and de Myttenaere (2013) demonstrate that when adopting this approach, passive houses, which focus on significantly reducing the space heating energy demand, tend to shift that energy use to other life-cycle stages and other scales of the built environment. In other terms, the additional embodied energy needed for the insulation of buildings is significant and does not necessarily yield net primary energy savings, depending on the energy source used (as also demonstrated by Gustavsson and

Joelsson (2010). Furthermore, as most passive houses are located in suburban settings, this implies additional energy use for mobility, shifting energy use from the building scale to the urban scale. A multi-scale life-cycle approach is therefore essential.

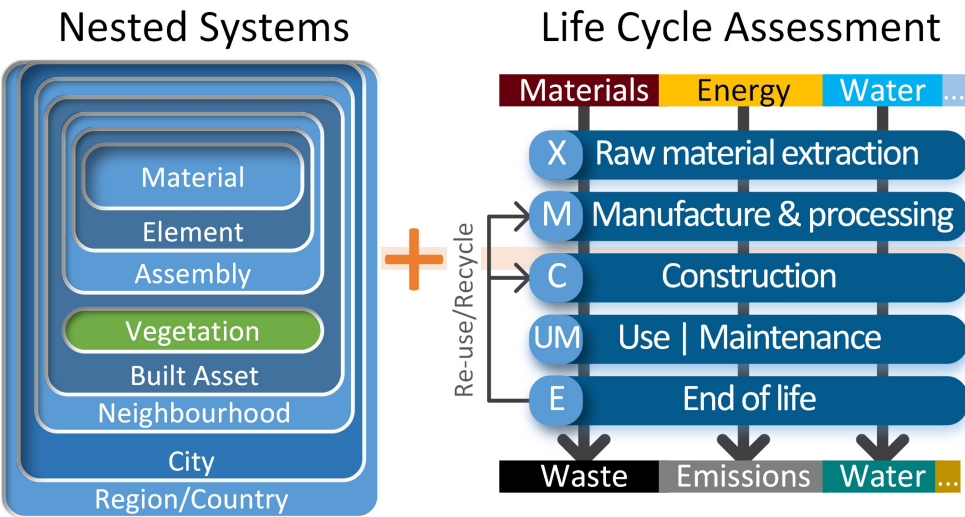
Spatialisation

In addition to all the features above, spatialising the results is critical from a decision-making perspective. This enables digital models to answer such important question as where materials are located, which buildings need renovation, and what suburbs are the most energy-intensive in terms of cooling demand. The importance of spatialisation is highlighted by prominent researchers in the field, including Tanikawa, Fishman, Okuoka, and Sugimoto (2015), Kleemann, Lederer, Rechberger, and Fellner (2016), and Creutzig et al. (2019). Integrating digital models for urban environmental performance with geographic information systems (GIS) is therefore key to adding the spatial dimension of the assessment.

Uncertainty

A very important aspect of any digital model that tackles urban environmental performance is the integration of the significant underlying uncertainty. Since any model is only an attempt to represent reality (Le Moigne, 1999), there will always be a certain level of uncertainty to take into account. Because of the sheer number of variables associated with the digital models presented here, this accumulated uncertainty can be such that it hinders decision-making.

① Theoretical framework for digital models enabling a detailed and comprehensive material-flow analysis and life-cycle assessment of urban built stocks.



It is therefore critical to incorporate it. Uncertainty in digital models for urban environmental performance can be associated with the core data used (e.g., the embodied energy of one cubic metre of 25 MPa concrete), the algorithms used to derive indicators from such data (e.g., the outer walls surface area, derived from a plan-view of a building), the variability associated with parameters that are not directly modelled (e.g., variability in hot water usage between different occupants in a building), the lack of integration of certain parameters (e.g., the urban cooling effect of tree canopies on the cooling energy demand), the limited amount of information for certain variables, and the assumptions made to fill these data gaps (e.g., the on-site wastage coefficient associated with electrical cables), among others. In addition, the temporal evolution of parameters represents increased uncertainty in digital models for urban environmental performance, as predicting the future is speculative at best (Brown, 2004). Incorporating uncertainty in and propagating it through digital models for urban environmental performance is therefore essential.

