

*Sélection Des Matériaux Pour Une Dalle Légère, Rigide, Isolant  
Thermique Et Résistante Aux Vibrations Mécaniques Par La  
Méthode d'Ashby Et Sélection Multicontrainte*  
*[Selection Of Materials For A Lightweight, Rigid Slab That  
Provides Thermal Insulation And Resists Mechanical Vibrations  
Using The Ashby Method And Multi-Stress Analysis]*

Franck Ulrich Rakotonandrasana<sup>1</sup>, Lantolalaina Rakotomavo<sup>2</sup>, Riantsoa Nasandratra Rakotolahy<sup>3</sup>, Gabriely Ranaivoniarivo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université d'Antananarivo

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et Innovation

<sup>2</sup>Université d'Antananarivo

Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences

<sup>3</sup>Université d'Antananarivo

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et Innovation

<sup>4</sup>Université d'Antananarivo

Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et Innovation

Correspondent author : Franck Ulrich Rakotonandrasana, [drbibeaubelle@gmail.com](mailto:drbibeaubelle@gmail.com)



**Résumé - :** Cet article propose une démarche rationnelle de sélection des matériaux pour la conception d'une dalle légère, rigide, résistante aux vibrations et présentant une bonne isolation thermique. La méthode adoptée s'appuie sur l'approche d'Ashby et sur une sélection multi-contraintes intégrant la masse volumique, le module d'Young, la conductivité thermique et les fréquences naturelles. Les résultats montrent que les matériaux très rigides, comme le béton armé, ne sont pas toujours les plus adaptés lorsqu'ils sont pénalisés par une masse élevée et une faible performance thermique. Les matériaux isolants offrent de bonnes performances thermiques, mais nécessitent généralement une association avec un matériau porteur. Les solutions les plus pertinentes sont donc les systèmes mixtes combinant un matériau structural léger, comme le bois massif, le béton léger ou le béton à polystyrène, avec un isolant performant.

**Mots clés - :** sélection des matériaux ; méthode d'Ashby ; dalle légère ; rigidité ; vibrations ; isolation thermique.

**Abstract - :** This paper proposes a rational material selection approach for the design of a lightweight, rigid, vibration-resistant slab with good thermal insulation performance. The adopted method is based on Ashby's approach and a multi-constraint selection process integrating density, Young's modulus, thermal conductivity, and natural frequencies. The results show that highly rigid materials, such as reinforced concrete, are not always the most suitable when they are penalized by high density and poor thermal performance. Insulating materials provide good thermal performance, but they generally need to be combined with a load-bearing material. Therefore, the most relevant solutions are mixed systems combining a lightweight structural material, such as solid wood, lightweight concrete or polystyrene concrete, with an efficient insulating material.

**Key words:** material selection; Ashby method; lightweight slab; stiffness; vibrations; thermal insulation.

## 1. INTRODUCTION

L'émergence de nouveaux matériaux a profondément transformé le domaine de la construction, en permettant la conception de bâtiments plus performants, plus durables et adaptés à des exigences architecturales de plus en plus complexes. Le choix des matériaux constitue ainsi une étape essentielle dans tout projet de bâtiment, car il influence directement la résistance mécanique, la sécurité, la durabilité, le coût, le confort des usagers ainsi que l'impact environnemental de l'ouvrage [1].

À Madagascar, la conception et la réalisation des bâtiments reposent encore largement sur l'expérience empirique, les habitudes constructives et la disponibilité locale des matériaux. Le recours aux outils numériques et aux méthodes rationnelles de sélection reste relativement limité. Cette situation peut conduire à des choix de matériaux peu optimisés, notamment lorsque plusieurs contraintes doivent être prises en compte simultanément, telles que la résistance, le coût, la durabilité, la facilité de mise en œuvre, la disponibilité, l'entretien et les conditions climatiques locales.

Dans ce contexte, la sélection des matériaux ne peut plus se limiter à des critères isolés ou à des essais expérimentaux rudimentaires [1]. Elle nécessite une démarche structurée permettant d'identifier les fonctions attendues de chaque élément du bâtiment, de définir les contraintes auxquelles ces éléments sont soumis et de comparer objectivement les matériaux disponibles. Parmi les méthodes existantes, la méthode d'Ashby propose une approche rationnelle fondée sur la définition de la fonction, des objectifs, des contraintes et des indices de performance [2] [3]. Par ailleurs, les approches multi-contraintes permettent d'intégrer plusieurs exigences techniques, économiques et environnementales dans le processus de décision.

Ces méthodologies sont principalement utilisées dans le domaine de l'ingénierie mécanique et de la conception de produits. Toutefois, leur adaptation au domaine du bâtiment présente un intérêt particulier, notamment pour améliorer la sélection des matériaux utilisés dans les fondations, les poteaux, les poutres, les planchers, les murs, les toitures et les autres composants constructifs. Dans le cadre de cette étude, l'attention est portée uniquement sur la dalle. Ce choix se justifie par son rôle important dans la transmission des charges, la répartition des efforts, la rigidité de l'ouvrage et le confort des usagers.

La question de recherche qui se pose est donc la suivante : dans quelle mesure la combinaison de la méthode d'Ashby et d'une approche multi-contrainte peut-elle permettre une sélection rationnelle et adaptée des matériaux pour les différents éléments d'un bâtiment à Madagascar, notamment pour une dalle légère ?

Cette étude propose une méthodologie rationnelle de sélection des matériaux selon la méthode d'Ashby [1], appliquée au cas d'une dalle légère, rigide, résistante aux vibrations et présentant une bonne isolation thermique dans le contexte du bâtiment à Madagascar. Pour atteindre cet objectif, il convient d'abord d'identifier les principaux éléments constitutifs d'un bâtiment ainsi que les contraintes mécaniques, économiques, environnementales et fonctionnelles qui leur sont associées. Ensuite, les données relatives aux matériaux doivent être structurées afin de faciliter leur comparaison. Une formulation générale des indices de performance est ensuite proposée pour évaluer l'aptitude des matériaux selon leur application. Les résultats obtenus permettent d'établir une vision globale des matériaux capables d'assurer les fonctions requises. Enfin, une discussion est menée afin de valider les choix retenus et d'apprécier la pertinence de la méthodologie proposée dans le contexte du bâtiment à Madagascar.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1 Démarche méthodologique

La méthodologie adoptée dans cette étude vise à établir une démarche rationnelle de sélection des matériaux destinés à la conception d'une dalle légère, rigide, isolant thermique et capable de résister aux vibrations mécaniques. Elle s'appuie sur une adaptation de la méthode d'Ashby [2] [3], associée à une approche multi-contrainte [4] permettant d'intégrer simultanément les exigences mécaniques, physiques et pratiques liées au contexte du bâtiment. La première étape consiste à énumérer les principaux éléments constitutifs d'un bâtiment, tels que les fondations, les poteaux, les poutres, les murs, les planchers, les dalles et les toitures. Cette analyse préliminaire permet de comprendre le rôle de chaque élément dans la stabilité et le fonctionnement global de l'ouvrage. La dalle étudiée doit répondre à trois exigences principales : être légère, présenter une bonne rigidité et résister efficacement aux vibrations mécaniques. Ces exigences orientent la suite de la démarche de sélection des matériaux. Après avoir

ciblé l'élément étudié, il est nécessaire d'identifier les contraintes auxquelles la dalle sera soumise à savoir les contraintes mécaniques, physiques et environnementaux. Cette étape permet donc de préciser les critères qui serviront de base à la sélection des matériaux candidats.

La deuxième étape consiste à rassembler les données nécessaires à l'évaluation des matériaux. Les informations sont collectées à partir de différentes ressources disponibles, notamment les fiches techniques des fabricants, les ouvrages spécialisés, les manuels de matériaux, les bases documentaires existantes ainsi que les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire, notamment au niveau du CNRIT. Les données recherchées concernent principalement les propriétés mécaniques, physiques et pratiques des matériaux. Pour une dalle légère résistante aux vibrations, les grandeurs les plus importantes sont notamment la masse volumique, le module d'élasticité, la résistance mécanique, le comportement en flexion, la capacité d'amortissement, le coût et la disponibilité. Cette phase de collecte doit être menée avec rigueur, car la qualité de la sélection dépend directement de la fiabilité des données utilisées. Une fois les données recueillies, elles doivent être vérifiées avant d'être intégrées dans la démarche de sélection. La validation consiste à s'assurer que les valeurs obtenues sont cohérentes, comparables et suffisamment fiables pour être exploitées. La démarche de validation suit une logique progressive. Les données issues des essais expérimentaux, des fiches techniques et des références bibliographiques sont d'abord comparées entre elles. Ensuite, une analyse statistique peut être réalisée afin d'identifier les valeurs moyennes, les écarts éventuels et les données aberrantes [4] [5]. Les propriétés validées permettent alors d'autoriser l'utilisation du matériau dans le processus de sélection. Cette étape joue un rôle important, car elle permet d'éviter l'utilisation de valeurs imprécises ou non représentatives. Elle garantit ainsi que les matériaux retenus pour la suite de l'étude reposent sur des informations techniquement acceptables.

