

Revue bibliographique menée par analyse de texte : application aux transferts de chaleur et d'humidité dans une paroi poreuse biosourcée

Yann Billaud, Florian Moreau, Xavier Milhet, Didier Saury

Institut Pprime UPR CNRS 3346 - CNRS / ENSMA / Univ. Poitiers

1 avenue Clément Ader, B.P. 40109, F-86961, Futuroscope Chasseneuil CEDEX, FRANCE

* (auteur correspondant : yann.billaud@ensma.fr)

Résumé - Après une introduction sur les enjeux liés à la performance énergétique des bâtiments, la notion d'énergie grise est discutée pour mettre en perspective la réglementation actuelle et déplorer la non prise en compte de la durée de vie des éléments de paroi. Un bref aperçu de l'évolution des techniques constructives couplée à des données relatives aux habitations principales issues du recensement permet d'identifier à la fois la proportion et la nature du bâti ancien dans le parc actuel. Les spécificités des matériaux constituant les maisons anciennes sont ensuite discutées, de même que leurs incompatibilités avec les techniques et matériaux d'isolation actuels, plus particulièrement vis-à-vis des transferts d'humidité dans les parois indispensables à la pérennité des ouvrages. Après un aperçu de l'ensemble des dispositifs mis en place pour limiter la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, des études mettant en doute l'efficacité de la politique de rénovation énergétique des 30 dernières années sont discutées. Ces études s'accordent sur l'importance de la prise en compte de l'énergie grise pour établir une stratégie efficace afin de relever le défi des enjeux énergétiques et climatiques, et de fait, l'importance de la durée de vie des bâtiments. Cette partie introductive se termine en mettant en avant l'intérêt porté aux parois biosourcées et plus particulièrement celles à base de chaux-chanvre. La partie suivante discute des performances thermiques imposées par la réglementation environnementale en évoquant les critères qui ne sont pas pris en compte. Cette réflexion soulève la nécessité d'effectuer une étude bibliographique approfondie dans le but d'identifier l'ensemble des éléments à prendre en compte pour être capable de juger de la pertinence de cette technique constructive, notamment pour une application à grande échelle. Pour cela une méthodologie de recherche bibliographique est proposée. Celle-ci repose sur l'utilisation d'outils de fouille de texte et de données appliqués sur des corpus d'articles téléchargés depuis une base de données. Les résultats sont analysés et commentés pour servir de base à l'élaboration d'un projet de recherche.

Mots clés - conduction thermique, thermique du bâtiment, Réglementation Environnemental, matériaux anisotropes, transferts couplés de chaleur et de masse, étude bibliographique, analyse de texte automatique

1. Introduction

L'amélioration des performances énergétiques et de l'isolation des bâtiments est un défi majeur dans la lutte contre le réchauffement climatique et la préservation des ressources naturelles. Environ la moitié de la consommation énergétique mondiale annuelle est dédiée à la construction, l'exploitation et l'entretien des bâtiments [1]. Selon la Commission Européenne, les bâtiments dans l'UE sont responsables de 40% de notre consommation d'énergie et de 36% des émissions de gaz à effet de serre [2]. En France, le secteur du bâtiment représente à lui seul près de la moitié de la consommation totale d'énergie [3].