Discussion and conclusion

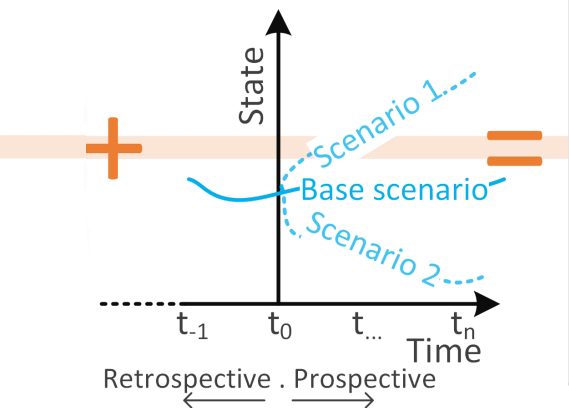
This opinion paper has suggested what digital models would require for integrated material-flow analysis and life-cycle assessment of urban built stocks, including buildings and infrastructure assets. The theoretical framework of a dynamic nested-systems approach across the life cycle of built assets, combined with a bottom-up approach, parametrisation, the multi-scale life cycle approach, the

need for spatialisation and the need to account for uncertainty demonstrate the significant sophistication and complexity of such digital models.

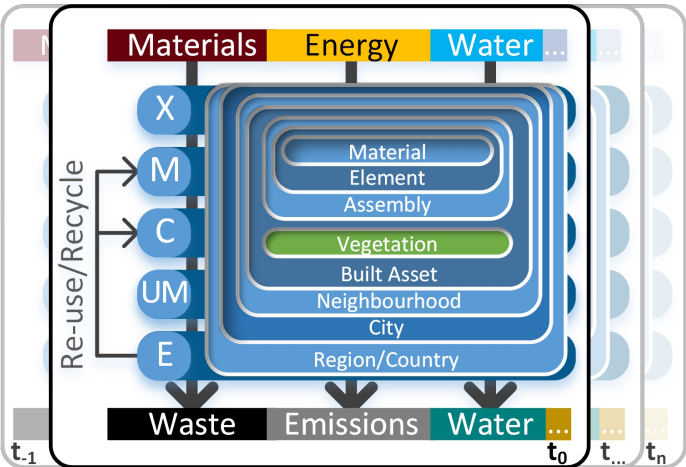
This results in a number of limitations. First, these digital models are extremely data-intensive, which hinders their applicability, as the lack of data implies the need for assumptions which result in additional uncertainty. Second, even if these models are developed and operational, they might not directly lead to decisions that result in net environmental-performance gains, because of the fragmentation of the construction industry. For instance, even if architects using the model understand that the mobility-related environmental flows are significant for the occupants of their buildings, they might not have the power to effect the choices to reduce that environmental flow. It is possible that an architect would not even quantify these mobility-related environmental flows. This has implications in terms of education and awareness that are discussed below. Third, the algorithms used to derive certain indicators are much less mature and tested than others. For example, while we can simulate, with a certain degree of confidence, the heating demand of a particular building, it is much harder to approximate the amount of construction materials in it based on available data (Lanau et al., 2019). Additional advances in such algorithms is needed to reach a higher and more uniform degree of precision.

Despite these limitations, digital tools for urban environmental performance that satisfy the requirements discussed in this paper would enable an unprece-

Dynamic Modelling



Theoretical Framework



mented level of sophistication in guiding urban design decisions that result in net environmental gains. Such models are essential to devise robust policies for renovation and urban mining and a more circular economy. Results from applying such models to international case studies can also provide critical information about how to manage cities to yield better environmental outcomes (see inter alia Athanassiadis, Bouillard, Crawford, & Khan, 2016; Lederer et al., 2020; Stephan & Athanassiadis, 2017, 2018). The application of such digital models can also challenge current educational paradigms, emphasising the need to raise built-environment professionals' awareness of the interconnectedness of their disciplines and of environmental flows associated with their design and management decisions.

The development of such digital models needs to be sustained and their application supported internationally. This will ultimately enable us to quantify the environmental performance of urban built stocks in a detailed yet comprehensive manner and help us mitigate climate change and improve environmental performance. ■

Additional information

Nested Phoenix, a digital model that adopts these requirements, is currently being implemented and will be made available on its dedicated website: www.nestedphoenix.com. Links to all publications and data sources will also be available on the website.

Acknowledgments

This research was funded by the Belgian Fund for Scientific Research (F.R.S.-FNRS) Mandat d'Impulsion Scientifique grant (F4547.21).

