

BULETINUL INSTITUTULUI POLITEHNIC DIN IAȘI

Publicat de

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Volumul 68 (72), Numărul 1, 2022

Secția

CONSTRUCȚII. ARHITECTURĂ

DOI: 10.2478/bipca-2022-0005



**LES MATÉRIAUX INNOVANTS VERS UNE NOUVELLE ÈRE
DE CONCEPTION ARCHITECTURALE
INNOVATIVE MATERIALS FOR A NEW ERA OF
ARCHITECTURAL DESIGN**

BY

MALEK NOURI^{1,*} and ABDESSALEM HAJLAOUI²

¹Ecole Supérieure Des Sciences et Technologies du Design, Université de la Manouba, Tunis, Tunisie

²Laboratoire d'Electrochimie et Environnement (LEE), École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, ENIS, Sfax, Université de Sfax, Tunisie

Received: February 15, 2023

Accepted for publication: May 30, 2023

Résumé. L'avènement de la crise énergétique mondiale et l'émergence des enjeux du développement durable nécessitent la maîtrise de la conception architecturale, non seulement pour assurer une ambiance intérieure confortable, mais aussi pour maîtriser la consommation d'énergie et son impact sur l'environnement. Le confort des bâtiments, l'efficacité énergétique, les bâtiments à énergie positive, autant de sujets d'actualité qui nécessitent de connaître les principes de base pour mener à bien une démarche de développement durable dans le bâtiment. De plus comprendre les valeurs qui caractérisent les matériaux est aujourd'hui indispensable pour choisir judicieusement les produits d'un point de vue technique et économique. Ce travail se propose de les articuler en s'intéressant au matériau à gradient fonctionnel (Functionally graded material : FGM) comme moyen de conception. Il espère ainsi contribuer à convertir le concept de gradient

*Corresponding author; *e-mail*: abdhajlaoui@gmail.com

© 2022 Malek Nouri and Abdessalem Hajlaoui

This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International license (CC BY-NC-ND 4.0).

en réalité avec exactitude et précision grâce aux procédés de fabrication basés sur la nouvelle technologie.

Mots clés : Conception architecturale ; Confort ; Matériau FGM ; Technologie.

Abstract. With the global energy crisis and the emergence of sustainable development issues, architectural design must be mastered, not only to ensure a comfortable indoor environment, but also to control energy consumption and its impact on the environment. Comfortable buildings, energy efficiency, and positive energy buildings are all current issues that require knowledge of the basic principles of sustainable development in buildings. Moreover, understanding the values that characterize materials is essential today to choose products wisely from a technical and economic point of view. This work proposes to articulate them by focusing on Functionally graded material (FGM) as a design tool. Thus, it seeks to contribute to convert the concept of gradient into reality with accuracy and precision thanks to the manufacturing processes based on the new technology.

Keywords: Architectural design; Comfort; FGM material; Technology.

1. Introduction

En vue des enjeux sanitaires, écologiques et économiques actuels, les professionnels du bâtiment font face à de nouveaux défis. Les nouvelles normes de réglementation thermique et la hausse continue du prix de l'énergie obligent aujourd'hui les chercheurs et les architectes à innover. Un bâtiment est un ensemble complexe de matériaux en contact avec un environnement aux températures fluctuantes, des transferts de chaleur s'y produisent en permanence. C'est également un lieu que l'homme occupe plus de 80 % de son temps au cours de sa vie. Au-delà des performances thermiques auxquelles un bâtiment doit répondre aujourd'hui, il doit s'intégrer parfaitement aux contraintes de son environnement, tout en le respectant, et offrir à ses usagers un confort optimum chaque saison. Un bâtiment est une enveloppe composée d'une multitude de parois, opaque ou non, chacune d'elles étant l'assemblage de matériaux aux caractéristiques diverses : c'est cet ensemble composite qui lui confère ses caractéristiques thermiques. « Il est utile de répéter que le rôle de premier d'un bâtiment est d'assurer à ses occupants un climat intérieur agréable et peu dépendant des conditions extérieures, notamment météorologiques et acoustiques. La qualité architecturale participe, à notre avis, aux conditions de confort ou réciproquement, le confort offert par un bâtiment est l'un des aspects de son architecture » (Roulet, 2004). Par conséquent, les modes d'utilisation des bâtiments et les attentes des occupants en matière de confort dans l'environnement des bâtiments doivent être étudiés afin de déterminer des moyens alternatifs pour optimiser les performances. Avec la demande croissante de solutions de design d'intérieur optimisant la consommation d'énergie des