1.1. Les deux aspects de la performance énergétique

La consommation énergétique totale a deux composantes : l'énergie grise et l'énergie d'usage. Cette dernière peut être estimée à partir de mesures de la consommation, de calculs empiriques ou encore de simulations numériques. Quantifier l'énergie grise est plus complexe et fastidieux. Son estimation repose sur l'analyse du cycle de vie (ACV) de l'ensemble des éléments qui constitue le bâti en faisant l'inventaire des flux physiques entrants et sortants. En France, la Réglementation Environnementale 2020 (RE2020) exige la réalisation d'une ACV lors de la demande d'un permis de construire. La collecte et l'interprétation des informations relatives aux flux est critique car elles conditionnent de manière importante l'estimation de l'impact potentiel d'un projet sur l'environnement [1]. La complexité croissante des chaînes d'approvisionnement, des mécanismes et des phénomènes mis en jeu et leurs interactions sont des sources d'incertitude sur la valeur réelle de ces impacts. De ce fait, les interprétations actuelles de l'énergie grise sont variables d'une méthode à l'autre et les valeurs déclarées varient de manière significative d'une base de données à l'autre. De nombreux auteurs observent que les normes ACV actuelles ne fournissent pas d'orientations complètes et n'abordent pas certaines questions importantes [4]. L'ACV, bien qu'étant un outil imparfait, permet cependant de se faire une idée du rapport entre l'énergie grise et l'énergie d'usage d'un bâtiment.

1.2. Etat du bâti en France

A ce jour (1er janvier 2024) selon l'INSEE, il y a 37,8 millions de logements principaux en France. Une base de données obtenues en appariant les données relatives au logement issues du recensement avec une version corrigée de la base des Diagnostics de Performance Energétique (DPE) [5] est utilisée pour tracer la distribution en score du DPE des habitations par périodes de construction (Figure 1).

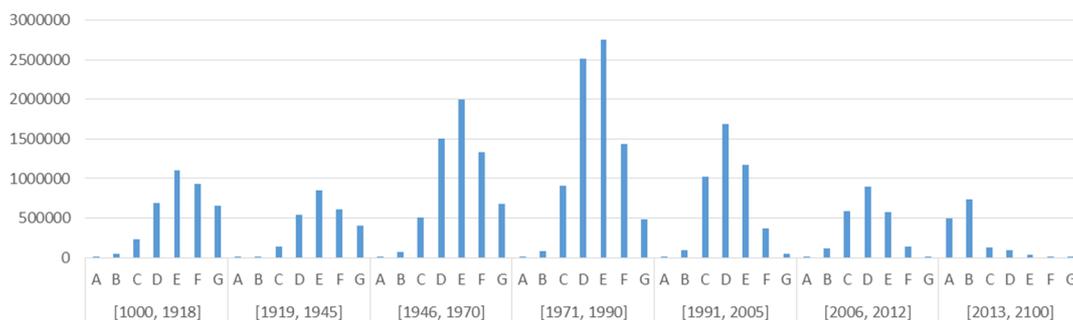


Figure 1 – Histogramme des scores DPE d'habitations principales en France par période de construction.

Il est difficile de connaître exactement l'état du parc immobilier Français. Cependant, l'analyse de l'évolution de l'urbanisme et de l'architecture permet de se faire une idée des matériaux et des techniques misent en œuvre. On peut ainsi identifier une période pré et post parpaing marquant la transition vers une standardisation de la construction. Bien que cette transition dans le temps entre l'utilisation de matériaux bruts et manufacturés soit diffuse, les historiens et professionnels du bâtiment considèrent l'année 1948 comme charnière, les maisons construites avant cette date étant identifiées comme des « maisons anciennes ». La Figure 1 permet de constater que les habitations construites avant 1945 représentent 21,8% du parc et que parmi elles, 20,2% ont un score DPE inférieur ou égal à D. Il est difficile de connaître la nature exacte des constructions dans cette période (1000-1945) mais on peut supposer que la grande majorité de celles-ci sont en pierre, brique de terre cuite, terre crue ou à colombages (remplis de paille-argile, de rebus de tuiles ou de briques).