Mediagraphy

Athanassiadis, A., Bouillard, P., Crawford, R. H., & Khan, A. Z. (2016). Towards a Dynamic Approach to Urban Metabolism : Tracing the Temporal Evolution of Brussels' Urban Metabolism from 1970 to 2010. *Journal of Industrial Ecology*, doi:10.1111/jiec.12451

Bastos, J., Batterman, S. A., & Freire, F. (2015). Significance of mobility in the life-cycle assessment of buildings. *Building Research & Information*, 1–19. doi: 10.1080/09613218.2016.1097407

Birge, D., & Berger, A. M. (2019). Transitioning to low-carbon suburbs in hot-arid regions : A case-study of Emirati villas in Abu Dhabi. *Building and Environment*, 147, 77–96. doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.013

Brown, J. D. (2004). Knowledge, uncertainty and physical geography : towards the development of methodologies for questioning belief. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3), 367–381. doi: 10.1111/j.0020-2754.2004.00342.x

Chastas, P., Theodosiou, T., & Bikas, D. (2016). Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building : A literature review. *Building and Environment*, 105, 267–282. doi:10.1016/j.buildenv.2016.05.040

Chau, C. K., Leung, T. M., & Ng, W. Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Applied Energy*, 143(0), 395–413. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.023

Creutzig, F., Lohrey, S., Bai, X., Baklanov, A., Dawson, R., Dhakal, S.,... Walsh, B. (2019). Upscaling urban data science for global climate solutions. *Global Sustainability*, 2, e2. doi: 10.1017/sus.2018.16

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings : A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 390–413. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.051

Dixit, M. K. (2019). Life cycle recurrent embodied energy calculation of buildings : A review. *Journal of Cleaner Production*, 209, 731–754. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.230

Grubler, A., Bai, X., Buettner, T., Dhakal, S., Fisk, D. J., Ichinose, T.,... Weisz, H. (2012). Chapter 18 - Urban Energy Systems. In *Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future* (pp. 1307–1400). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Gustavsson, L., & Joelsson, A. (2010). Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy and Buildings*, 42(2), 210–220. doi:10.1016/j.enbuild.2009.08.017