bâtiments, les designers d'intérieur du monde entier sont de plus en plus conscients de la stratégie de durabilité. La plupart des processus traditionnels d'aménagement intérieur et de construction consomment de nombreuses ressources naturelles lors de la fabrication et de l'installation, cela nuit à l'environnement. Les architectes d'intérieur ont adopté une technologie de conception durable, ce qui leur permet d'améliorer la qualité du confort intérieur. Pour obtenir des solutions, des matériaux, des méthodes de construction et des meubles durables, il faut choisir les options de conception du matériau de construction. Malgré de nombreuses recherches sur le design durable, les discussions sur l'aménagement intérieur des critères de durabilité sont rares. Il est essentiel que les solutions d'aménagement intérieur standard durables soutiennent le travail de l'architecte d'intérieur concerné. De nombreuses études sur le confort thermique ont mis l'accent sur l'interaction entre l'homme et son environnement. Celui-ci est déterminé par un certain nombre de facteurs, notamment des facteurs d'ordre individuel et des facteurs environnementaux. L'étude du confort thermique est très importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance, car le monde d'aujourd'hui souffre d'une crise énergétique. Selon Lavigne « le confort thermique est une sensation qui fait intervenir des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, donc cela explique la complexité de ce thème, car il dépend du côté subjectif des usagers qui place la perception de chaque individu au cœur de l'analyse » (Fernandez & Lavigne, 2009).

Cet article traite des moyens de séparation dans les espaces intérieurs et des expériences de confort thermique et acoustique. Ainsi l'objectif de ce travail est d'intégrer le confort dans la conception architecturale afin de procurer le plaisir aux occupants. Nous chercherons comment le confort affecte les espaces et leurs occupations, et comment faire en sorte que le climat a un effet positif et déterminant sur les habitudes des usagers. Pour cela, il est nécessaire d'identifier et de comprendre les liens entre ambiance, comportement, satisfaction et consommation d'énergie afin de les utiliser efficacement et de pouvoir bénéficier dès la première phase du projet. Comment intégrer le confort dans la conception architecturale ? Les matériaux composites à gradient fonctionnel (FGM) sont-ils l'avenir de la construction ? Existe-t-il des procédés de fabrication à ces matériaux ? En premier lieu, nous nous intéressons à définir l'architecture entre pratiques connaissances scientifiques. Ensuite, nous aborderons les différents aspects du confort thermique et du confort acoustique dans les espaces intérieurs. Enfin, nous recherchons à intégrer de nouveaux matériaux dès les premières faces de conception, afin d'assurer le confort dans les espaces intérieurs.

2. L'architecture entre pratique et connaissance scientifique

L'architecture est une discipline et un style de vie qui crée des zones de vie pour les gens. Les besoins croissants dans notre monde, accompagnés des progrès de la technologie et de l'industrie, ont fait naître une interaction entre les professions. « Il existe entre l'architecture et la chimie un rapport d'ordre à la fois scientifique, artistique, mais aussi poétique. De même il existe une relation entre la matière, l'architecture, l'espace, l'art, mais aussi la société, car l'architecture est un art social » (Viguié, 2021). Les créations de l'architecte s'enrichissent non seulement des progrès technologiques, mais aussi des échanges qu'il peut avoir avec les chimistes les industriels qui créent ces matériaux ou qui l'aident à en comprendre et en maîtriser les propriétés pour les adapter aux besoins, et à sa propre créativité. Les métiers ne sont plus réprimés entre eux et un ensemble mutuel est en train de se créer. Contenant de nombreux métiers en son sein, l'architecture est une discipline qui partage des points communs avec de nombreuses professions. Par conséquent, la profession d'architecte d'intérieur, qui entretient une relation étroite avec l'architecture, est également une préoccupation particulière. L'objectif de l'architecte d'intérieur est donc de combiner les composants matériels et immatériels afin de satisfaire aux besoins des usagers (Zorgati, 2011). L'architecture d'intérieur nous confronte dans tous les domaines et à toutes les périodes de la vie. Qu'elle soit consciente ou inconsciente, réussie ou non, tant qu'il y aura une architecture intérieure humaine, il existera aussi un art de créer de l'espace et des innovations. C'est un fait indéniable de l'importance du sérieux des concepteurs des produits de fabrications. Parallèlement à l'actualité dans le domaine du design, on assiste à une recherche d'approches innovantes et de divers modèles de conception. « L'innovation est souvent présentée comme un enjeu, source et condition du développement et de la survie économique et social de nos sociétés modernes et post-modernes » (Kahane, 2015). L'architecte d'intérieur est également responsable du choix des matériaux et des finitions du lieu, prendre en compte l'esthétique, fonction et coût. Actuellement, une grande variété de revêtements trouvée sur le marché, permettant au concepteur d'évaluer la durabilité, et la qualité des matériaux, opter pour des produits respectueux de l'environnement. Le choix des matériaux prend également en compte les objectifs de l'espace, le rôle de l'environnement et le comportement des utilisateurs. Aussi L'état émotionnel de l'individu, son humeur, son niveau de fatigue affecteront son expérience d'un environnement. Les attentes jouent un rôle important dans la façon dont un individu vit le monde physique. D'autres facteurs environnementaux, tels que le bruit ou l'éblouissement, peuvent influencer la perception thermique, entraînant une sensation accrue d'échauffement.