1.3. Cas des maisons anciennes

Beaucoup de maisons anciennes ont été entretenues ou rénovées avec les matériaux utilisés pour la construction des nouvelles habitations. Par exemple, cette période a vu les enduits à base de ciment, dont l'énergie grise est estimée à $1100 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$, remplacer les enduits historiques à la chaux ($450 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$) ou en terre ($30 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3}$). Or, les murs constituant les maisons anciennes, dont les fondations sont dépourvues de rupteur de remontées capillaires, doivent être en mesure d'évacuer l'humidité par évaporation. Les murs de ces maisons étaient protégés par des enduits qui assuraient à la fois l'étanchéité au vent et à la pluie tout en permettant les transferts d'humidité et son évaporation aux interfaces. La perspiration est une capacité que l'on retrouve dans la plupart des matériaux naturels, notamment dans les enduits historiques, initialement à base de terre puis agrémentés de chaux par la suite. En plus de pallier aux remontées capillaires, cette capacité était mise à profit pour évacuer la vapeur d'eau générée par les occupants, qui correspond à environ $2,5 \text{ L}$ d'eau par jour et par personne.

1.4. Politiques de rénovation énergétique

De nombreux dispositifs financiers ont été mis en place par l'État pour accompagner la rénovation énergétique du parc français. En plus de la complexité administrative de ces dispositifs d'incitation et des dérives observées, certaines études dont [6] réalisée sur plus de 50 000 ménages de 2005 à 2017, met en doute l'efficacité des solutions isolantes actuelles. Les auteurs montrent que l'isolation des murs de ces logements n'a entraîné qu'une baisse moyenne de 7% de la consommation de gaz la première année, 2,7% la deuxième année et que les économies d'énergie deviennent négligeables dès la quatrième année. L'isolation des combles a, quant à elle, été deux fois moins efficace que celle des murs dont les effets disparaissent au bout de 2 ans.

La performance énergétique n'est pas l'unique enjeu. Quelques études cherchent à établir un lien entre l'énergie grise et l'énergie d'usage associées aux matériaux de construction. Ces études prennent rarement en compte la durée de ces éléments et excluent quasi systématiquement les matériaux traditionnels (pierre, terre-paille, pisée) [7]. A plus grande échelle, la relation entre l'énergie grise et l'énergie d'usage dans le secteur résidentiel néerlandais a été étudiée [8]. Cette étude montre que l'énergie grise représente 10 à 12% de la consommation totale d'énergie dans les maisons standards, tandis qu'elle représente 36 à 46% dans les maisons économes en énergie. D'autres études, dont une menée sur un bâtiment témoin [9], discutent de la pertinence de l'investissement supplémentaire en énergie grise dans l'isolation des bâtiments à énergie zéro, qui peut devenir important et ne pas être récupérée, ou amortie, au cours de la vie du bâtiment.

Ces études soulignent l'importance d'inclure la consommation d'énergie grise, et de fait la durée de vie des matériaux, dans toute démarche de conception et de rénovation des bâtiments. Compte tenu de l'obsolescence de plus en plus précoce des nouvelles constructions, il paraît essentiel d'entretenir les constructions anciennes, qui ont fourni la preuve de leur résistance au passage du temps et aux variations des conditions environnementales et dont l'énergie grise est déjà amortie, en adaptant la législation à leurs spécificités.

2. Etudes bibliographiques des travaux menés sur le chaux-chanvre

Les parties précédentes ont permis de définir le thème de l'étude. Il s'agit maintenant d'identifier la problématique. Pour cela il convient de faire l'inventaire des connaissances sur la conception, la mise en œuvre, le comportement thermique, hygrométrique, mécanique, et enfin la durée de vie du chaux-chanvre. Ce travail de recherche bibliographique, mené en parallèle sur plusieurs domaines, est difficile, chronophage et peu valorisant. Ainsi, deux stratégies de recherche bibliographique vont être appliquées, dont les résultats seront commentés et comparés.