- Hollberg, A., & Ruth, J. (2016). LCA in architectural design—a parametric approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(7), 943–960. doi:10.1007/s11367-016-1065-1
- IPCC. (2014). *Climate change 2014: mitigation of climate change. Contribution of working group III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*.
- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Retrieved from Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : <https://ezp.lib.unimelb.edu.au/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edszbn&AN=EDSZBW821893548&site=eds-live&scope=site>
- ISO. (2006). ISO 14040 :2006 In *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework*. Switzerland : International Organization for Standardization.
- Kleemann, F., Lederer, J., Rechberger, H., & Fellner, J. (2016). GIS — based Analysis of Viennas Material Stock in Buildings. *Journal of Industrial Ecology*. doi: 10.1111/jiec.12446
- Krausmann, F., Wiedenhofer, D., Lauk, C., Haas, W., Tanikawa, H., Fishman, T., Miatto, A., Schandl, H. & Haberl, H. (2017). Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(8), 1880–1885. doi: 10.1073/pnas.1613773114
- Lanau, M., Liu, G., Kral, U., Wiedenhofer, D., Keijzer, E., Yu, C., & Ehlert, C. (2019). Taking Stock of Built Environment Stock Studies : Progress and Prospects. *Environmental Science & Technology*, 53(15), 8499–8515. doi: 10.1021/acsest.8b06652
- Lausset, C., Ellingsen, L. A. W., Stromman, A. H., & Brattebo, H. (2019). A life — cycle assessment model for zero emission neighborhoods. *Journal of Industrial Ecology*, 24(3), 500–516. doi:10.1111/jiec.12960
- Le Moigne, J.-L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes* (Nouv. éd.). Paris : Dunod.
- Lederer, J., Gassner, A., Keringer, F., Mollay, U., Schremmer, C., & Fellner, J. (2020). Material flows and stocks in the urban building sector : A case study from Vienna for the years 1990-2015. *Sustainability (Switzerland)*, 12(1). doi:10.3390/SU12010300
- Mastrucci, A., Marvuglia, A., Leopold, U., & Benetto, E. (2017). Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 316–332. doi: 10.1016/j.rser.2017.02.060
- Mirabella, N., Allacker, K., & Sala, S. (2019). Current trends and limitations of life cycle assessment applied to the urban scale : critical analysis and review of selected literature. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(7), 1174–1193. doi:10.1007/s11367-018-1467-3
- Oregi, X., Hernandez, P., Gazulla, C., & Isasa, M. (2015). Integrating Simplified and Full Life Cycle Approaches in Decision Making for Building Energy Refurbishment : Benefits and Barriers. *Buildings*, 5(2), 354–380. Retrieved from <http://www.mdpi.com/2075-5309/5/2/354>
- Petit-Boix, A., Llorach-Massana, P., Sanjuan-Delmás, D., Sierra-Pérez, J., Vinyes, E., Gabarrell, X., Rieradevall, J., & Sanyé-Mengual, E. (2017). Application of life cycle thinking towards sustainable cities : A review. *Journal of Cleaner Production*, 166, 939–951. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.08.030
- Rosnay, J. d. (1975). *Le macroscopie : vers une vision globale*. Paris : Éditions du Seuil.
- Stephan, A., & Athanassiadis, A. (2017). Quantifying and mapping embodied environmental requirements of urban building stocks. *Building and Environment*, 114, 187–202. doi:10.1016/j.buildenv.2016.11.043
- Stephan, A., & Athanassiadis, A. (2018). Towards a more circular construction sector : Estimating and spatialising current and future non-structural material replacement flows to maintain urban building stocks. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 248–262. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.022
- Stephan, A., Crawford, R. H., Bunster, V., Warren-Myers, G., & Moosavi, S. (2022). Towards a multi-scale framework for modelling and improving the life cycle environmental performance of built stocks. *Journal of Industrial Ecology*. doi: 10.1111/jiec.13254
- Stephan, A., Crawford, R. H., & de Myttenaere, K. (2013). A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses. *Applied Energy*, 112, 23–34. doi:10.1016/j.apenergy.2013.05.076
- Su, S., Zhang, H., Zuo, J., Li, X., & Yuan, J. (2021). Assessment models and dynamic variables for dynamic life cycle assessment of buildings : a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(21), 26199–26214. doi:10.1007/s11356-021-13614-1
- Tanikawa, H., Fishman, T., Okuoka, K., & Sugimoto, K. (2015). The Weight of Society Over Time and Space : A Comprehensive Account of the Construction Material Stock of Japan, 1945–2010. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), 778–791. doi: 10.1111/jiec.12284
- Tanikawa, H., & Hashimoto, S. (2009). Urban stock over time : spatial material stock analysis using 4d-GIS. *Building Research & Information*, 37(5-6), 483–502. doi: 10.1080/09613210903169394
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., & Sanchez-Montañes, B. (2017). Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment : A literature review. *Energy and Buildings*, 135, 286–301. doi: 10.1016/j.enbuild.2016.11.042
- Walloth, C. (2016). *Emergent nested systems*. New York, NY : Springer Berlin Heidelberg
- Wiedmann, T. O., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J., & Kanemoto, K. (2015). The material footprint of nations. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 112(20), 6271–6276. doi: 10.1073/pnas.1220362110

Auteur-es

Caroline Bolle
Architecte, maître en
restauration du patrimoine,
chargée de cours LOCI et
maître de conférences invitée,
FIAL, UCLouvain

Corentin Haubruge
Ingénieur architecte,
doctorant et enseignant
LOCI+LAB, UCLouvain
Associé au bureau d'architecture
EDA-AU, photographe
d'architecture indépendant

Résumé. À l'occasion des 850 ans de la cathédrale Notre Dame de Tournai et des vingt ans de son inscription sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO, l'UCLouvain a rejoint la dynamique culturelle, insufflée par la Ville de Tournai et la Province de Hainaut, visant la mise à l'honneur de ce monument majeur de l'architecture belge. À travers diverses activités pédagogiques, LOCI-Tournai a élaboré des propositions de mise en valeur et de restauration/réaffectation du chœur gothique. L'objectif étant de stimuler l'imaginaire mais aussi la réflexion et les échanges en vue d'assurer un avenir au sanctuaire. S'appuyant sur le thème culturel de l'UCLouvain en 2020-2021, "l'imaginaire comme réponse", le projet a bénéficié d'un Fonds de Développement Culturel, s'achevant par deux expositions à LOCI-Tournai et à TAMAT.