3. Confort et qualité de l'environnement intérieur

Les questions de confort acoustique et thermique d'un espace de vie ou de travail sont fréquemment posées par les architectes et les concepteurs qui conçoivent des bâtiments en tenant compte à la fois des champs thermiques et sonores. « L'acoustique et la thermique rentrent parfois en conflit : l'accroissement d'exigence d'une caractéristique peut impacter défavorablement l'autre. Confort acoustique et confort thermique nécessitent par exemple des conditions contradictoires lors de la conception architecturale, avec du cloisonnement dans le premier cas et des grands volumes dans le second. Mais il existe également des convergences entre les deux domaines, notamment au niveau de l'étanchéité à l'air ou de l'épaisseur des matériaux choisis» (Batiactu, 2017). Existe-t-il des isolants performants prenant en compte à la fois la thermique et l'acoustique ? Quelles solutions à mettre en œuvre pour obtenir des résultats satisfaisants ? Les architectes, entrepreneurs et propriétaires de bâtiments d'aujourd'hui contribuent à créer des bâtiments qui offrent aux occupants de meilleures performances, protection et possibilités. Ils s'efforcent de construire leur héritage en répondant aux demandes changeantes du marché, en incorporant des solutions durables et en utilisant des produits durables construits pour durer. Ils exigent une performance qui résiste aux extrêmes climatiques, tout en maintenant une responsabilité environnementale. Les constructeurs doivent améliorer la qualité, la durabilité et la conception de leurs produits pour répondre aux exigences des décideurs sur les marchés de la construction neuve et de la rénovation/restauration. Les économies d'énergie induites par les dernières technologies thermiques et acoustiques doivent être prises en compte, elles donnent aux bâtiments un avantage concurrentiel pour le présent et l'avenir. Le confort des occupants, les économies d'énergie, la performance structurelle, la durabilité et la résistance à la condensation sont autant de priorités. L'innovation des produits et des méthodes constructives permet d'augmenter significativement les performances des bâtiments et participe à renouer avec des gains de productivité.

3.1 Confort acoustique

Dans un immeuble résidentiel ou de bureaux, les espaces intérieurs seront plus pensés, car ces nuisances peuvent affecter la santé et le bien-être des occupants. L'acoustique fait également partie du confort. Dès le début de la conception architecturale, la nécessité de prendre en compte l'acoustique est cruciale dans la pratique architecturale. Il s'agit de la phase de conception au cours de laquelle les dispositifs acoustiques appropriés sont choisis, ainsi que les surfaces et les épaisseurs nécessaires à la mise en œuvre de l'isolation ou de la

protection sont déterminées. Au-delà de l'approche technique, basée sur les niveaux sonores, c'est également à ce stade que le projet est pensé dans son environnement sonore à travers le choix des matériaux et des textures, et l'aménagement des espaces. L'intégration de matériaux d'insonorisation dans la conception améliorera la qualité de vie des occupants et éliminera le besoin de mener des rénovations ultérieures. Il s'agit donc d'agir à la fois sur l'isolation acoustique, pour empêcher le maximum la propagation des bruits émanant de l'extérieur vers l'intérieur, et sur l'absorption acoustique, destinée à limiter ou contrôler au mieux la réverbération des sons produits dans l'espace. L'acoustique architecturale vise à contrôler la qualité sonore d'un bâtiment et à lui conférer un caractère et un style unique. Il doit être mis en œuvre en fonction de la destination de l'espace en combinaison avec les propriétés acoustiques du matériau insonorisant. Pour une bonne absorption acoustique, il est recommandé d'utiliser des matériaux aux propriétés adaptées. « Au-delà du confort, l'attention pour l'acoustique constitue une opportunité pour créer un paysage sonore par les dispositions spatiales (distribution, éloignement et proximité ...), la géométrie des lieux, la nature des matériaux et les textures » . L'acoustique intérieure a un fort impact sur la qualité de l'environnement intérieur. « Différentes études substantielles ont clairement abordé l'influence du son sur la performance humaine. De telles études montrent que de grandes différences acoustiques dans des situations expérimentales empêchent la transition du résultat acoustique d'être réaliste » . Cependant, chaque fois que des personnes travaillent à l'intérieur, elles sont continuellement soumises au bruit ; qu'ils travaillent dans des bureaux privés, des bureaux collectifs ou dans n'importe quel environnement industriel, elles ne seront jamais soumises à une absence totale de son, ce qui se produit non seulement à cause des personnes, mais aussi à cause des machines qui peuvent causer une distraction, un stress, une fatigue ou même une perte d'audition (Buratti et al., 2018). L'état de la surface et de la composition des parois (murs, plafond, sol) d'un espace construit détermine en grande partie ses caractéristiques acoustiques. Pour faire face aux nuisances sonores, il faudrait d'abord pouvoir intervenir sur la structure même du lieu. Il faut privilégier les revêtements au sol bien spécifique et hautement résistant, les carreaux muraux, les cabines acoustiques ou les solutions suspendues au plafond atténuent aussi les phénomènes de réverbération. Ainsi, pour optimiser les performances acoustiques, il convient d'utiliser des matériaux isolants tels que la laine de roche ou textile, la fibre de verre, le polystyrène expansé, le verre cellulaire, et les mousses (élastomères, phénoliques, polyuréthane).