2.1. Etude bibliographique classique

Une étude bibliographique classique a été réalisée, dont la première étape a consisté à définir les mots-clés appropriés aux différents mécanismes et concepts définissant le sujet. Au-delà des premiers mots-clés qui viennent à l'esprit, des synonymes, des termes plus génériques ou au contraire plus spécifiques, ont été identifiés. La majorité des articles disponibles étant en anglais, il faut comprendre les termes et les éventuelles associations. Par exemple l'association des termes « lime » (chaux) et « hemp » (chanvre) sont équivalents au terme « hempcrete », signifiant textuellement béton de chanvre. Au fur et à mesure des lectures, la connaissance du sujet évolue conditionnant ainsi les requêtes, si bien que ce travail de revue s'apparente à un processus itératif. Il s'agit donc de se faire à la fois une idée générale du sujet tout en se focalisant sur un ou quelques aspects, sans pour autant négliger des éléments qui pourraient être pertinents. De citations en citations, un grand nombre d'articles a été collecté. La dématérialisation de la connaissance permet en effet d'accéder à une quantité quasi infinie d'informations. A ce titre, il existe maintenant des outils permettant de traiter l'information de manière automatisée.

2.2. Etude bibliographique 3.0

Il existe un certain nombre de bases de données ou de portails numériques permettant aux chercheurs d'accéder à une grande quantité de documents [10]. Certains sont en accès libre comme Google Scholar, PubMed, Mendeley ou encore ArXiv, d'autres payants comme Scopus ou Web of Science, d'autres encore pirates comme Sci-hub. Pour les chercheurs en France, il existe des portails d'information scientifique multidisciplinaire négociés et financés par le CNRS et mis à disposition des chercheurs. Parmi elles BibCnrs, Scopus (!) ou encore Istex. Cette dernière, avec plus de 27 millions de publications scientifiques, a été choisie pour sa compatibilité technique et juridique avec la fouille et l'analyse de texte. Cette base, alimentée par les articles provenant d'éditeurs tels que Elsevier, Wiley ou encore Springer, est depuis 2022 officiellement un projet d'infrastructure de recherche inscrit dans la feuille de route de la stratégie nationale des infrastructures de recherche [11]. A partir de cette base, des corpus d'articles ont été téléchargés puis importés vers l'outil en ligne Cortext Manager [12] qui, après traitement à l'aide d'outils d'analyse lexicale, permet l'affichage des données dans une interface dédiée.

L'objectif est de chercher à comprendre les mécanismes physico-chimiques à l'œuvre dans le chaux-chanvre en tant qu'élément de paroi dans un bâtiment ancien. Les aspects liés à l'énergie grise, à son déploiement à l'échelle nationale, la disponibilité des ressources, au vieillissement, à la tenue mécanique, aux impacts environnementaux et à sa mise en œuvre sont également à prendre en compte, ce qui élargie le champ de recherche aux thématiques telles que la physique, la chimie, les sciences environnementales et sociales, au génie civil, à l'agronomie mais aussi à l'urbanisme. Il ne faut donc pas être trop restrictif dans le choix des mots clés et se laisser interpellé par des documents en dehors de son champ de compétence, voir insolites, pour ne pas passer sous silence un aspect important du problème. Il faut être systématique, sans cependant brimer sa curiosité généralement source de créativité.

2.2.1. Constitution de corpus d'articles

Afin de se faire une idée à la fois globale et plus spécifique, 2 corpus distincts ont été constitués. Une recherche avec les mots clés $A = ((\text{« lime » AND « hemp »}) \text{ OR « hempcrete » OR « hemp concrete »}) \text{ AND thermal AND moisture}$ renvoie 326 articles. Ce corpus *A* sera qualifié d'« expert » car il intègre des articles auxquels s'intéressent spécifiquement les auteurs, à savoir les phénomènes couplés de transferts de chaleur et de masse dans les matériaux de construction. Une recherche plus globale, avec uniquement les mots clés $B = (\text{« lime » AND « hemp »})$ renvoie 4985 articles. Ces articles sont intégralement téléchargés pour constituer un corpus massif de textes couvrant de manière vaste le sujet qui va être étudié au moyen de diverses outils d'analyse de texte. Le corpus *B* sera qualifié de « général ».