Après validation, les données sont organisées selon une structure hiérarchique permettant de faciliter leur traitement. Cette structuration peut être inspirée d'une classification de type : royaume, famille, classe, sous-classe, membre et attributs [1]. Dans cette organisation, les matériaux sont d'abord regroupés par grandes familles, par exemple les métaux, les polymères, les céramiques, les composites, les matériaux cimentaires ou les matériaux naturels. Chaque famille est ensuite divisée en classes et sous-classes plus précises. Les matériaux étudiés sont enfin définis comme des membres appartenant à une catégorie donnée, avec leurs attributs propres. Les attributs correspondent aux propriétés nécessaires à la sélection. Cette structuration permet de constituer une base de données claire, exploitable et adaptée à la méthode de sélection [2] [3].

La sélection des matériaux repose ensuite sur la formulation du problème selon la méthode d'Ashby. Cette étape consiste à définir clairement la fonction de l'élément étudié, l'objectif à optimiser et les contraintes à respecter. Les contraintes imposées peuvent inclure une résistance minimale, une flèche admissible, une fréquence propre suffisante, une rigidité minimale. Cette formulation permet de traduire le problème de sélection en un problème technique mesurable.

À partir de la fonction, de l'objectif et des contraintes définis précédemment, un indice de performance est établi. Cet indice permet de comparer les matériaux entre eux selon leur aptitude à satisfaire les exigences de la dalle légère. L'indice de performance sert ainsi d'outil de classement [2] [3]. Il permet d'identifier les matériaux qui offrent le meilleur compromis entre légèreté, rigidité, résistance mécanique et comportement vibratoire.

La dernière étape consiste à représenter les matériaux à l'aide d'un diagramme de sélection. Ce diagramme permet de visualiser les performances relatives des matériaux en fonction des propriétés retenues. Les matériaux qui ne respectent pas les contraintes minimales sont éliminés. Les matériaux restants sont ensuite comparés à partir de leur indice de performance. Cette représentation graphique facilite l'identification des matériaux les plus adaptés à la conception d'une dalle légère, rigide et résistante aux vibrations mécaniques. Le diagramme de sélection permet ainsi de passer d'une simple comparaison de données à une décision argumentée. Il constitue l'outil final d'aide au choix du matériau le plus performant pour l'application étudiée.

## 2.2 Eléments de bâtiments et contraintes

Un bâtiment est un système technique constitué d'ensembles de sous-ensembles et de composants, assemblés de façon à accomplir une tâche requise. La sélection des matériaux se fait donc au niveau de chaque composant. Le bâtiment est composé suivant la figure ci-après [3] [6].

<b>Fondations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semelles</li> <li>• Radiers</li> <li>• Pieux</li> <li>• Longrines</li> </ul>
<b>Poteaux</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton</li> <li>• Armatures</li> <li>• Profilés métalliques</li> <li>• Connecteurs</li> </ul>
<b>Poutres</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Béton</li> <li>• Acier</li> <li>• Bois</li> <li>• Armatures</li> </ul>
<b>Dalles</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matrice cimentaire</li> <li>• Granulats légers</li> <li>• Armatures</li> <li>• Poutrelles</li> </ul>
<b>Murs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remplissage</li> <li>• Mortiers</li> <li>• Liants</li> <li>• Revêtements</li> </ul>
<b>Toitures</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charpente</li> <li>• Couverture</li> <li>• Isolation</li> <li>• Étanchéité</li> </ul>
<b>Cloisons</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Panneaux</li> <li>• Ossatures</li> <li>• Isolants</li> <li>• Revêtements</li> </ul>
...	

Fig 1 : Les éléments du bâtiment et ses composants (Source : Auteur)

Dans un bâtiment, la dalle constitue un élément essentiel puisqu'elle assure à la fois la reprise des charges, leur répartition vers les éléments porteurs et la séparation horizontale entre les niveaux. Lorsqu'il s'agit d'une dalle légère, les exigences deviennent plus particulières, car le matériau choisi doit permettre de réduire le poids propre de l'ouvrage tout en conservant une rigidité suffisante et une bonne résistance aux sollicitations mécaniques. La sélection des matériaux doit donc tenir compte de plusieurs contraintes qui influencent directement la performance et la durabilité de la dalle.

- Contraintes mécaniques

Les contraintes mécaniques sont les plus importantes dans le cas d'une dalle légère. La dalle doit être capable de supporter les charges permanentes, comme son propre poids, les revêtements et les cloisons, ainsi que les charges d'exploitation liées à l'usage du bâtiment. La légèreté recherchée ne doit pas entraîner une diminution excessive de la résistance. Le matériau doit donc présenter une résistance suffisante à la compression, à la traction et surtout à la flexion, car une dalle travaille principalement sous l'effet des charges verticales. La rigidité constitue également un critère essentiel. Une dalle trop souple peut provoquer des déformations importantes, des fissurations, une sensation d'inconfort ou une perte de performance structurale. Ainsi, le matériau doit offrir un bon compromis entre faible masse volumique, résistance mécanique élevée et module d'élasticité suffisant.

- Contraintes liées aux déformations

Une dalle légère doit limiter les déformations sous charge. Même si un matériau possède une bonne résistance à la rupture, il peut être inadapté s'il se déforme trop pendant son utilisation. La flèche admissible devient donc une contrainte importante dans

le dimensionnement et dans la sélection du matériau. Une déformation excessive peut entraîner des désordres au niveau des revêtements, des cloisons, des plafonds ou des éléments de finition. Elle peut aussi nuire au confort des occupants. Pour cette raison, la sélection du matériau doit tenir compte non seulement de sa résistance, mais aussi de sa capacité à conserver une géométrie stable sous l'effet des charges appliquées.

- Contraintes vibratoires

Dans le cas d'une dalle légère, la résistance aux vibrations mécaniques est une contrainte particulièrement importante. En effet, la diminution de la masse peut rendre la dalle plus sensible aux vibrations produites par la marche des occupants, les machines, les équipements techniques ou certaines sollicitations dynamiques. La dalle doit donc présenter une fréquence propre suffisamment élevée afin d'éviter les phénomènes de résonance. Elle doit également disposer d'une capacité d'amortissement acceptable pour limiter la propagation et l'amplification des vibrations. Un matériau trop léger mais insuffisamment rigide peut provoquer des vibrations perceptibles, gênantes ou même préjudiciables à long terme. La sélection du matériau doit alors privilégier les matériaux présentant une bonne rigidité spécifique, c'est-à-dire une rigidité élevée par rapport à leur masse, ainsi qu'un comportement dynamique compatible avec l'usage du bâtiment.

- Contraintes de masse

L'objectif principal d'une dalle légère est de réduire le poids propre de la structure. Cette réduction permet de diminuer les charges transmises aux poutres, aux poteaux et aux fondations. Elle peut aussi faciliter la mise en œuvre, réduire les coûts de transport et permettre une construction plus rapide. Cependant, cette réduction de masse ne doit pas compromettre la stabilité ni la sécurité de l'ouvrage. La contrainte de masse doit donc être analysée en relation avec les autres contraintes, notamment la rigidité, la résistance mécanique et le comportement vibratoire. Le matériau idéal n'est pas simplement le plus léger, mais celui qui offre le meilleur équilibre entre légèreté et performance structurale.

- Contrainte thermique

Dans le cas d'une dalle légère, les contraintes thermiques doivent également être prises en compte, car la dalle participe au confort thermique du bâtiment et à la limitation des échanges de chaleur entre deux milieux. Le matériau choisi doit donc permettre de réduire les pertes thermiques tout en conservant les performances mécaniques nécessaires. Elle dépend principalement de l'épaisseur de la dalle et de la conductivité thermique du matériau. Pour assurer une bonne isolation, le matériau doit présenter une faible conductivité thermique, tout en ayant une masse volumique compatible avec l'objectif de légèreté.

### 2.3 Source et validation de données

Plusieurs sources de données permettent d'affiner le choix de matériaux performants répondant aux exigences de la conception. Les bases de données spécialisées en ligne, ainsi que certains logiciels de simulation disposant de bibliothèques de matériaux intégrées, constituent des ressources essentielles. Les fiches techniques des fournisseurs apportent des informations complémentaires, notamment sur des propriétés difficilement quantifiables. Les manuels et ouvrages de référence servent de guides méthodologiques pour la conception [4] [7]. Enfin, dans un contexte environnemental favorisant l'usage de matériaux locaux, la collaboration avec les centres de recherche CNRIT et les laboratoires nationaux représente une source de données stratégique et durable.



Fig 2 : Source de données et d'information dans un logiciel (Source : Auteur)

Un long périple devrait être suivi par les données avant d'être jugé comme « Connaissance » ; qui est donc admissible dans la base de données de sélection des matériaux. Un matériau est testé et les données sont saisies. Mais ces données brutes sont, pour nos besoins, inutiles. Pour les rendre utiles, il faut procéder à une analyse statistique répondant aux questions : Quelle est la valeur moyenne de chaque propriété lorsqu'elle est mesurée sur un grand nombre d'échantillons ? Quel est l'écart-type ? À partir de là, il est possible de calculer les valeurs admissibles, c'est-à-dire les valeurs de propriétés qui, avec une certitude donnée, peuvent être garanties. Les normes et les réglementations définissent les lignes directrices de conceptions, qui définissent l'application Potentielles de ces matériaux, mais les analyses tels que les analyses économiques et des rentabilités donc des informations spécifiques nous évalue la connaissance de ces matériaux.