3.2 Confort thermique

Dans le bâtiment, le confort thermique est un paramètre essentiel, que le concepteur doit prendre en considération dès les premières phases de conception,

afin de donner les solutions nécessaires pour le bien-être intérieur des usagers. La notion du confort n'a pas cessé d'évoluer à travers les temps, en suivant l'évolution de l'humanité et les exigences de l'homme. Selon plusieurs études (Frontczak & Wargocki, 2011), le confort thermique fait partie des conditions les plus importantes pour améliorer le confort et la satisfaction des occupants avec leur environnement intérieur. De nombreux facteurs doivent être pris en compte pour créer un confort (thermique) digne de ce compliment. Chaque personne a une conception et une perception différentes de ce que sont le confort et le bien-être. Il est néanmoins possible de contrôler et de mesurer techniquement le confort pour créer les conditions qui permettent à la plupart des gens de se sentir parfaitement à l'aise. Plusieurs recherches ont été élaborées dans ce sens pour définir la notion du confort thermique. Selon la réglementation AFNOR (ASHRAE, 2009), le confort thermique est défini par : état d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique. D'après Magalo «la sensation du confort thermique est l'expression du bien-être d'un individu en rapport avec la chaleur. Elle est le résultat de l'interaction entre l'individu et son environnement » (Bodart, 2002). D'un point de vue architectural, le confort thermique est associé à des matériaux légers et des surfaces lisses comme le textile, des surfaces poreuses ou encore du bois. Les surfaces planes et dures (faites de métal ou de pierre) sont, d'un autre côté, perçues comme moins adaptées au confort thermique. Aucune science n'explique cette perception, mais on peut supposer que cela est lié à l'échange de chaleur entre deux surfaces (transfert radiatif).

L'une des principales fonctions des bâtiments est en effet de fournir des environnements intérieurs qui soient confortables au niveau thermique. « Le confort est vécu à travers un certain nombre d'interactions entre les facteurs personnels et environnementaux » :

- Physiologique : la façon dont notre corps fonctionne et interagit avec notre environnement
- Physique : les principaux paramètres de l'environnement qui nous entoure.
- Socio Psychologique : la façon dont nous nous sentons dans son ensemble et le type d'environnement social dans lequel nous vivons.

Le confort thermique a un effet considérable et mesurable sur la performance des espaces intérieurs. Il est considéré comme un aspect clé pour déterminer les températures opérationnelles intérieures acceptables, ainsi que pour identifier les solutions passives et les stratégies de ventilation si la conception se fait dans un contexte chaud. En outre, les matériaux de construction doivent lutter contre le transfert de chaleur des environnements intérieurs et extérieurs adjacents. « Il existe trois types fondamentaux de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement » . Afin d'atteindre le confort thermique par le biais de toute conception, il est important de connaître la situation réelle de l'environnement intérieur en tenant compte de la température et de l'humidité relative. Les Émirats arabes unis (EAU) ont un climat désertique,

caractérisé par des hivers chauds et des étés très chauds et ensoleillés, avec des niveaux d'humidité élevés. Généralement, le contrôle de la température est nécessaire toute l'année (Ballarini et al., 2018).