Ces corpus vont être traités de différentes manières, selon le but recherché, pour procéder à des analyses « TDM » (i.e. Text and Data Mining, autrement dit fouille de texte et de données). La première étape consiste à importer les corpus (au format « Istex » ou « texte brut ») via l'application en ligne CoreText, puis de créer la base de données avec le script « *data parsing* ». Vient ensuite la phase d'extraction des termes, script « *terms extraction* », qui va analyser l'intégralité des champs (titres, auteurs, abstract, mots clés, texte) et associer certains termes entre eux. Le script renvoie une liste de termes qui seront indexés en appliquant le script « *corpus terms indexer* ».

Une analyse bibliométrique simple est réalisée sur le corpus « expert » A. Bien qu'en apparence ciblé ($A=effets\ thermique\ et\ hydrique\ dans\ le\ chaux\ chanvre$), les domaines impliqués étaient déjà variés, allant de la chimie à la géothermie en passant par l'industrie du textile. L'analyse bibliométrique, réalisée sur les 326 articles de ce corpus, a permis d'observer une évolution de l'attrait du sujet, avec des périodes particulièrement prolifiques (1890 par la communauté des chimistes) et 1960 (principalement en mécanique des milieux continus). A partir des années 2000, ce sont des revues en lien avec l'environnement et l'énergie comme *Construction and Building Materials*, *Energy & Buildings* et *Fuel and Energy* qui éditent le plus d'articles sur le sujet.

2.2.2. Analyse bibliométrique avancée

Un corpus d'articles plus général ($B=chaux\ et\ chanvre$) est maintenant analysé. Compte tenu de la taille conséquente du corpus B (4985 articles), une analyse des cooccurrences de mots-clés est réalisée afin d'identifier les thématiques les plus abordées. Cette analyse est basée sur les termes extraits des fichiers textes bruts nettoyés (*Cleaned*) fournis par Istex qui contiennent uniquement le texte du corps du document.

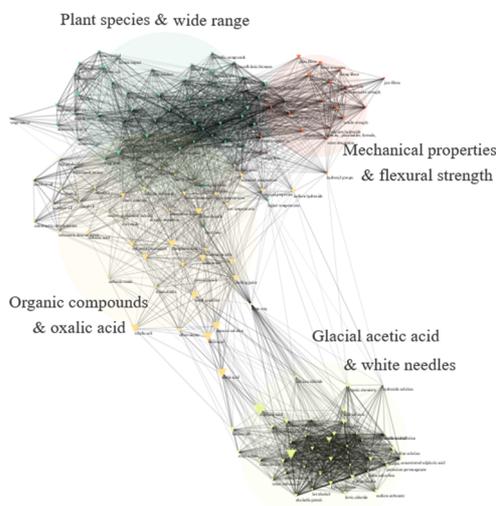


Figure 2 – Réseau constitué par les relations entre les mots clés du corpus B.

Plant species & wide range	Mechanical prop. & flexural strength	Glacial acetic acid & white needles	Organic compounds & oxalic acid
56	29	43	42
Wide range Plant species Large amount Raw materials Land use Fossil fuels Environmental impacts Moisture content Soil erosion Climate change	Mechanical properties Flexural strength Tensile strength Compressive Strength Natural fibres Thermal conductivity Building materials Bulk density Size distribution Water absorption	Glacial acetic acid White needles Alcoholic solution Acid yields Ordinary temperature Boiling water Ethereal solution Concentrated hydrochloric acid Absolute alcohol Sealed tubes	Organic compounds Oxalic acid Ammonium salts Phosphoric acid Sodium salt Potassium salt Melting point Volumetric estimation Vitamin b Carbon dioxide Cod-liver oil

Tableau 1 - Composition des quatre groupes thématiques décrits par les 10 mots clés ayant la plus grande fréquence d'occurrence.