## 2.4 Structuration des données

Le royaume des matériaux est divisé en familles, classes, sous-classes et membres. Chaque membre est caractérisé par un ensemble d'attribut : ses propriétés

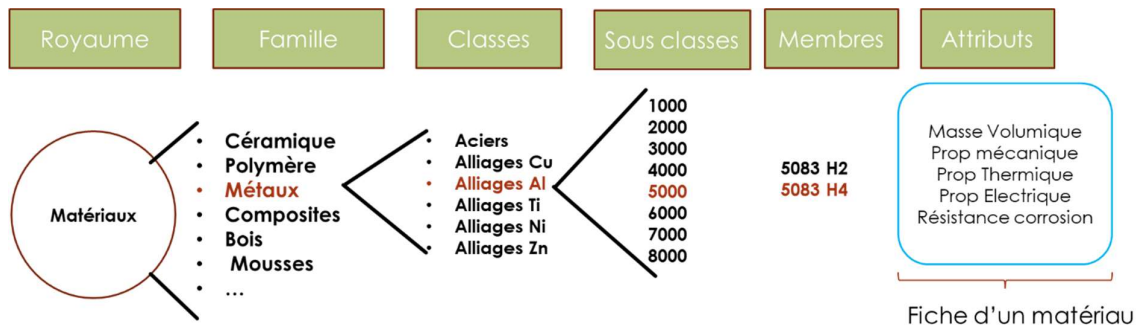


Fig 3 : Taxonomie du royaume des matériaux et leurs attributs (Source : Auteur)

Dans cette organisation, les matériaux sont d'abord regroupés par grandes familles, par exemple les métaux, les polymères, les céramiques, les composites, les matériaux cimentaires ou les matériaux naturels. Chaque famille est ensuite divisée en classes et sous-classes plus précises. Les matériaux étudiés sont enfin définis comme des membres appartenant à une catégorie donnée, avec leurs attributs propres.

Un indice de performance est une combinaison de propriétés qui caractérise la performance d'un matériau pour une application donnée. Le tableau suivant dicte les étapes clés de la sélection des matériaux. Donc pour chaque élément du système technique bâtiment, il nous faut suivre ces étapes.

## 2.5 Etapes de sélection

La sélection des matériaux suit une démarche progressive permettant de passer du besoin réel de l'élément étudié vers le choix du matériau le plus adapté. Dans cette étude, cette démarche est appliquée à une dalle légère, rigide et résistante aux vibrations mécaniques tout en satisfaisant une bonne isolation thermique.

### 2.5.1 Définir la fonction de l'objet

La première étape consiste à préciser le rôle de l'élément étudié. Il s'agit de répondre à la question : à quoi sert cet élément ? [4] [8]. Dans le cas d'une dalle, sa fonction principale est d'assurer la tenue dynamique de la dalle : supporter les charges statiques et minimiser la réponse vibratoire (éviter la résonance, limiter l'amplitude vibratoire).

### 2.5.2 Définir l'objectif à optimiser

Après avoir identifié la fonction, il faut déterminer ce que l'on cherche à améliorer ou à optimiser [9]. Cette étape répond à la question : quel est le principal objectif du choix du matériau ? Pour une dalle légère et rigide, l'objectif ici est de maximiser la fréquence naturelle  $f_n$  de la dalle pour réduire le risque de résonance avec les sources de vibration externes, c'est-à-dire la fréquence propre à laquelle la dalle vibre librement lorsqu'elle est excitée par une perturbation (choc, pas, machine, séisme), sans action extérieure continue. Aussi, le second objectif est de minimiser la conductivité thermique des matériaux pour que la dalle soit la plus isolante possible.

### 2.5.3 Identifier les contraintes à respecter

La troisième étape consiste à définir les limites et les conditions que le matériau doit respecter [1] [4] [7]. La dalle étudiée est destinée à un bâtiment administratif, ce qui signifie qu'elle doit supporter les charges liées à l'usage courant des locaux, comme la circulation des personnes, le mobilier et les équipements. Sa géométrie est considérée comme imposée, avec une longueur caractéristique  $L$  et une épaisseur  $e$ , qui servent de base au dimensionnement. Dans ce contexte, le critère principal à prendre en compte est la rigidité en flexion, car la dalle doit limiter les déformations sous charge et conserver une bonne stabilité pendant son utilisation. Le choix du matériau doit donc permettre d'obtenir une dalle suffisamment rigide, tout en respectant les exigences de légèreté et de confort propres à ce type de bâtiment.

### 2.5.4 Établir les relations physiques du problème

Une fois la fonction, l'objectif et les contraintes définis, il faut identifier les lois physiques qui décrivent le comportement de l'élément étudié [1] [10]. Pour une bande de la dalle de largeur de  $b = 1m$  modélisée en poutre d'Euler-Bernoulli simplement appuyée, l'équation de la pulsation naturelle  $\omega_n$  en rad/s avec  $k$  : Raideur dynamique en N/m et  $m$  : Masse équivalente en Kg :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1)$$

La raideur dynamique est donnée suivant le Module de Young  $E$  en MPa et de portée principale de la dalle en  $m$   $L$  avec un moment d'inertie  $I$

$$k = \frac{48EI}{L^3} \quad (2)$$

La masse est définie par

$$m = \rho \cdot b \cdot L \cdot e \quad (3)$$

$\rho$  est la masse volumique en  $\text{Kg/m}^3$

b la largeur de la dalle en m

L longueur de la dalle en m

e l'épaisseur de la dalle en m

Le moment d'inertie sectionnel est

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{48EI}{\rho \cdot e \cdot L^3}} \quad (5)$$

### 2.5.5 Exprimer l'objectif sous forme mathématique

L'objectif doit ensuite être traduit sous une forme exploitable. Pour cela, on exprime la performance recherchée en fonction de trois éléments principaux : les exigences fonctionnelles, la géométrie et les propriétés du matériau.

$$P = f(F, G, M) = f1(F) f2(G) f3(M) \quad (6)$$

où F représente le paramètre fonctionnel, G la géométrie et M les paramètres propres aux matériaux. Cette expression permet d'isoler progressivement la partie liée au matériau afin de comparer les matériaux entre eux.

$$D'où Fn1 = \frac{e}{\pi} \cdot \frac{1}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (7)$$

Fn1 décrit la fréquence naturelle en Hz

## 2.6 Détermination de l'indice de performance

L'indice de performance permet de comparer et de classer les matériaux selon leur capacité à répondre aux exigences de l'étude. Il est obtenu en isolant, dans l'expression de dimensionnement, les propriétés propres au matériau.

### 2.6.1 Indice de performance vibratoire

Dans cette étude, l'indice retenu vise à identifier les matériaux capables de supporter les charges statiques tout en réduisant la réponse vibratoire de la dalle. En effet, pour limiter le risque de résonance, il faut éviter que la fréquence naturelle de la dalle soit proche de la fréquence d'excitation extérieure [11] [10]. L'objectif est donc d'augmenter la fréquence naturelle  $F_{n1}$  afin de diminuer l'amplitude des vibrations.

Comme l'épaisseur « e » et la géométrie de la dalle sont imposées, l'amélioration de la performance dynamique dépend essentiellement des propriétés du matériau. Ainsi, maximiser la fréquence naturelle revient à maximiser l'indice  $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ , où E représente le module d'élasticité et  $\rho$  la masse volumique.

L'indice de performance pour une dalle rigide et dalle résistant aux vibrations mécaniques est donc

$$I_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

Aussi, de la même manière, en tenant compte de la fonction principale de dalle de supporter les charges statiques tout en limitant sa réponse vibratoire qui signifie que la dalle doit simultanément supporter les charges statiques ; limiter les vibrations, aussi elle serait apte à éviter la résonance tout conservant une bonne rigidité et une légère qui devrait être la plus optimale possible. L'objectif est de choisir un matériau qui permet d'obtenir une fréquence propre élevée. L'indice de performance associé à cet objectif est formulé pour maximiser la fréquence propre sous contrainte de masse limitée, c'est-à-dire que la masse de la dalle doit être la plus minimale possible, donc :

$$I_2 = \frac{1}{\rho} \frac{E^2}{\rho} \quad (9)$$

Pour éviter la résonance, il faut que la fréquence propre de la dalle soit suffisamment éloignée de la fréquence d'excitation. L'objectif est donc de maximiser

$$Fn_2 = \frac{\pi}{2L^2 \cdot \sqrt{12}} \cdot \sqrt{e} \cdot \frac{1}{\rho} \frac{E^2}{\rho} \quad (10)$$

Ce qui revient à maximiser l'indice de performance  $I_2$ .

Pour réduire le risque de résonance, la dalle doit présenter une fréquence propre suffisante. L'objectif dynamique est donc d'obtenir une fréquence propre suffisamment élevée afin de limiter l'amplitude des vibrations donc la fonction objective devient

$$Fn_3 = \frac{\pi^2}{4L^4 \cdot 12} e \cdot \frac{E}{\rho} \quad \text{donc } I_3 = \frac{E}{\rho} \quad (8)$$

Cela signifie que maximiser la valeur  $I_3$  permet de sélectionner les meilleurs matériaux qui possèdent les valeurs élevées de  $Fn_3$ .

En fait, les fréquences naturelles sont indiquées afin d'évaluer leur comportement dynamique face aux sollicitations vibratoires.