4. Innovation matériaux

Les premiers humains n'avaient accès qu'à un nombre très limité de matériaux, ceux qui existent à l'état naturel : pierre, bois, argile, peaux, etc. Avec le temps, ils ont découvert des techniques permettant de produire des matériaux dont les propriétés étaient supérieures à celles des matériaux naturels, ces nouveaux matériaux comprenaient la poterie et divers métaux. En outre, la science nous a permis de découvrir que les propriétés d'un matériau pouvaient être modifiées par des traitements thermiques et par l'ajout d'autres substances. À ce stade, l'utilisation des matériaux était totalement un processus de sélection qui consistait à choisir, parmi un ensemble donné et plutôt limité de matériaux, celui qui convenait le mieux à une application en raison de ses caractéristiques. Ce n'est qu'à une époque relativement récente que les scientifiques ont commencé à comprendre les relations entre les éléments structurels des matériaux et leurs propriétés. Ainsi, des dizaines de milliers de matériaux différents ont évolué avec des caractéristiques plutôt spécialisées qui répondent aux besoins de notre société moderne et complexe, notamment les métaux, les plastiques, les verres et les fibres. Les matériaux solides sont commodément regroupés en trois catégories de base : les métaux, les céramiques et les polymères, un schéma basé principalement sur la composition chimique et la structure atomique. La plupart des matériaux appartiennent à l'une ou l'autre de ces catégories. En outre, il existe des matériaux composites qui sont des combinaisons techniques de deux ou plusieurs matériaux différents. « Pratiquement toutes les propriétés importantes des matériaux solides peuvent être regroupées en six catégories différentes : mécanique, électrique, thermique, magnétique, optique et endommagement. Pour chacune, il existe un type de stimulus caractéristique capable de provoquer des réponses différentes » (Callister & Rethwisch, 2018). Un composite est composé de deux (ou plusieurs) matériaux individuels appartenant aux catégories précédemment évoquées - métaux, céramiques et polymères. L'objectif de la conception d'un composite est d'obtenir une combinaison de propriétés qui n'est pas offerte par un seul matériau et d'incorporer les meilleures caractéristiques de chacun des matériaux constitutifs. Un grand nombre de types de composites sont représentés par différentes combinaisons de métaux, de céramiques et de polymères. En outre, certains matériaux naturels sont des composites, comme le bois et l'os. Les propriétés techniques des matériaux, leurs aspects et leurs manifestations permettent aux créateurs de se démarquer et de répondre aux enjeux sociaux et environnementaux.

5. FGM comme élément de conception

Les matériaux ne cessent de connaître des évolutions dans leurs compositions, du fer et des métaux purs aux matériaux composites qui sont très largement répandus aujourd'hui. Les matériaux purs ont une utilisation très limitée, car ils ne correspondent pas aux applications les plus courantes qui exigent des propriétés particulières ne pouvant être fournies par un seul matériau. Par rapport aux matériaux purs, les alliages se distinguent par leur résistance et leur polyvalence. Ensuite, différents mélanges de matériaux ont été élaborés afin de combiner leurs propriétés pour mieux répondre aux différentes exigences fonctionnelles. Les matériaux composites sont la forme la plus avancée de ces matériaux dont les propriétés physiques et chimiques diffèrent nettement de celles des matériaux pris séparément. Un rapport résistance/rigidité élevé, une meilleure résistance, une grande fiabilité, etc. sont les avantages des composites par rapport aux matériaux purs ou alliés. Malgré tous ces avantages, les matériaux composites sont soumis à une forte transition de propriétés à l'interface qui peut entraîner la défaillance des composants. Cet inconvénient des composites conventionnels est éliminé par la forme modifiée des composites appelés matériaux à gradient fonctionnel (FGM). Ces matériaux remplacent l'interface vive par une interface à gradient qui permet une transition douce des propriétés d'un matériau à l'autre (Mahamood & Akinlabi, 2017). Les propriétés importantes des matériaux varient régulièrement et continuellement dans les directions préférées des FGM. Les os, les dents, la peau et le bambou sont quelques exemples de matériaux naturels à gradient fonctionnel. Le concept de matériau à gradient fonctionnel (FGM) a été développé pour la première fois par des chercheurs japonais en 1984 (Koizumu, 1993). Leur conception a permis de créer une barrière thermique à gradient fonctionnel avec une température extérieure de 2000 K (1726.850°C) et une température intérieure de 1000K (726.85°C) sur 10 mm d'épaisseur. Par la suite, l'utilisation de matériaux à gradient fonctionnel a augmenté dans divers domaines, notamment l'aérospatiale, l'exploitation des mines, l'énergie et le secteur médical. Les FGM présentent de nombreux avantages qui les rendent adaptées à ces applications. Il s'agit notamment d'une grande résistance à travers l'épaisseur, d'une amélioration des performances des systèmes de barrière thermique et acoustique, etc. Dans le cadre de conception architecturale, la variation des propriétés matérielles est demandée dans les séparations murales qui doivent avoir des fonctions multiples (multifonctionnelles) comme dans le cas des cloisons exposées à la chaleur sur une seule face ; qui doivent être assez résistants à l'agression thermique à cette face ; mais doivent également être dur et esthétique à l'autre face.

5.1 Modélisation des propriétés matérielles des structures FGM

Les matériaux FGM sont caractérisés par des propriétés matérielles qui varient de façon continue à travers l'épaisseur de la structure (parois, cloisons, séparation...) en suivant une fonction bien déterminée. Les fonctions les plus rencontrées dans la littérature sont : de puissance (P-FGM), sigmoïde (S-FGM) et exponentielle (E-FGM) (Chi & Chung, 2006). La section suivante présente l'évolution de la propriété matérielle (rigidité, résistance, conductivité électrique, dilatation thermique, capacité thermique...) à travers l'épaisseur de la structure (Hajlaoui et al., 2015) (Fig. 1).