Après la phase de création de la base (*data parsing*), l'extraction de termes (*Terms extraction*) se fait ici sur la base de la relation sémantique de chaque terme avec le reste du vocabulaire. Les verbes, adjectifs et mots-clés géographiques sont exclus, et les formes singulier/pluriel sont harmonisées. Les 200 termes

les plus connectés sont examinés et nettoyés manuellement pour n'en conserver que 162 qui sont utilisés pour indexer le corpus (*corpus terms indexer*). Finalement, l'analyse des cooccurrences est réalisée avec le script « *Network mapping* ». Ce script nécessite de configurer un nombre important de paramètres, notamment l'algorithme de mesure de proximité qui doit être adapté au type de réseau. Après plusieurs essais, il s'avère que l'algorithme « *Distributional* » est le plus adapté au présent cas d'étude. Pour la détection de « *clusters* », ici au sens thématique, l'algorithme « *Louvain resolution* » est préconisé pour sa stabilité. Enfin, le nombre de liens maximal est limité aux 25 connections les plus importantes, assorti d'un seuil de proximité de niveau intermédiaire (0,3). A partir de ces réglages, l'analyse de cooccurrences, réalisée sur les mots-clés apparaissant au moins 3 fois dans l'ensemble des articles du corpus, a permis de construire un réseau constitué de 162 nœuds et de 3956 connections faisant apparaître 4 clusters représentés sur la *Figure 2*.

Le modèle ainsi paramétré a permis d'identifier quatre groupes thématiques intitulés de manière automatique « *Plant species & wide range* », « *Mechanical properties & flexural strength* », « *Glacial acetic acid & white needles* » et « *Organic compounds & oxalic acid* ». L'analyse de la carte (*Figure 2*) et des données associées permet d'étudier les mots-clés qui contribuent à ces différents groupes thématiques et leur importance, en termes de nombre d'occurrences, et ainsi de caractériser le contenu des groupes thématiques (*Tableau 1*).

2.3. Comparaison des approches de recherche bibliographique

L'analyse des cooccurrences d'expressions a ses limites mais elle permet d'améliorer grandement l'appréhension d'un ensemble d'articles portant sur un sujet. Elle ne permet pas d'avoir une vision précise du contenu des articles mais de dégager une structure qui hiérarchise les questions scientifiques abordées. Le découpage de notre corpus de 4985 articles en quatre groupes thématiques a permis de segmenter les données et d'obtenir des ensembles d'articles cohérents et de tailles plus modestes. Afin de mesurer la pertinence de la grille de lecture produite, cette analyse est croisée avec une analyse qualitative, réalisée ici sur une sélection d'articles au sein du groupe thématique « *Mechanical properties & flexural strength* ». Celle-ci a permis de vérifier la cohérence du regroupement thématique généré, ainsi que le type de méthodologie développée dans les articles.

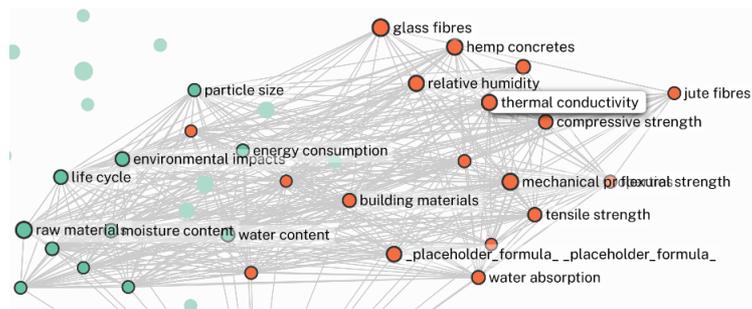


Figure 3 – Ensemble des 24 termes connectés avec le mot clé « thermal conductivity » pouvant résumer le sujet des travaux menés sur les propriétés thermiques du chanvre.

Dans le même groupe thématique, cette phase d'analyse qualitative a permis d'identifier un certain nombre de sous-thèmes et d'appréhender les différentes questions de recherche. Notamment, les termes connectés avec le nœud « *thermal conductivity* » (*Figure 3*) permettent de se faire une certaine idée des enjeux et orientations des différents travaux. Ainsi, certains auteurs du corpus ont étudié l'influence de la « *conductivité thermique* » sur la « *consommation d'énergie* », d'autres ont observé l'influence de « *l'humidité* » ou de la « *taille des particules* » de chanvre sur la « *conductivité thermique* ». On notera que certains nœuds appartiennent à des clusters différents, comme par exemple « *environmental*

impacts » (Plant species & wide range) ou encore « physical properties » (Organic compounds & oxalic acid).