### 2.6.2 Indice de performance rigidité en flexion

Pour que la dalle soit suffisamment légère, rigide et isolant thermique, il nous faut déterminer un indice de performance pour un plancher rigide et léger à partir de l'objectif

$$m_1 = D^{\frac{1}{3}} \cdot A \cdot \frac{\rho}{E^{1/3}} = D^{\frac{1}{3}} \cdot bL \cdot \frac{\rho}{E^{1/3}} \quad (12)$$

Où  $D$  étant la rigidité en flexion minimale de la dalle exigée par le cahier des charges. Cela conduit à l'indice :

$$I_4 = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (9)$$

La masse calculée considère la masse surfacique c'est-à-dire  $b=1m$  et  $L=1m$ , cela mène à :

$$m_{s1} = D^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{\rho}{E^{1/3}} \quad (14)$$

De ce fait,  $m_{s1}$  minimise évidemment la masse pour ainsi réduire le coût, poids et l'impact environnemental.

### 2.6.3 Indice de performance en isolation thermique

- Résistance thermique pour dalle multicouche

Un système d'optimisation demande à assembler plusieurs couches dans la dalle afin d'avoir une résistance thermique optimale associant à la rigidité. Afin d'évaluer cette variation, il faudrait faire varier la composition en béton et en isolant. La résistance thermique  $R$  étant de formule générale [6] [12] :

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (15)$$

Pour une dalle multicouche, la résistance thermique totale se calcule par :

$$R_{total} = \sum R_i = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (16)$$

Cette méthode de calcul revient à imposer l'épaisseur de la dalle et faire varier la proportion de béton afin d'aboutir à la résistance totale.

- Variation massique

En règle générale, l'isolation thermique se base sur l'optimisation de la masse. L'objectif est de trouver un matériau qui combine une faible masse volumique  $\rho$  et une faible conductivité thermique  $\lambda$  vient de l'expression :

$$m_2 = A \cdot R \cdot \lambda \rho = R \cdot bL \cdot \lambda \rho \quad (17)$$

En considérant la masse surfacique, l'équation devient :

$$m_{s2} = A \cdot R \cdot \lambda \rho = R \cdot \lambda \rho \quad (18)$$

Cela conduit à l'indice de performance :

$$I_s = \frac{1}{\lambda \rho} \quad (19)$$

Cette méthode de calcul vise à imposer la résistance thermique totale à l'idéal et de voir la variation de masse et d'épaisseur.

## 2.7 Sélection multi-contraintes

Pour une sélection multi-contraintes pour une dalle légère, résistante aux vibrations et rigide, on adopte les méthodes systématiques de traitement des contraintes multiples qui stipulent qu'il est autorisé à prendre le maximum de chaque indice performance des matériaux, il suffit donc de choisir le matériau qui possède la valeur maximale de la fréquence naturelle pour les trois objectifs de conception :

$$F_n = \text{Max} (F_{n1} ; F_{n2} ; F_{n3}) \quad (10)$$

Aussi, pour conférer à cette dalle une isolation thermique, l'objectif est donc de maximiser les indices de performances qui est équivalent à dire de minimiser la fonction de l'objectif :

$$M = \text{Min} (m_1 ; m_2) \quad (11)$$

## 2.8 Choisir le matériau à l'aide des diagrammes de sélection

La dernière étape consiste à utiliser les diagrammes de sélection des matériaux [1] [7]. Ces diagrammes permettent de représenter graphiquement les matériaux selon leurs propriétés, par exemple le module d'élasticité en fonction de la masse volumique, ou la masse volumique en fonction de la conductivité.

Les matériaux qui ne respectent pas les contraintes minimales sont éliminés. Les matériaux restants sont ensuite comparés à l'aide de l'indice de performance. Le choix final porte sur le matériau qui répond le mieux aux exigences de la dalle légère, c'est-à-dire celui qui présente le meilleur compromis entre légèreté, rigidité, résistance mécanique, comportement vibratoire, coût et disponibilité.

Cette démarche permet donc de passer d'un choix empirique à une sélection rationnelle, justifiée par des critères techniques et mesurables.

## 2.9 Données utilisées

Dans le cadre de calcul, les données des matériaux échantillons de calculs sont récoltés à partir des sources. Cet article se focalise sur les matériaux propices pour atteindre l'objectif. Voici les données nécessaires aux calculs :

Tableau 1: Caractéristique des matériaux étudiées (Source : Auteur)

Matériau	Famille / rôle principal	$\rho$ en $\text{kg/m}^3$	(E) MPa	$\lambda$ en $\text{W/m.K}$
Bois massif	Matériau structurel léger	600	11 000	0,130
Béton à polystyrène	Matériau cimentaire allégé	700	5 000	0,150
Béton léger	Matériau cimentaire léger	1 500	15 000	0,400
Terre cuite	Matériau minéral / maçonnerie	1 750	10 000	0,700
Béton armé	Matériau structurel courant	2 500	21 000	1,700
Polyuréthane	Matériau isolant	45	7	0,022
Polystyrène	Matériau isolant	30	50	0,033
Ouate de cellulose	Matériau isolant biosourcé	55	1	0,039
Aérogel de silice	Matériau isolant très performant	150	2	0,015
Laine de verre	Matériau isolant fibreux	75	2	0,032

Ces données constituent la base d'entrée de la méthode de sélection. Elles sont ensuite utilisées pour calculer les indices de performance liés aux objectifs de conception : légèreté, rigidité, résistance aux vibrations et isolation thermique. La variation de la résistance thermique détermine la capacité d'isolation de la dalle :

Tableau 2: Signification de la valeur de la résistance thermique (Source : Auteur)

Valeur de (R) en $\text{m}^2.\text{K/W}$	Signification thermique	Interprétation pour une dalle
( $R < 0,5$ )	Très faible isolation	Matériau peu isolant, généralement structurel ou conducteur
( $0,5 < R < 1$ )	Faible isolation	Amélioration thermique limitée
( $1 < R < 2$ )	Isolation moyenne	Performance acceptable pour une comparaison théorique
( $2 < R < 3$ )	Bonne isolation	Exigence déjà difficile à atteindre avec un matériau structurel seul
( $R > 3$ )	Très bonne isolation	Niveau visé dans cette étude pour une dalle isolante performante

La valeur retenue dans le calcul lors de l'imposition de la résistance thermique est  $R = 3$ . Cette valeur permet d'évaluer la capacité des matériaux à satisfaire une exigence thermique élevée. Elle met également en évidence la limite des matériaux structurels utilisés seuls. L'épaisseur de la dalle influence directement la masse, la rigidité, la résistance thermique et le comportement vibratoire. Voici la signification de la variation de l'épaisseur :

Tableau 3: Signification de la variation de l'épaisseur de dalle (Source : Auteur)

Épaisseur de dalle	Épaisseur en m	Signification constructive	Effet principal
5 cm	0,05 m	Dalle très mince	Masse faible, mais rigidité et isolation limitées
10 cm	0,10 m	Dalle mince	Solution légère, mais nécessitant une vérification mécanique
15 cm	0,15 m	Dalle courante légère	Compromis possible entre masse et rigidité

17 cm	0,17 m	Épaisseur limite précédemment étudiée	Bonne base pour vérifier la masse surfacique et la rigidité
20 cm	0,20 m	Dalle plus rigide	Meilleure rigidité, mais masse plus élevée
25 cm	0,25 m	Dalle épaisse	Rigidité importante, masse élevée
30 cm	0,30 m	Épaisseur maximale retenue dans l'étude	Adaptée à une solution multicouche structure + isolant

L'étude de la vibration en prend en compte qu'un seul matériau. C'est pourquoi l'épaisseur imposée est de 17cm alliant une épaisseur modérée, rigidité et une légèreté. Cependant, dans l'étude d'une structure multicouche, l'épaisseur admise est de 30cm qui s'adapte à la situation.

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### 3.1 Résultats

Les résultats de la sélection des matériaux pour la conception d'une dalle légère, rigide et résistante aux vibrations mécaniques toute en satisfaisant une bonne isolation thermique sont présentés par des diagrammes de sélection et des tableaux des sélections multi-contraintes pour valider le choix final des matériaux à prendre en compte.

##### 3.1.1 Performance pour dalle légère, résistante aux vibrations et rigide.

La figure suivante est une carte de sélection des matériaux. Elle met en relation deux propriétés importantes des matériaux : la masse volumique  $\rho$  exprimée en T/m<sup>3</sup>, et le module d'Young (E), exprimé en GPa.