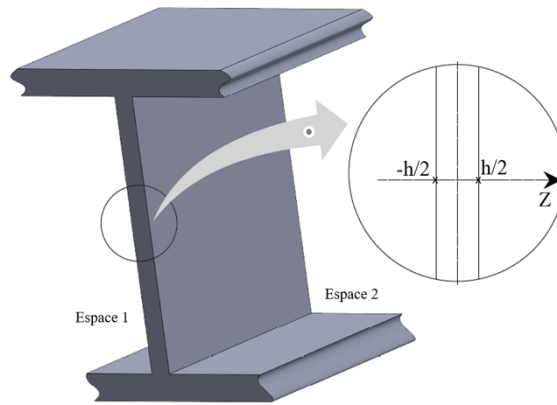


Fig. 1 – Épaisseur de la structure (parois, cloisons, séparation).

Les propriétés matérielles d'une structure P-FGM : Les propriétés matérielles de la structure varient d'une façon continue à travers l'épaisseur sur la base d'une fonction de loi de puissance en tant que :

$$P(z) = P_1(g) + P_2[1 - V(z)], \text{ avec } V(z) = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n \quad (1)$$

$V(z)$ est la fraction volumique des constituants dont la plupart peuvent être définis par des fonctions en loi de puissance (Chi & Chung, 2006). Où P désigne la propriété matérielle des constituants et les indices 1 et 2 se réfèrent au matériau 1 et au matériau 2, respectivement. En outre, (n) est l'indice de matériau de la structure FGM ($n \geq 0$).

La variation de la propriété matérielle dans la direction de l'épaisseur est représentée sur la Fig. 2. L'indice des matériaux n est un paramètre variable très important pour la structure FGM, car il détermine directement la répartition de la matière.

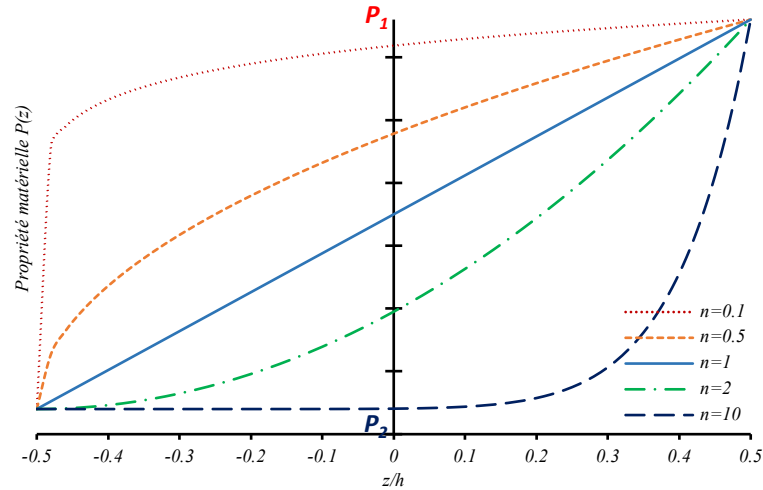


Fig. 2 – Variation de la propriété matérielle (P-FGM).

Quand $n > 1$, la structure FGM est riche en matériau 2 dont les propriétés matériau 2 sont plus distinctes. En revanche, lorsque $n < 1$, la structure FGM est riche en matériau 1 dont les propriétés matériau 1 sont plus distinctes. L'indice de matériau peut être utilisé pour concevoir la structure FGM avec différente propriété. Lorsque $n \rightarrow 0$, la structure est entièrement en matériau 1 et lorsque $n \rightarrow \infty$, la structure est entièrement en matériau 2.

Les propriétés matérielles d'une structure S-FGM : Les propriétés matérielles de la structure varient de façon continue à travers l'épaisseur sur la base d'une fonction sigmoïde en tant que :

Pour $0 \leq z \leq \frac{h}{2}$:

$$P(z) = P_1 V_1(z) + P_2 [1 - V_1(z)], \text{ avec } V_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2z}{h} \right)^n \quad (2)$$

Pour $-\frac{h}{2} \leq z \leq 0$:

$$P(z) = P_1 V_2(z) + P_2 [1 - V_2(z)], \text{ avec } V_2 = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2z}{h} \right)^n \quad (3)$$

La variation de la propriété matérielle dans la direction de l'épaisseur est représentée sur la Fig. 3.