Mots-clés. cathédrale de Tournai · restauration · patrimoine · chœur gothique · atmosphère

Abstract. On the occasion of the 850th anniversary of Tournai Cathedral and the 20th anniversary of its inscription on the UNESCO World Heritage List, UCLouvain-LOCI joined the City of Tournai and the Province of Hainaut in honouring this major monument of Belgian architecture. Through various educational activities, LOCI-Tournai developed proposals for the enhancement and restoration/reassignment of the Gothic choir. The objective is to stimulate the imagination but also to stimulate debate to ensure a future for the sanctuary. The project, based on UCLouvain's cultural theme for 2020-2021, "the imaginary as a response", benefited from a Cultural Development Fund, and was the subject of exhibitions at LOCI-Tournai and TAMAT.

Keywords. Tournai cathedral · restoration · heritage · gothic choir · atmosphere

Introduction

À l'occasion des 850 ans de la cathédrale Notre Dame de Tournai et des vingt ans de son inscription sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO (2020-2021), l'UCLouvain-LOCI a souhaité rejoindre la dynamique culturelle, insufflée par la Ville de Tournai et la Province de Hainaut, visant la mise à l'honneur de ce monument majeur de l'architecture belge. En l'honneur de ce double anniversaire un projet pédagogique et culturel a été mené, en 2020-2021, sous l'impulsion de Béatrice Renard, par Caroline Bolle, Corentin Haubruge, Agnès Mory et Barbara Noirhomme à LOCI-Tournai.

LOCI-Tournai a souhaité travailler sur des propositions de mise en valeur et de restauration/réaffectation du chœur gothique car, contrairement aux parties romanes récemment restaurées, celui-ci est en piteux état et en projet d'être désacralisé. Ainsi, dans une réflexion de propositions nouvelles pour sa réaffectation et son aménagement architectural, plusieurs activités pédagogiques ont croisé leurs approches.

Au premier quadrimestre de Bac3 (Q5), les cours de Patrimoine (Caroline Bolle) et de Moyens d'expression et de représentation (Barbara Noirhomme, Corentin Haubruge) ont travaillé ensemble autour de ces enjeux. Le premier a mis l'accent sur le projet de réaffectation du chœur, tandis que le second s'est intéressé à la colorimétrie de l'état actuel et futur de l'intérieur de la cathédrale.

Au second quadrimestre de Bac2 (Q4), l'équipe enseignante (Agnès Mory, Jan Godijns, Marie Vander Meulen, Daniel Otero Pena, Nawri Khamallah) s'est focalisée sur la narration graphique, via le médium de la bande dessinée, de l'Histoire et des histoires de la cathédrale. Ceci grâce à la visite guidée haute en couleur de Laurent Delehouzée (archéologue du bâti à l'Agence wallonne du Patrimoine).

L'objectif de ces enseignements était de stimuler l'imaginaire mais aussi la réflexion et les échanges en vue d'assurer un avenir au sanctuaire. S'appuyant sur le thème culturel de l'UCLouvain en 2020-2021, "Le pouvoir du récit. L'imaginaire

comme réponse", le projet a bénéficié d'un Fonds de Développement Culturel (FDC) de la part de l'UCLouvain. Celui-ci a permis d'inviter des partenaires académiques et professionnels à enrichir les débats mais aussi à mettre en valeur et à promouvoir la diffusion des travaux et recherches. Ce projet a, entre autres, bénéficié des interventions de Laurent Delehouzée (AWaP), Aurélie Hachez (bureau d'architecture AHA), Cécile Vandenoot (LOCI) et Isabelle Lecocq (IRPA) et il a été mené en étroite collaboration avec les professeurs de Patrimoine de LOCI-Bruxelles (Jean-Louis Vanden Eynde et David Vandenbroucke) et de la Faculté polytechnique de l'UMons (Laurent Debailleux et Stéphane Posty).

Le FDC a également permis de mettre en place, à Tournai, deux expositions — l'une à LOCI et l'autre au Musée de la Tapisserie et des Arts Textiles (TAMAT) —, ainsi qu'une conférence publique autour de cette dynamique facultaire et culturelle.