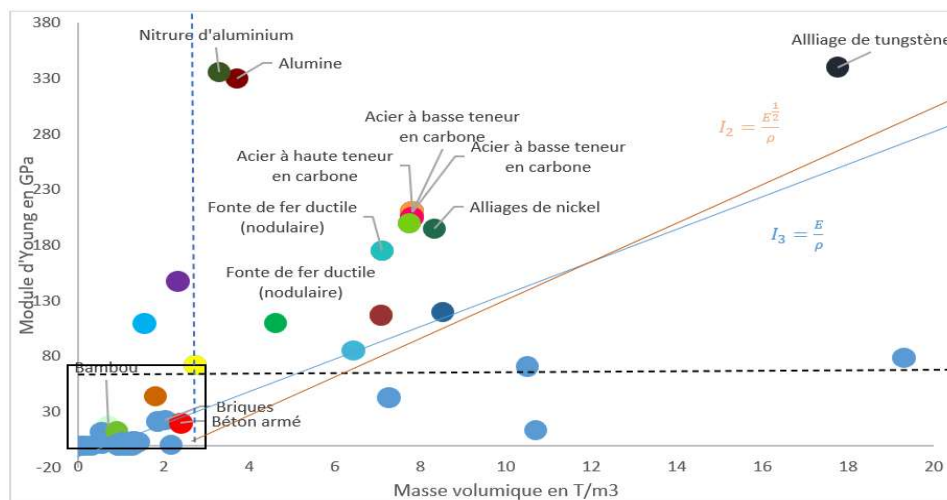


Fig 4: Légèreté Vs Rigidité pour plancher (Source : Auteur)

L'axe horizontal représente la masse volumique et l'axe vertical représente le module d'Young, qui caractérise la rigidité du matériau. Ainsi, chaque point placé sur le graphique correspond à une combinaison donnée entre ces deux propriétés. Chaque couleur permet de distinguer visuellement un matériau ou une famille de matériaux. Les étiquettes de données placées à côté des points indiquent directement le nom des matériaux représentés comme le bambou, les briques, le béton armé, les fontes ductiles, les aciers, les alliages de nickel, l'alumine, le nitrure d'aluminium et l'alliage de tungstène. La figure comporte également des droites appelées droites des indices de performance. Elles sont notées  $I_2$  et  $I_3$ ,  $I_1$  n'étant pas présenté car la sélection à partir de

cette droite n'est d'autre que celle donnée par  $I_3$ . Un cadre noir est également représenté dans la partie inférieure gauche du graphique correspond à un module d'Young inférieur à 50 GPa et une masse volumique inférieure à 2,5 T/m<sup>3</sup> et se compose de bambous, briques et bétons armés Il correspond à la zone de sélection définie à partir des limites imposées sur les propriétés des matériaux. Dans cette étude, on s'est fixé comme critères de sélection d'après le cadre visible sur la figure.

Le tableau 4 de sélection multi-contraainte des matériaux concerne le choix d'un matériau pour une dalle légère, résistante aux vibrations et rigide.

Tableau 4 : Sélection Multi-contraainte : une dalle légère, résistante aux vibrations et rigide. (Source : Auteur)

Matériaux	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$F_{n1}$ (Hz)	$F_{n2}$ (Hz)	$F_{n3}$ (Hz)	Max ( $F_{n1}$ ; $F_{n2}$ ; $F_{n3}$ )
Bois massifs	940	11 000	185,11	20,86	119,57	185,11
Béton léger	1400	15 000	177,13	16,36	114,42	177,13
Béton à polystyrène	500	5 000	171,12	26,44	110,54	171,12
Béton armé	2350	21 000	161,76	11,53	104,49	161,76
Terre cuite	1800	10 000	127,54	10,39	82,39	127,54

Les matériaux listés la première colonne est associés à leur masse volumique  $\rho$  respectifs exprimée en Kg/m<sup>3</sup> et dans la troisième colonne donne le module d'Young (E), exprimé en MPa. Les fonctions objectives sont exprimées en Hz et correspondent aux critères utilisés pour la sélection multi-contraainte. La dernière colonne, intitulée Max ( $F_{n1}$  ;  $F_{n2}$  ;  $F_{n3}$ ) indique la valeur maximale obtenue parmi les trois fonctions objectives associées à chaque matériau. Pour le bois massif, les fréquences naturelles calculées sont  $F_{n1} = 185,11$  Hz,  $F_{n2} = 20,86$  Hz et  $F_{n3} = 119,57$  Hz. La valeur maximale parmi ces trois fréquences est 185,11 Hz. Les fréquences naturelles calculées pour le béton léger sont  $F_{n1} = 177,13$  Hz,  $F_{n2} = 16,36$  Hz et  $F_{n3} = 114,42$  Hz donc en prenant le max, il faut prendre 177,13 Hz. Le béton à polystyrène 171,12 ; 26,44 ; 110,54 Hz ; évidemment 171,12 Hz est retenu comme valeur maximale. Le béton armé après calcul, possède des fréquences naturelles  $F_{n1} = 161,76$  Hz,  $F_{n2} = 11,53$  Hz et  $F_{n3} = 104,49$  Hz et La valeur retenue est 161,76 Hz. Et enfin pour la terre cuite, les fréquences calculées sont  $F_{n1} = 127,54$  Hz,  $F_{n2} = 10,39$  Hz et  $F_{n3} = 82,39$  Hz, en prenant le maximal de ces trois fréquences, on a 127,54 Hz.

### 3.1.2 Performance pour dalle léger, rigide et isolant thermique

La figure 5 permet de visualiser les différents matériaux en fonction de deux propriétés dont la masse volumique et la conductivité thermique.

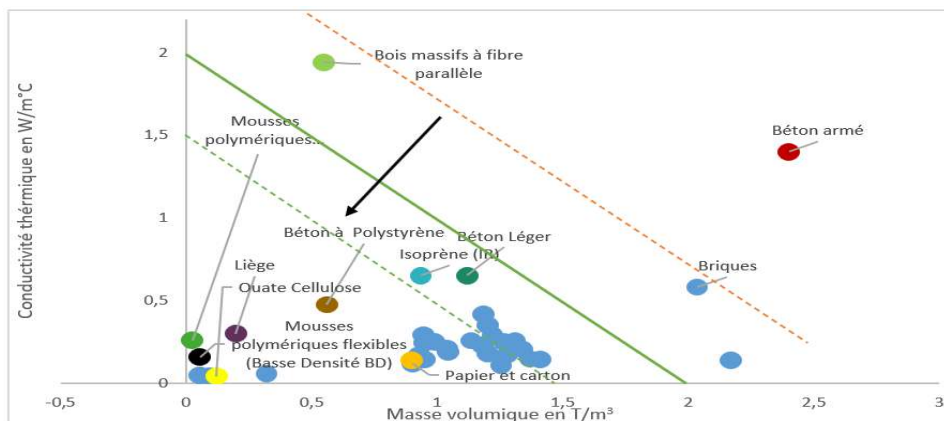


Fig 5 : Masse Volumique Vs Conductivité Thermique pour plancher. (Source : Auteur)

L'axe horizontal correspond à la masse volumique, exprimée en T/m<sup>3</sup> selon l'intitulé de la figure et l'axe vertical représente la conductivité thermique, exprimée en W/m.°C. Les matériaux sont identifiés à l'aide des étiquettes de données placées à proximité des points comme le bois massif à fibre parallèle, le béton armé, les briques, le béton léger, le béton à polystyrène, l'isoprène, le liège, les mousses polymériques flexibles, ainsi que le papier et carton. La droite de pente -1 en vert représente la droite de l'indice de performance  $I_5 = \frac{1}{\lambda \rho}$  partant d'une conductivité 2 à une masse volumique 0 jusqu'à une masse volumique 2 à une conductivité thermique 2. En dessous de cette droite figure le liège, les mousses polymériques flexibles, ainsi que le papier et carton. Au dessus se posent les bois massifs et les bétons armés. Les deux droites parallèles à cette droite qui sont en traits discontinus présentés ici sont des droites appartenant à la même famille que I<sub>5</sub>.

Le tableau correspond à une sélection multi-contraintes des matériaux pour la conception d'un plancher léger, rigide et isolant thermique. Il regroupe plusieurs matériaux candidats et les compare à partir de différentes propriétés.

Tableau 5: Sélection multi-contraintes pour plancher léger, rigide et isolant thermique (Source : Auteur)

Matériaux	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	E (MPa)	$\lambda$ (W/m.K)	m1 (kg)	m2 (kg)	min(m1,m2)
Polyuréthane	45	7	0,022	1 405	119	119
Polystyrène	30	50	0,033	486	119	119
Ouate cellulose	55	1	0,039	3 285	257	257
Aérogel de silice	150	2	0,015	7 111	270	270
Laine de verre	75	2	0,032	3 914	288	288
Bois massif	600	11000	0,13	1 611	9 360	1 611
Béton à polystyrène	700	5000	0,15	2 445	12 600	2 445
Béton léger	1500	15000	0,4	3 633	72 000	3 633
Terre cuite	1750	10000	0,7	4 852	147 000	4 852
Béton armé	2500	21000	1,7	5 413	510 000	5 413

La première colonne indique les matériaux étudiés comme le béton armé, le bois massif, le béton à polystyrène, le béton léger et la terre cuite et quelques matériaux isolants thermique comme l'Aérogel de silice, les ouates cellulose les laines de verre, polystyrènes et les polyuréthanes. La deuxième colonne présente la masse volumique, exprimée en kg/m<sup>3</sup>. La troisième colonne donne le module d'Young, exprimé en MPa. La quatrième colonne, notée  $\lambda$  en W/m.K, correspond à la conductivité thermique de chaque matériau. Les colonnes suivantes, notées m<sub>1</sub> et m<sub>2</sub>, correspondent à l'expression des objectifs utilisés dans la démarche de sélection multi-contraintes. La dernière colonne min (m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>), donne la plus petite valeur entre m<sub>1</sub> et m<sub>2</sub> pour chaque matériau. Les masses calculées pour le polyuréthane sont m<sub>1</sub> = 1 405 kg et m<sub>2</sub> = 119 kg et la valeur minimale est 119 kg. Les masses m<sub>1</sub> = 486 kg et m<sub>2</sub> = 119 kg sont calculés seulement pour le polystyrène ; en prenant la valeur minimale, on prend 119 kg. La Ouate cellulose pour des masses calculés m<sub>1</sub> = 3 285 kg et m<sub>2</sub> = 257 kg, la masse minimale m<sub>1</sub> est donc de 257 Kg. De même pour l'aérogel de silice, les masses respectives sont 7 111 et 270 kg. Aussi, m<sub>1</sub> = 3 914 kg et m<sub>2</sub> = 288 kg sont dédié à la laine de Verre. Pour le bois massif, les masses calculées sont m<sub>1</sub> = 1 611 kg et m<sub>2</sub> = 9 360 kg. La valeur minimale entre m<sub>1</sub> et m<sub>2</sub> est 1 611 kg. Le béton à polystyrène, représente des masses m<sub>1</sub> = 2 445 kg et m<sub>2</sub> = 12 600 kg donc une masse minimale de 2 445 kg. Pour le béton léger, m<sub>1</sub> = 3 633 kg et m<sub>2</sub> = 72 000Kg, qui est une masse admise de 3 633 kg. Pour la terre cuite, Les masses calculées sont m<sub>1</sub> = 4 852 kg et m<sub>2</sub> = 147 000 kg ce qui fait une valeur minimale entre m<sub>1</sub> et m<sub>2</sub> est 4 852 kg. Et enfin le béton armé, dont le max de m<sub>1</sub> = 5 413 kg et m<sub>2</sub> = 510 000 kg est de 5 413 kg.