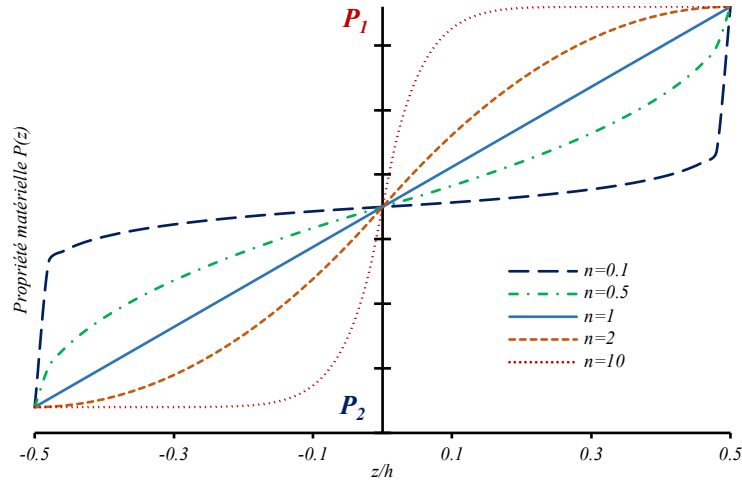


Fig. 3 – Variation de la propriété matérielle (S-FGM).

Les propriétés matérielles d'une structure E-FGM : Les propriétés matérielles varient de façon continue à travers l'épaisseur sur la base d'une fonction exponentielle en tant que :

$$P(z) = Ae^{B\left(\frac{z+h}{2}\right)}, \text{ avec } A = P_2; B = \frac{1}{h} \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (4)$$

La variation de la propriété matérielle dans la direction de l'épaisseur est représentée sur la Figure 4.

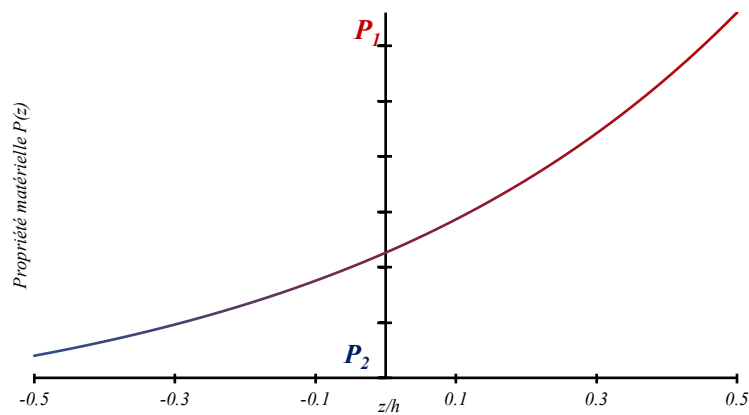


Fig. 4 – Variation de la propriété matérielle (E-FGM).

6. La Fabrication additive au service de la nouvelle conception

Le développement des nouvelles technologies apporte des changements majeurs au processus de conception de la forme et des propriétés du produit et bouleverse le mode de conception traditionnel. L'analyse de la demande et du comportement des occupants des espaces intérieurs devient un moyen important pour la conception des produits architecturaux. Cependant, la conception est un processus complexe et innovant. Le développement de nombreuses technologies qui rendent notre existence si confortable a été intimement lié à l'accessibilité des matériaux appropriés. Bien que certains chercheurs abordent la question des dimensions esthétiques, symboliques et culturelles des matériaux, de leurs significations, il n'existe pas de réel modèle de ce que peut-être les matériaux FGM dans la sphère de la conception des espaces intérieurs. Les progrès de la fabrication additive permettent de produire des formes tridimensionnelles. Aujourd'hui, des formes personnalisées peuvent être obtenues en peu de temps directement à partir de données numériques. Les procédés de fabrication additive permettent de produire des structures en 3D par l'ajout de matière (Gibson et al., 2009). Avec ces procédés, il est possible de fabriquer des structures morphologiquement complexes et personnalisées (Campbell et al., 2012). De plus, nous avons la possibilité d'utiliser de nombreux matériaux : métaux, céramiques et polymères. Une des évolutions majeures est la possibilité de produire des structures en FGM. La fabrication additive (FA) est une technologie de fabrication de formes libres solides qui permet la fabrication directe de composants sur mesure finement détaillés en plaçant avec précision des matériaux à des positions définies dans un domaine de conception. Avec le temps, les technologies de fabrication additive se sont développées, passant de la fabrication de prototypes uniques à la création de structures d'utilisation finale à grande échelle, grâce à l'amélioration des possibilités de fabrication. Les progrès technologiques des systèmes de fabrication additive d'aujourd'hui permettent de recourir également à la FGM, d'où le terme de fabrication additive à gradient fonctionnel (FGAM), qui désigne une technique de fabrication couche par couche consistant à faire varier progressivement la composition des matériaux au sein d'un composant pour répondre à une fonction donnée. Le progrès des technologies de la fabrication additive permet de contrôler stratégiquement la densité et la directionnalité du dépôt de matériaux dans une distribution 3D complexe ou de combiner divers matériaux pour produire une structure monolithique sans soudure en modifiant la densité et les orientations du dépôt (Oxman, 2011).