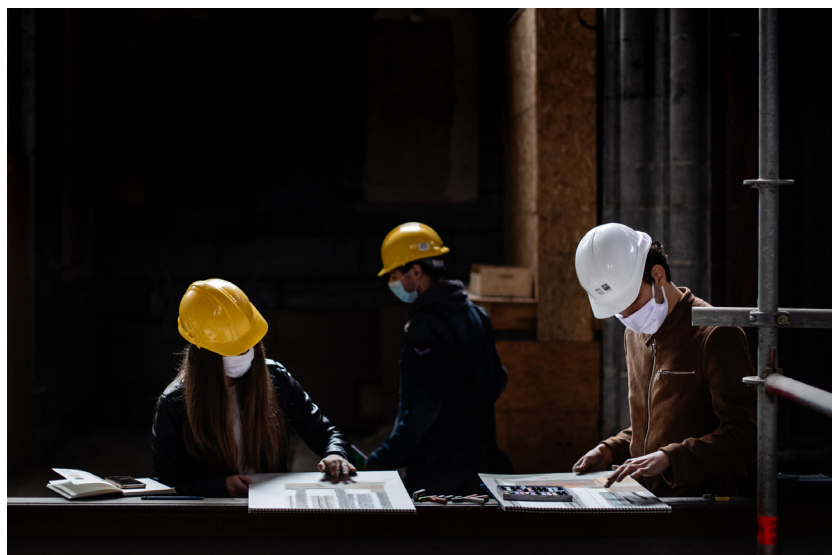
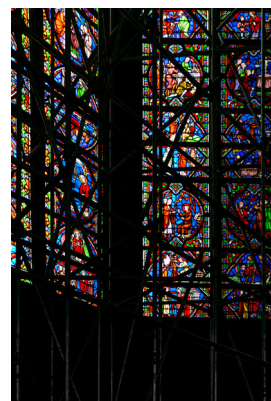
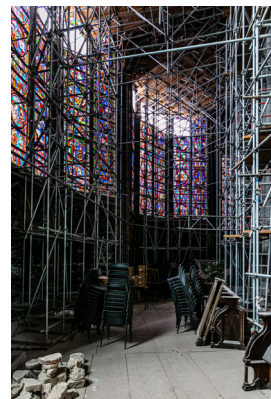
Projet pédagogique en Patrimoine

Stimuler le regard et la réflexion sur le devenir des biens patrimoniaux, décoder la complexité d'un édifice, appréhender des méthodes d'investigation et de restauration, mais aussi découvrir les richesses d'une approche interdisciplinaire constituent les objectifs principaux du cours Patrimoine : restauration et réaffectation, enseigné à Tournai ; et tout naturellement, la cathédrale y occupe une place privilégiée. Chaque année, Laurent Delehouzée présente un exposé et guide les étudiant-es au cœur de l'édifice, notamment dans des zones

fermées au public (avec le soutien de la Province de Hainaut, propriétaire des lieux). L'archéologue livre ainsi le fruit de vingt années de recherches, attise le regard, apprend à analyser et à *apprivoiser* ce mastodonte. Il propose aussi des stages sur terrain.

Jusqu'en 2019 — date de fin des travaux de restauration des parties romanes — les étudiant-es ont également eu la chance de visiter régulièrement le chantier et d'être guidé-es par Ghislain Claerbout (ingénieur et administrateur de l'entreprise Monument Hainaut) et Jean-Christophe Scaillet (expert technique au sein de l'AWaP). Les étudiant-es ont notamment pu observer et toucher, à plus de 40 m de hauteur, les tours et les charpentes romanes mises à nu, découvrir les techniques de restauration et échanger avec les artisan-es. Les données engrangées lors de ces visites ont alimenté les cours théoriques.

Le double anniversaire de *Notre Dame* et l'éclairage médiatique dont elle a bénéficié étaient l'occasion d'alerter les étudiant-es et le grand public de l'urgence de traiter les parties gothiques. En effet, le chœur, inoccupé, sans fonction et interdit au public en raison de carences structurelles, se détériore et est menacé. Il est urgent d'y entreprendre des travaux de stabilisation et de restauration et, en amont, de stimuler le processus de réflexion et de prise en charge de ce patrimoine exceptionnel. Nous avons donc invité les étudiant-es à réfléchir, en équipes, au devenir du sanctuaire et à proposer des projets de mise en valeur, de restauration et éventuellement de réaffectation.



① Les étudiant-es au travail dans la cathédrale (pages 29-30).