### 3.1.3 Optimisation de l'isolation de la dalle mixte

La figure présente l'évolution de la résistance thermique totale d'une dalle composée de béton et d'un matériau isolant, pour une épaisseur totale de dalle de 30 cm.

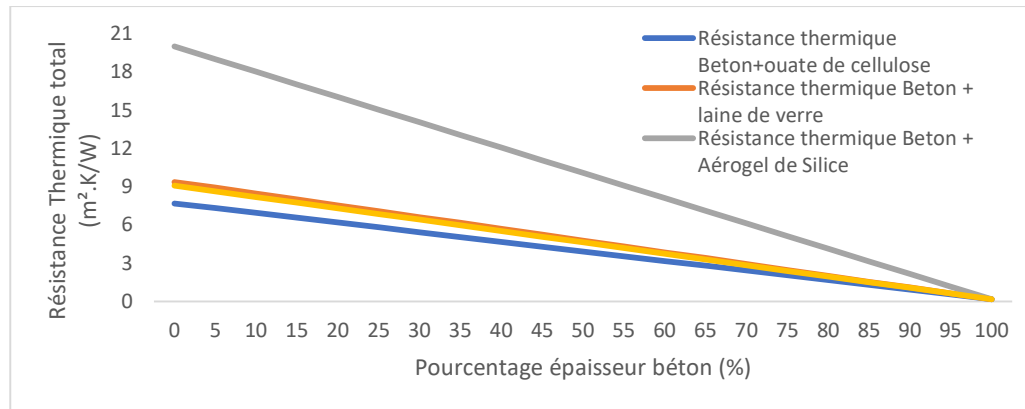


Fig 6 : Comparaison de la résistance thermique des dalles béton–isolant en fonction de l'épaisseur relative du béton ( Source : Auteur)

L'axe horizontal représente le pourcentage de l'épaisseur du béton (%) dans la dalle. et l'axe vertical représente la résistance thermique totale, exprimée en  $m^2.K/W$ .

Toutes les courbes sont linéaires et décroissantes pour se rejoindre à  $0,176 m^2.K/W$ .

Celle qui est colorée en bleu représente la résistance thermique totale d'un béton et d'ouate de cellulose et la résistance thermique qui commence sur  $7,692 m^2.K/W$ . La courbe orange représente la composition d'une dalle béton revêtu d'une laine de verre qui débute à une valeur de résistance de  $m^2.K/W$ . Suivi en dessus, d'une droite colorée en orange qui représente le couple béton, aérogel de silice qui se caractérise par une valeur totale de résistance thermique de  $20,375 m^2.K/W$ . Et enfin la courbe jaune représente la résistance thermique totale de  $9,091 m^2.K/W$  pour la composition béton – polystyrène.

## 3.2 DISCUSSIONS

### 3.2.1 Analyse des résultats

La figure 4 représente un diagramme de sélection des matériaux en fonction de deux propriétés principales : la masse volumique et le module de Young. D'une manière générale, la carte montre que les matériaux ne se répartissent pas au hasard. La tendance globale indique que les matériaux les plus denses présentent souvent une rigidité plus élevée. C'est le cas des aciers, des alliages de nickel, de l'alumine, du nitrure d'aluminium et de l'alliage de tungstène. Cependant, ces matériaux, bien que très rigides, sont pénalisés par leur masse volumique élevée. À l'inverse, les matériaux situés dans la partie inférieure gauche du graphique, comme le bambou, certaines briques et le béton armé, sont beaucoup plus légers, mais leur module d'Young reste relativement faible. Le cadre noir placé dans la partie inférieure gauche de la figure correspond à la zone de sélection imposée par les critères de l'étude, à savoir une masse volumique inférieure à  $2,5 T/m^3$  et un module d'Young inférieur à  $50 GPa$ . Cette zone regroupe principalement les matériaux de construction courants et légers, notamment le bambou, les briques et le béton armé. Elle traduit donc une recherche de matériaux accessibles, relativement légers et compatibles avec une application de type plancher, mais sans viser des niveaux de rigidité très élevés. Le bambou apparaît comme le matériau le plus intéressant du point de vue de la légèreté. Les briques et le béton armé restent des solutions envisageables, surtout dans un contexte de construction traditionnelle ou locale. La figure montre donc que, pour un plancher léger, la sélection doit privilégier les matériaux ayant une faible masse volumique tout en conservant une rigidité suffisante pour assurer la stabilité et le confort d'utilisation.

Le tableau 4 présente une sélection multi-contraînte appliquée au choix d'un matériau pour une dalle légère, rigide et résistante aux vibrations. Aux deux paramètres s'ajoutent trois fonctions objectives, notées  $F_{n1}$ ,  $F_{n2}$  et  $F_{n3}$ , exprimées en Hz, qui permettent d'évaluer le comportement vibratoire des matériaux. Une fréquence naturelle élevée est généralement favorable, car elle permet de limiter les risques de résonance et d'améliorer le confort vibratoire de la dalle. D'après les résultats, le bois massif présente la valeur maximale la plus élevée, avec 185,11 Hz. Il apparaît donc comme le matériau le plus performant du tableau du point de vue vibratoire. Sa masse volumique de  $940 \text{ kg/m}^3$  reste modérée, ce qui constitue un avantage important pour une dalle légère. Son module d'Young de 11 000 MPa est inférieur à celui des bétons, mais il reste suffisant pour certaines applications structurales, surtout lorsque la légèreté et le confort vibratoire sont prioritaires. Le béton léger arrive en deuxième position avec une fréquence maximale de 177,13 Hz. Il possède une masse volumique plus élevée que le bois massif, soit  $1400 \text{ kg/m}^3$ , mais offre une rigidité supérieure avec un module d'Young de 15 000 MPa. Il constitue donc un bon compromis entre rigidité, légèreté relative et comportement vibratoire. Le béton à polystyrène pour  $500 \text{ kg/m}^3$  de masse volumique qui est considéré comme très faible. Sa fréquence maximale atteint 171,12 Hz, ce qui reste élevé. Cependant, son module d'Young est seulement de 5 000 MPa, ce qui signifie qu'il est moins rigide que les autres matériaux. Il peut donc être intéressant pour réduire le poids de la dalle, mais son utilisation doit être vérifiée vis-à-vis des exigences de rigidité et de déformation. Le béton armé possède le module d'Young le plus élevé du tableau, avec 21 000 MPa, ce qui traduit une bonne rigidité pour une masse volumique de  $2350 \text{ kg/m}^3$  qui est également la plus importante dans le tableau. Sa fréquence maximale est de 161,76 Hz, inférieure à celles du bois massif, du béton léger et du béton à polystyrène. Cela montre que la rigidité seule ne suffit pas à garantir la meilleure performance dans une sélection où la légèreté et les vibrations sont également prises en compte. Enfin, la terre cuite présente la performance vibratoire la plus faible, avec une fréquence maximale de 127,54 Hz. Sa masse volumique de  $1800 \text{ kg/m}^3$  reste relativement élevée par rapport au bois massif et au béton à polystyrène, tandis que son module d'Young de 10 000 MPa demeure modéré. Elle apparaît donc moins avantageuse pour une dalle légère et résistante aux vibrations. Le classement obtenu à partir de la valeur maximale des fonctions objectives est le suivant : bois massif, béton léger, béton à polystyrène, béton armé, puis terre cuite. Ce résultat montre que le matériau le plus rigide n'est pas forcément le plus performant dans une approche multi-contraînte. Le béton armé, bien qu'il possède le module d'Young le plus élevé, est pénalisé par sa masse volumique importante. Cette sélection multi-contraînte montre que le choix optimal pour une dalle légère, rigide et résistante aux vibrations ne dépend pas uniquement du module d'Young. Il dépend plutôt de l'équilibre entre faible masse volumique, rigidité suffisante et bonne fréquence naturelle. La figure 5 décrit une carte de sélection des matériaux selon deux propriétés importantes pour la conception d'un plancher : la masse volumique  $\rho$ , exprimée en  $\text{T/m}^3$ , et la conductivité thermique  $\lambda$ , exprimée en  $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ . Ces deux paramètres permettent d'évaluer à la fois la légèreté du matériau et sa capacité à transmettre la chaleur.