La comparaison entre la connectivité du terme «thermal conductivity », les notes issues de la lecture des articles du cluster « Mechanical properties & flexural strength » et de l'étude bibliographique « classique », montre une certaine cohérence. Ainsi, la Figure 3 donne, en première approche, une assez bonne idée des sous-thèmes et des enjeux liés aux propriétés thermiques du chaux-chanvre dans le bâtiment à savoir, i) l'importance de l'étude du comportement hygrothermique d'une paroi en béton de chanvre étant donné les variations importantes d'humidité relative et de température observées dans le matériau, ii) l'importance de l'état de surface, par le biais de l'enduit, sur les transferts hydriques, iii) la pertinence relative des modèles de prédiction des champs de température et d'humidité et enfin iv) le besoin de prendre en compte de façon plus approfondie la dynamique des transferts nécessitant de mieux comprendre les phénomènes d'absorption/désorption et l'influence de la température.

3. Conclusion

Selon l'ADEME [3], l'ensemble des scénarios de transition énergétique place la rénovation du parc parmi les leviers d'action prioritaires. Parmi les choix à faire, celui de l'arbitrage entre le niveau de performance thermique des bâtiments et son énergie grise devrait donner lieu à des débats dans la mesure où les conséquences économiques et environnementales sont décisives à de nombreux égards. De nombreux travaux mettent en avant le besoin d'améliorer la précision et la pertinence de l'évaluation de l'énergie grise, de prendre en compte la durée de vie des matériaux mais aussi leur compatibilité avec certain bâtiment, contestant de fait l'efficacité des techniques modernes pour isoler ceux-ci. Pour apporter des éléments de réponse, une revue bibliographique est menée sur un corpus constitué d'articles de divers domaines. La base de données construite a été analysée au moyen de Cortext Manager.

L'étude bibliographique menée visait à analyser un corpus conséquent de publications, constitué de 4985 articles publiés entre 1850 et 2023 relatifs aux mots clés « chaux » et « chanvre ». L'analyse des cooccurrences de mots-clés a permis de distinguer, au sein de cet ensemble de travaux, quatre groupes thématiques différents. Ce premier résultat a permis d'obtenir une image plutôt réaliste de la répartition des travaux et ainsi d'appréhender les grandes thématiques. Parmi ces thématiques, celle nommée « Mechanical properties & flexural strength » contenait les articles relatifs aux propriétés thermiques. Une analyse plus poussée de cette thématique a permis d'identifier des connections entre mots clés, indiquant par exemple l'existence d'études portant sur le lien entre les propriétés mécaniques et thermiques. Cette approche graphique, sujette à interprétation, est bien entendu limitée car elle retranscrit de manière simplifiée les travaux de recherche et ne dispense en aucun cas de lire de manière méthodique les articles. En revanche, à l'heure où la quantité de travaux publiés est en constante augmentation, cet outil permet de hiérarchiser les articles qui méritent d'être étudiés plus attentivement. La lecture d'une sélection d'articles a permis de juger de manière qualitative la cohérence du groupe thématique mais aussi d'identifier un certain nombre de sous-thèmes intra-thématiques et d'appréhender des questions de recherche transversales comme par exemple l'effet de la production de chaux sur l'environnement. Cette question est essentielle car elle permet de mettre en perspective la portée de travaux sur un sujet et d'évaluer la pertinence de son application à grande échelle en termes de soutenabilité vis à vis de la disponibilité des matières premières, de l'énergie nécessaire, et de ces éventuels impacts environnementaux. Ces questions se posant également pour la production de chanvre.