Finalement, treize projets ont été avancés ; tous envisageaient d'y accueillir une ou plusieurs nouvelles fonctions, telles qu'une bibliothèque, une halle aux artisans et artisanes, des espaces d'expositions, de conférences, de concerts, de méditation-lecture-sophrologie... Une étroite collaboration avec les étudiant-es ingénier-es de l'UMons, encadré-es par leurs professeurs de stabilité et de patrimoine (L. Debailleux et S. Posty), a permis de vérifier et de magnifier les propositions architecturales. Les futur-es ingénier-es ont en effet étudié le comportement statique du sanctuaire, analysé les divers projets et en ont sélectionné cinq auxquels ils ont apporté des réponses structurelles détaillées et particulièrement audacieuses.

Les évaluations des travaux, réalisées collégalement à divers stades de l'évo-

lution des projets (avec les professeur-es de LOCI-Bruxelles, de l'UMons et l'archéologue de l'AWaP), ont également été l'occasion de riches échanges, démontrant l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire, interfacultaire et inter-universitaire.

Projet pédagogique en *Moyens d'expression et de représentation*

La perception de l'architecture sacrée se caractérise notamment par ses aspects synesthésique (implication des sens de la vue, de l'odorat, de l'ouïe et du toucher) et kinesthésique (implication du mouvement du corps). Au-delà de ces deux aspects, l'architecture sacrée résonne particulièrement avec une qua-



②

trième dimension, temporelle, incarnée par la dynamique de la lumière naturelle. Dans la cathédrale de Tournai, ce passage de la lumière physique à une lumière métaphysique divine est activé par les vitraux et les matériaux utilisés, qu'il s'agisse d'éléments d'architecture ou d'ornements. La représentation de ces multiples réalités, concrètes et perçues, est un enjeu culturel, théologique et artistique ancien, comme en témoignent les nombreuses œuvres d'art qui dépeignent l'atmosphère intérieure des églises ou des cathédrales, une catégorie à part entière de la peinture de genre. Aujourd'hui, les architectes héritent de cette culture et de ce questionnement : comment représenter l'espace sacré ? Ce questionnement était au centre des activités du cours de Moyens d'expression et de représentation en 2020-2021 à LOCI-Tournai pour les étudiant-es de deuxième et troisième année.

Les étudiant-es de deuxième année ont élaboré un récit, imaginé à partir des éléments constitutifs de la cathédrale, se traduisant par une planche de bande dessinée au format A1. La démarche croise différents enjeux : le lien entre narration et image, l'adéquation de

l'ambiance du récit avec la gamme de couleurs, la lumière, les cadrages, mais aussi la relation entre la narration et la composition de la planche.

Les étudiant-es de troisième année se sont intéressé-es à l'atmosphère générale de la cathédrale, à travers la perception des parties romanes (la nef et le transept) et gothiques (le chœur). Au moyen de différents médias graphiques, ils ont imaginé de nouvelles visions de la prise en charge des éléments d'architecture et des vitraux, développant un projet qui équilibre les logiques romane et gothique, dans une gradation du plus sombre au plus clair, du profane au sacré. Composé de quatre étudiant-es, chaque groupe a développé un projet se déclinant selon quatre vues, du *lointain* au *proche*. Différentes techniques se mêlent : dessin au pastel, synthèses colorées, photographie de modèles réduits de vitraux, plans et coupe de représentation du projet... Au final, des collages sont réalisés à partir des photographies en noir et blanc issues des archives de l'Institut royal du Patrimoine artistique (IRPA), opérant la synthèse entre lumière, couleur et matérialité.



③

- ② Comparaison de la nef romane et du chœur gothique.
- ③ L'affiche de l'exposition à TAMAT.



4

La présentation des projets et les évènements culturels

Concrétisant le projet financé par le FDC (Fonds de Développement Culturel) de l'UCLouvain, une sélection de projets d'étudiant-es a eu la chance de trouver place dans deux expositions.

Du 11 septembre au 28 novembre 2021, l'exposition "Habiller le culte" s'est installée au Musée de la Tapisserie et des Arts Textiles (TAMAT), mettant à l'honneur les fastes du textile liturgique de la cathédrale de Tournai. Une réflexion sur les caractéristiques architecturales de l'espace sacré s'est matérialisée par l'affichage de plusieurs séries de dessins d'étudiant-es du cours de Moyens d'expression et de représentation. L'accent étant mis sur le travail de la lumière et de la matière dans l'espace du chœur, qui, bien que *désacralisé*, conserve nombre d'attributs fastueux, ornementaux et symboliques.

Du 22 octobre au 2 décembre 2021, l'exposition "Cathédrale de Tournai : imaginer et représenter l'espace d'hier et de demain" a pris place dans le forum de LOCI-Tournai.