7. Conclusion

La mise en œuvre des différentes fonctions d'un bâtiment, structure, confort, habillage nécessite un ensemble de matériaux et leurs qualités spécifiques. Les différentes propriétés recherchées pour ces différentes fonctions conduisent à sélectionner les matériaux répondant le mieux aux conditions recherchées. Cependant, ces choix peuvent également être influencés par des préférences esthétiques ou des contraintes techniques, environnementales ou budgétaires.

Avec le développement rapide de la science et de la technologie, les nouveaux matériaux ont un grand espace de développement et d'application dans le domaine de constructions architecturale. L'application des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) dans les bâtiments, d'une part, améliore les performances des bâtiments traditionnels ; d'autre part, elle peut établir de nouvelles fonctions multiples (multifonctionnelles), améliorer les propriétés thermique et acoustique des bâtiments. Compte tenu du potentiel des FGM, ces matériaux ont des domaines d'application variés. Pour utiliser ce concept de FGM, différentes méthodes de traitement sont disponibles. Le développement des FGM nécessite des connaissances et des compétences dans différents domaines. Pour convertir le concept de gradient en réalité avec exactitude et précision, en fait recours aux procédés de fabrication basés sur la nouvelle technologie. La fabrication additive est une réelle révolution permettant de recourir à la FGM.

REFERENCES

- ASHRAE, A. H. (2009). Chapter 9 : Thermal Comfort. ASHRAE, Atlanta.
- Ballarini, I., De Luca, G., Paragamyran, A., Pellegrino, A., & Corrado, V. (2018). Integration of Thermal and Visual Comfort in the Retrofit of Existing Buildings. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), 1-6.
- Batiactu. (2017, novembre 21). Isolation thermique-acoustique, solutions combinées écologiques. Batiactu. <https://www.batiactu.com/edito/isolation-thermique-acoustique-combinee-solutions-combines-51241.php>
- Bodart, M. (2002). Création d'un outil d'aide au choix optimisé du vitrage du bâtiment, selon des critères physiques, économiques et écologiques, pour un meilleur confort visuel et thermique. Louvain: Faculté des Sciences Appliquées Unité d'Architecture, Université Catholique de Louvain.
- Buratti, C., Belloni, E., Merli, F., & Ricciardi, P. (2018). A new index combining thermal, acoustic, and visual comfort of moderate environments in temperate climates. *Building and Environment*, 139, 27-37.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering : An introduction* (Vol. 9). Wiley New York.

- Campbell, I., Bourell, D., & Gibson, I. (2012). Additive manufacturing: Rapid prototyping comes of age. *Rapid prototyping journal*.
- Chi, S.-H., & Chung, Y.-L. (2006). Mechanical behavior of functionally graded material plates under transverse load—Part I: Analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 43(13), 3657-3674.
- Fernandez, P., & Lavigne, P. (2009). *Concevoir des bâtiments bioclimatiques : Fondements & méthodes*. Editions Le Moniteur.
- Frontczak, M., & Wargocki, P. (2011). Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and environment*, 46(4), 922-937.
- Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2009). *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer US.
- Hajlaoui, A., Jarraya, A., El Bikri, K., & Dammak, F. (2015). Buckling analysis of functionally graded materials structures with enhanced solid-shell elements and transverse shear correction. *Composite Structures*, 132, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.059>
- Kahane, B. (2015). Design et innovation : Deux faces d'une même médaille? *Sciences du design*, 1, 109-119.
- Koizumu, M. (1993). The concept of FGM, ceramic transactions. *Functionally Graded Materials*, 34, 3-10.
- Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2017). *Functionally graded materials, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering*. Springer International Publishing, Cham.
- Oxman, N. (2011). Variable property rapid prototyping. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), 3-31. <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.558588>
- Roulet, C.-A. (2004). *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. PPUR presses polytechniques.
- Viguié, J.-P. (2021). Introduction : Qu'attend l'architecte, l'urbaniste et l'artiste de la chimie? In *La chimie et l'habitat* (p. 13-34). EDP Sciences.
- Zorgati, I. B. Y. (2011). *Matériau et vécu spatial en architecture d'intérieur*. Centre de publication universitaire.

MATERIALE INOVATIVE PENTRU O NOUĂ ERA ARHITECTURALĂ

(Rezumat)

În contextul crizei globale de energie și apariției problemelor de sustenabilitate, arhitectura trebuie folosită nu doar pentru asigurarea confortului interior, ci și pentru controlul consumului de energie și impactului asupra mediului. Confortul și eficiența energetică a clădirilor și clădiri pozitive energetic sunt probleme actuale care necesită cunoștințe a principiilor de bază în dezvoltarea sustenabilă a clădirilor. În plus, înțelegerea proprietăților materialelor este esențială pentru alegerea informată din punct de vedere tehnic și economic. Lucrarea de față propune se concentrează pe instrumentul de proiectare al materialelor gradate funcțional (FGM). Prin urmare, este urmărită convertirea procesului de gradient în realitate, cu precizie și acuratețe pe baza noilor tehnologii.