L'analyse automatique de texte présentée ici offre donc la possibilité i) de réaliser une synthèse bibliographique permettant de hiérarchiser un ensemble de documents sur un sujet donné, ii) d'identifier les concepts essentiels et les enjeux d'un champ de recherche, et enfin iii) d'identifier et d'intégrer une problématique scientifique dans un état des connaissances. Ainsi, le travail présenté ici a permis la mise

au point d'un projet de recherche s'inscrivant dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) publiée en 2020 et plus particulièrement dans le cadre de la réglementation environnementale en vigueur (RE2020). Celui-ci concerne la mise au point de matériaux constituant l'enveloppe thermique de bâtiments tout en réduisant leurs impacts environnementaux. Il s'agit de développer des outils numériques dédiés au comportement hygrothermique de parois complexes destinés à l'optimisation de leur conception en fonction des spécificités de chaque bâtiment. Pour cela, il est envisagé de développer un modèle 1D de transfert de chaleur et de masse prenant en compte la dynamique des phénomènes, afin de reproduire les variations de température et d'humidité relative lorsque le matériau est sollicité au moyen d'une méthode de type Flash couplée à un dispositif mesurant la perte de masse des échantillons. Le développement du modèle direct se fera probablement par étape en intégrant au fur et à mesure des données selon les hypothèses envisagées. Les paramètres liés aux phénomènes de sorption (absorption et désorption) pourraient être calibrés à partir de mesures menées au moyen d'un Calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et ainsi prédire correctement le lien entre la teneur en eau et la température du matériau ainsi que l'humidité relative de l'air.

Bibliographie

- [1] M. K. Dixit, «Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 390-413, 2017.
- [2] P. européen, «L'efficacité énergétique des bâtiments,» Union Européenne, 17 février 2020. [En ligne]. Available: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_fr. [Accès le 13/12/2023].
- [3] B. Peuportier, C. Roux, E. Assoumou, M. Frapin et J.-L. Sénégas, «ACVs Energies,» ADEME, 2020.
- [4] M. K. Dixit, J. L. Fernández-Solís, S. Lavy et C. H. Culp, «Need for an embodied energy measurement protocol for buildings: A review paper,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3730-3743, 2012.
- [5] S. Y. Abdelouadoud, «Structure du parc de résidences principales,» data.gouv.fr, 18 mars 2022. [En ligne]. Available: <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/structure-du-parc-de-residences-principales/>. [Accès le 14/12/2023].
- [6] C. Peñasco et L. Díaz Anadón, «Assessing the effectiveness of energy efficiency measures in the residential sector gas consumption through dynamic treatment effects: Evidence from England and Wales,» *Energy Economics*, vol. 117, 2023.
- [7] T. Ramesh, R. Prakash et K. K. Shukla, «Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context,» *Applied Energy*, vol. 89, pp. 193-202, 2012.
- [8] A. Koezjakov, D. Urge-Vorsatz, W. Crijns-Graus et M. Van den Broek, «The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings,» *Energy & Buildings*, vol. 165, pp. 233-245, 2018.
- [9] S. Resalati, «An Aggregated Embodied and Operational Energy Approach,» chez *Nearly Zero Energy Building (NZEB) - Materials, Design and New Approaches*, 2022.
- [10] «Liste (non-exhaustive) des principales bases de données ou portails utiles pour la communauté des chercheurs,» CNRS, [En ligne]. Available: <https://biblio.neel.cnrs.fr/>. [Accès le 22/12/2023].
- [11] CNRS, l'Abes, Couperin et l'Université de Lorraine, «Le plus vaste réservoir d'archives scientifiques au service de la recherche française,» *France Universités*, 01 01 2011. [En ligne]. Available: <https://www.istex.fr/>. [Accès le 04/01/2024].
- [12] LISIS, IFRIS et INRAE, «Cortext platform,» LISIS - Laboratoire Interdisciplinaire Sciences Innovations, 01 01 2008. [En ligne]. Available: <https://www.cortext.net/>. [Accès le 04/01/2024].