UCLouvain
Faculté d'architecture, d'ingénierie
architecturale, d'urbanisme - Loci

5

- ④ L'exposition dans le forum de LOCI-Tournai
- ⑤ L'affiche de l'exposition et de la conférence à LOCI-Tournai

Une scénographie y mêlait des travaux du cours de Patrimoine et des cours de Moyens d'expression et de représentation. Des dessins originaux, des posters de présentation et une longue frise de photocollages au grand format ont animé l'école, quelques semaines durant.

Le 21 octobre 2021, cette exposition a été inaugurée par la conférence publique de Laurent Delehouzée, et suivie d'un vernissage, marquant le point d'orgue de ce projet multidisciplinaire, pédagogique, culturel et artistique.

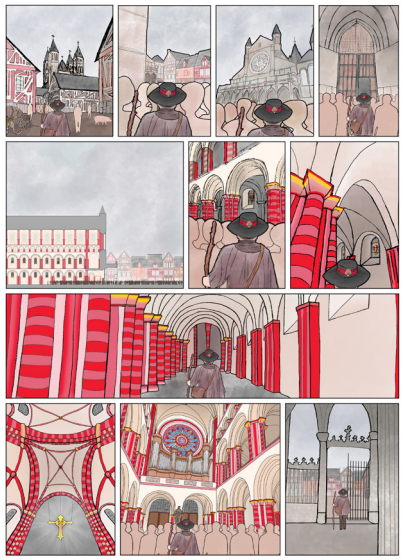
Perspectives & conclusion

Ancrées dans l'actualité du double anniversaire de la cathédrale de Tournai, ces démarches pédagogiques et culturelles ont trouvé des concrétisations tangibles en partie grâce au FDC de l'UCLouvain. Il convient de souligner cette aide concrète (moyens, communication, support), plus encore dans ce contexte de crise qui n'aura pas épargné les initiatives culturelles au sens large. De par sa nature créative, innovante et interdisciplinaire, ce projet pose les jalons d'une dynamique qui, nous l'espérons, entraînera de nouveaux développements propres aux questionnements contemporains en architecture, patrimoine, art et ingénierie de la Faculté LOCI de l'UCLouvain.

Enfin, espérons que les travaux de valorisation et de restauration du chœur ne tardent plus, afin d'assurer à Notre Dame pérennité et qu'elle puisse continuer à être un fertile terreau de recherches, un support d'enseignement et de belles synergies. ■



Victoria Bayay



Martin Chedel



Quentin Bruyère



Ophélie Lemaréchal

- ⑥ Travaux d'étudiant·es Bac2, Moyens d'expression et de représentation, de gauche à droite et de haut en bas : Quentin Bruyère, Victoria Bayay, Martin Chedel, Ophélie Lemaréchal.



⑦ Travaux d'étudiant-es Bac 3,
Moyens d'expression et de
représentation.
Paul Costenoble, Fiacre
Iradkunda, Grigory
Debellemannière, Michael Shao
(travail collectif).

photo de couverture
Louise Blondel, Bologne, janvier 2022.

lieuxdits #21

Juin 2022

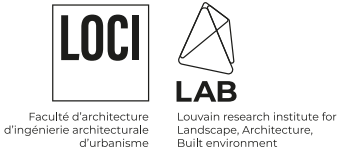
Des leviers <i>Brigitte de Terwangne</i>	1
Tissus urbains hétérogènes <i>Barbara Le Fort</i>	2
Masquer le masque <i>Bernard Wittevrongel</i>	6
Du standard passif à l’architecture météorologique <i>Martin Outers</i>	12
Digital models for life-cycle assessment and material-flow analysis of urban built stocks <i>André Stephan</i>	20
Cathédrale de Tournai <i>Caroline Bolle, Corentin Haubruge</i>	26

SEMESTRIEL

ISSN 2294-9046
e-ISSN 2565-6996



Éditeur responsable : Le comité éditorial, place du Levant, 1 - 1348 Louvain-la-Neuve (lieuxdits@uclouvain.be)
Comité éditorial : Damien Claeys, Gauthier Coton, Brigitte de Terwangne, Corentin Haubruge, Nicolas Lorent,
Catherine Massart, Giulia Scialpi, Dorothée Stiernon
Conception graphique : Nicolas Lorent
Impression : CPRINTi



www.uclouvain.be/loci
www.uclouvain.be/lab