Dans le cas d'un plancher, un matériau recherché doit généralement être léger afin de limiter les charges permanentes sur la structure, mais aussi présenter une faible conductivité thermique afin d'améliorer le confort thermique et de réduire les pertes de chaleur. Ainsi, les matériaux les plus intéressants sont ceux situés dans la partie inférieure gauche du graphique, c'est-à-dire ceux ayant à la fois une faible masse volumique et une faible conductivité thermique. La carte montre que les matériaux isolants comme le liège, les mousses polymériques flexibles, la ouate de cellulose, le papier et carton, ainsi que certains matériaux à faible densité, se situent dans cette zone favorable. Leur faible conductivité thermique traduit une bonne capacité d'isolation, tandis que leur faible masse volumique les rend intéressants pour alléger le plancher. Ces matériaux sont donc particulièrement adaptés lorsqu'on cherche à améliorer l'isolation thermique sans augmenter fortement le poids de la structure.

Le béton à polystyrène occupe une position intermédiaire intéressante. Sa masse volumique est plus élevée que celle des isolants purs, mais elle reste relativement faible par rapport aux bétons classiques. Sa conductivité thermique est également modérée. Le béton armé se situe dans la partie droite et haute du graphique. Il présente une masse volumique élevée et une conductivité thermique importante. Cela signifie qu'il est lourd et qu'il transmet facilement la chaleur. Il est visible donc les matériaux les plus performants thermiquement ne sont pas forcément les plus adaptés mécaniquement. Les mousses, le liège ou la ouate de cellulose sont très favorables pour l'isolation et la légèreté, mais ils ne peuvent généralement pas assurer seuls le rôle structural d'un plancher. Ils doivent plutôt être utilisés comme couches isolantes ou matériaux de remplissage. À l'inverse, le béton armé possède une bonne résistance mécanique, mais il est lourd et peu isolant. Il peut donc assurer la fonction porteuse, mais il doit être associé à un matériau isolant pour améliorer le confort thermique.

Les matériaux comme le béton à polystyrène et le béton léger apparaissent comme des solutions de compromis. Ils ne sont pas aussi isolants que les mousses ou le liège, mais ils offrent une meilleure compatibilité avec une dalle ou un plancher, car ils combinent une masse plus faible, une conductivité thermique réduite et une certaine capacité mécanique.

Le Tableau 5 présente une sélection multi-contraintes des matériaux destinés à un plancher devant être à la fois léger, rigide et isolant thermique. Les matériaux sont comparés à partir de leur masse volumique  $\rho$ , de leur module d'Young  $E$ , de leur conductivité thermique  $\lambda$ , ainsi que de deux masses calculées,  $m_1$  et  $m_2$ . La dernière colonne retient la valeur minimale entre  $m_1$  et  $m_2$ , qui sert de critère de comparaison pour identifier les matériaux les plus avantageux. Les résultats montrent que les matériaux isolants classiques, comme le polyuréthane et le polystyrène, présentent les valeurs minimales les plus faibles, soit 119 kg. Cette performance s'explique par leur très faible masse volumique et leur faible conductivité thermique. Ils sont donc très intéressants pour réduire le poids du plancher et améliorer l'isolation thermique. Cependant, leur module d'Young reste faible, surtout pour le polyuréthane, ce qui limite leur utilisation comme matériaux porteurs principaux. La ouate de cellulose, l'aérogel de silice et la laine de verre présentent également des masses minimales faibles, comprises entre 257 kg et 288 kg. Ces matériaux sont très performants du point de vue thermique, notamment l'aérogel de silice qui possède la plus faible conductivité thermique du tableau. Toutefois, leur faible rigidité montre qu'ils sont surtout adaptés comme matériaux d'isolation ou de remplissage, et non comme éléments structuraux. À l'inverse, les matériaux plus rigides comme le bois massif, le béton à polystyrène, le béton léger, la terre cuite et le béton armé présentent des masses minimales plus élevées. Le bois massif, avec une masse minimale de 1 611 kg, apparaît comme le meilleur compromis parmi les matériaux ayant une fonction plus structurale. Il possède une rigidité élevée par rapport aux isolants, une masse volumique modérée et une conductivité thermique relativement faible. Le béton à polystyrène constitue également une solution intéressante, avec une masse minimale de 2 445 kg. Il est moins performant que les isolants purs en termes de légèreté et d'isolation, mais il offre une meilleure rigidité, ce qui le rend plus adapté à une dalle ou un plancher. Le béton léger et la terre cuite sont plus lourds et moins isolants, tandis que le béton armé présente la masse minimale la plus élevée, soit 5 413 kg. Malgré sa bonne rigidité, il est pénalisé par sa forte masse volumique et sa conductivité thermique élevée.

La figure présente l'évolution de la résistance thermique totale d'une dalle composée de béton associé à un matériau isolant, en fonction du pourcentage d'épaisseur occupé par le béton. L'objectif est de comparer plusieurs combinaisons béton-isolant afin d'identifier celles qui offrent la meilleure performance thermique pour un plancher. La courbe la plus élevée est celle du couple béton + aérogel de silice. Elle démarre autour de  $20 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$  sur le graphique lorsque la dalle est presque entièrement constituée d'isolant. Cette valeur est très supérieure à celles des autres matériaux. Cela montre que l'aérogel de silice est l'isolant le plus performant parmi les matériaux comparés. Sa très faible conductivité thermique lui permet d'offrir une résistance thermique élevée, même pour une épaisseur relativement limitée. Cependant, son utilisation peut être limitée par son coût, sa disponibilité et sa mise en œuvre. Les courbes correspondant au béton + laine de verre et au béton + polystyrène sont très proches. Elles commencent autour de  $9 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ , ce qui traduit une bonne performance thermique. Le polystyrène présente l'avantage d'être léger et facile à intégrer, tandis que la laine de verre est largement utilisée pour l'isolation thermique. Leur proximité sur le graphique indique que leurs performances thermiques sont comparables dans cette configuration. La courbe du béton + ouate de cellulose commence autour de  $7,7 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Elle est légèrement inférieure à celles du polystyrène et de la laine de verre. Cela signifie que, pour une même proportion d'isolant, la ouate de cellulose offre une résistance thermique un peu plus faible. Toutefois, elle reste intéressante, notamment pour des choix orientés vers des matériaux biosourcés ou écologiques. Toutes les courbes se rejoignent lorsque le pourcentage de béton atteint 100 %. À ce point, il n'y a plus d'isolant dans la dalle ce qui veut dire que la résistance thermique correspond uniquement à celle du béton, soit environ  $0,176 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ . Cette valeur faible confirme que le béton seul est un mauvais isolant thermique. Pour améliorer la performance énergétique du plancher, l'ajout d'un isolant est donc indispensable. Le béton + aérogel de silice est la solution la plus performante thermiquement. Le béton + polystyrène et le béton + laine de verre constituent de bons compromis techniques. Le béton + ouate de cellulose reste intéressant, notamment dans une logique de matériau plus écologique. Le choix final doit donc tenir compte non seulement de la résistance thermique, mais aussi du coût, de la rigidité, de la masse, de la durabilité et de la facilité de mise en œuvre du plancher.

### 3.2.2 Synthèse générale des analyses

L'ensemble des résultats montre que le choix d'un matériau pour un plancher ne peut pas être basé uniquement sur la rigidité, la masse ou l'isolation thermique prise séparément. Il s'agit plutôt d'une sélection multicritères, dans laquelle il faut rechercher un compromis entre légèreté, rigidité, résistance aux vibrations et performance thermique. Du point de vue mécanique, les matériaux les plus rigides, comme le béton armé ou les aciers, ne sont pas forcément les plus adaptés à un plancher léger, car leur masse volumique élevée augmente les charges permanentes. À l'inverse, les matériaux très légers comme les mousses polymériques, le polyuréthane ou le polystyrène sont très performants pour l'isolation et l'allègement, mais leur faible module d'Young limite leur capacité à assurer seuls une fonction porteuse. Parmi les matériaux étudiés, le bois massif apparaît comme l'un des meilleurs compromis pour une dalle légère et résistante aux vibrations. Il combine une masse volumique modérée, une rigidité suffisante et une bonne réponse vibratoire. Le béton léger et le béton à polystyrène constituent également des solutions intéressantes, car ils offrent un équilibre entre masse réduite, rigidité acceptable et meilleure performance thermique que le béton armé classique. Pour la performance thermique, les meilleurs résultats sont obtenus avec les isolants, en particulier l'aérogel de silice, le polyuréthane et le polystyrène. Toutefois, leur rôle doit être considéré comme complémentaire : ils améliorent l'isolation du plancher, mais ne remplacent pas nécessairement la partie porteuse. La Figure 6 confirme que l'augmentation de la proportion de béton diminue la résistance thermique totale, ce qui montre l'importance de maintenir une épaisseur suffisante d'isolant dans la composition de la dalle. Le matériau optimal n'est pas celui qui possède la meilleure performance dans un seul domaine, mais celui qui offre le meilleur compromis global. Pour un plancher léger, rigide, résistant aux vibrations et isolant, les solutions les plus pertinentes sont donc les systèmes mixtes, associant un matériau porteur comme le bois massif, le béton léger ou le béton à polystyrène avec un isolant performant comme le polystyrène, la laine de verre, la ouate de cellulose ou l'aérogel de silice.

### 3.2.3 Comparaison avec les autres ouvrages

Les résultats obtenus sont globalement cohérents avec la méthode de sélection des matériaux proposée par Ashby, selon laquelle le choix d'un matériau ne doit pas se faire à partir d'une seule propriété, mais à partir d'indices de performance combinant plusieurs paramètres comme la masse volumique, le module d'Young, la conductivité thermique ou encore la résistance mécanique. Ashby montre notamment que, pour les structures légères, les rapports du type  $E/\rho$  ou les indices dérivés de la rigidité spécifique sont essentiels pour comparer les matériaux. Cela rejoint les résultats de la Figure 4, où les matériaux très rigides comme les aciers, les alliages de nickel ou les céramiques techniques sont pénalisés par leur forte masse volumique, tandis que des matériaux plus légers comme le bambou, le bois ou certains bétons allégés deviennent plus intéressants pour un plancher léger [1]. Les résultats vibratoires du Tableau 4 sont également en accord avec les études portant sur les planchers légers, notamment les planchers bois. Dans les ouvrages et recommandations liés aux vibrations des planchers, une fréquence propre suffisamment élevée est recherchée afin d'éviter l'inconfort des usagers et les phénomènes de résonance. Les références liées à l'Eurocode 5 indiquent par exemple qu'une attention particulière doit être portée aux planchers résidentiels lorsque la fréquence fondamentale est inférieure à environ 80 Hz. Dans cet étude, les valeurs obtenues sont nettement supérieures à ce seuil, avec un maximum de 185,11 Hz pour le bois massif, 177,13 Hz pour le béton léger et 171,12 Hz pour le béton à polystyrène. Cela confirme que les matériaux légers et suffisamment rigides peuvent offrir un bon comportement vibratoire [2]. La comparaison thermique présentée dans la Figure 5 et le Tableau 5 est aussi conforme aux données disponibles dans la littérature. Les ouvrages de thermique du bâtiment indiquent que plus la conductivité thermique  $\lambda$  est faible, meilleure est la capacité isolante du matériau. Les matériaux comme le polystyrène, le polyuréthane, la laine de verre, la ouate de cellulose et l'aérogel de silice sont donc logiquement mieux classés du point de vue de l'isolation thermique. Les valeurs usuelles de la ouate de cellulose sont généralement autour de 0,040 à 0,050 W/m·K, tandis que les isolants à base d'aérogel peuvent atteindre des conductivités proches de 0,015 W/m·K, ce qui confirme la très bonne position de l'aérogel dans les résultats [3]. Les résultats concernant le béton sont également cohérents avec les autres travaux. Les bétons classiques présentent généralement une conductivité thermique plus élevée que les matériaux isolants. Des études indiquent que la conductivité thermique du béton léger peut varier environ entre 0,2 et 1,9 W/m·K, tandis que celle du béton conventionnel peut atteindre des valeurs plus élevées, autour de 0,6 à 3,3 W/m·K selon la composition. Cela explique pourquoi le béton armé apparaît défavorable dans les critères thermiques, malgré ses bonnes performances mécaniques [4]. Les sources techniques sur les valeurs R des matériaux de construction indiquent que le béton

possède une faible résistance thermique comparativement aux isolants. Cela justifie l'association béton–isolant dans les planchers, car le béton assure principalement la fonction mécanique, tandis que l'isolant améliore le confort thermique.

### 3.2.4 Limites de l'étude et perspectives

Cette étude présente certaines limites qu'il convient de souligner. Premièrement, la sélection des matériaux repose principalement sur des propriétés physiques et mécaniques issues de données bibliographiques, de fiches techniques et de valeurs moyennes. Or, ces propriétés peuvent varier selon l'origine des matériaux, leur composition, leur procédé de fabrication, leur taux d'humidité, leur vieillissement et les conditions réelles de mise en œuvre. Deuxièmement, les calculs réalisés considèrent des hypothèses simplificatrices, notamment une géométrie imposée, des conditions idéalisées de comportement mécanique et une approche théorique des fréquences naturelles et de la résistance thermique. Les effets liés aux assemblages, aux liaisons avec les éléments porteurs, aux charges réelles d'exploitation, à l'amortissement, à la fissuration, à la durabilité et au comportement à long terme n'ont pas été étudiés de manière expérimentale approfondie. Enfin, l'analyse ne prend pas encore en compte certains critères pratiques essentiels dans le contexte Malagasy, tels que le coût réel des matériaux, leur facilité de transport. Ces limites n'enlèvent pas la pertinence de la démarche, mais elles montrent que les résultats doivent être considérés comme une base d'aide à la décision nécessitant une validation expérimentale et technico-économique complémentaire.

Les perspectives de cette recherche consistent à approfondir la démarche de sélection proposée en intégrant davantage de critères expérimentaux, économiques et environnementaux. Il serait pertinent de réaliser des essais en laboratoire sur des dalles réelles ou des éprouvettes représentatives afin de vérifier les performances mécaniques, vibratoires et thermiques des matériaux présélectionnés, notamment le bois massif, le béton léger, le béton à polystyrène et les systèmes béton–isolant. Une modélisation numérique par éléments finis pourrait également être développée afin d'étudier plus précisément l'influence de la géométrie, des conditions d'appui, des charges dynamiques et de la disposition des couches dans les dalles multicouches. Par ailleurs, l'intégration d'une analyse du coût et de la facilité de mise en œuvre permettrait de mieux adapter la méthode au contexte de la construction à Madagascar. À terme, cette approche pourrait être étendue à d'autres éléments du bâtiment, tels que les murs, les poutres, les poteaux, les toitures et les fondations, afin de constituer une base rationnelle de sélection des matériaux pour les projets de construction locaux.

## 4. Conclusion

Cette étude a permis de proposer une démarche rationnelle de sélection des matériaux pour une dalle légère, rigide, résistante aux vibrations et présentant une bonne isolation thermique. En s'appuyant sur la méthode d'Ashby et sur une approche multi-contraintes, les matériaux ont été comparés à partir de plusieurs propriétés essentielles, notamment la masse volumique, le module d'Young, la conductivité thermique, les fréquences naturelles et les masses calculées selon les objectifs de conception. Les résultats montrent que le matériau le plus rigide n'est pas nécessairement le plus performant lorsque la légèreté, le comportement vibratoire et l'isolation thermique sont pris en compte simultanément. Le béton armé, bien qu'avantageux sur le plan mécanique, est pénalisé par sa masse volumique élevée et sa faible performance thermique. À l'inverse, les isolants comme le polyuréthane, le polystyrène, la laine de verre, la ouate de cellulose et l'aérogel de silice présentent de très bonnes performances thermiques, mais ne peuvent généralement pas assurer seuls une fonction porteuse. Les meilleurs compromis sont donc obtenus avec des solutions mixtes associant un matériau structurel, comme le bois massif, le béton léger ou le béton à polystyrène, à un matériau isolant performant. Ainsi, l'étude confirme l'intérêt d'une sélection multicritères pour dépasser les choix empiriques et orienter la conception vers des dalles plus légères, plus confortables et mieux adaptées aux exigences techniques du bâtiment.

Références

[1]	M. F. Ashby, <i>Materials Selection in Mechanical Design Third Edition</i> , OXFORD: Elsevier, 2015.
[2]	M. F. Ashby, <i>Materials Selection in Mechanical Design</i> , Oxford: Elsevier, 2005.
[3]	S. Chouchene, «MASTECH "MAterials Enginneering and Technology" ENSO,» 2018. [En ligne]. Available: <a href="https://choucheneslim.wordpress.com">https://choucheneslim.wordpress.com</a> . [Accès le 10 Juillet 2023].
[4]	M. A. a. K. Johnson, <i>Material and design : The Art and Science of Material Selection in Product Design third Edition</i> , OXFORD: Elsevier, 2016.
[5]	D. C. M. Ashby, <i>Materials selection in mechanical design</i> , JOURNAL DE PHYSIQUE IV : HAL Open Science, novembre 1993.
[6]	A. M. J. Clovis, <i>Etude de Construction d'un bâtiment R+2 à usage mixte à Vinanikarena Antsirabe</i> , Antsirabe: Univeristé de Vakinankaratra, Génie Civil - BTP, 2024.
[7]	N. BOUZEGHAIA, <i>METHODES DE SELECTION</i> , Université BEN BOULAID Batna 2: Faculté de Technologie, 2019.
[8]	A. E. N. F. L. G. H. a. H. W. M.F. Ashby, <i>Metal Foams: A Design Guide</i> , United States of America: British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2000.
[9]	H. S. a. D. C. Michael Ashby, <i>Materials, Engineering, Science, Processing and Design</i> , UK: Elsevier, 2007.
[10]	<i>Materials, Engineering, Science, Processing and Design</i> , Cambridge: Elsevier, 2017.
[11]	«Total Conrete,» Total Conrete limited, 01 01 2025. [En ligne]. Available: <a href="https://www.totalconcrete.co.uk/news/what-is-the-r-value-for-concrete">https://www.totalconcrete.co.uk/news/what-is-the-r-value-for-concrete</a> . [Accès le 5 12 2025].
[12]	P. Hamm, <i>Floor vibrations – new results</i> , WCTE, 2010.
[13]	R. Gomez, <i>Conductivité thermique dans les échantillons de béton avec des fibres naturelles et synthétiques</i> , MDPI, 2024.
[14]	M. Ashby, 3dr Edition, Oxford, 2018.
[15]	P. Margueres, <i>Selection des matériaux et Procédés</i> , Université Toulouse III: Maison de la Formation Jacqueline Auriol.
[16]	Techniques-ingenieur, «techniques-ingenieur,» [En ligne]. Available: <a href="https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/procedes-de-fabrication">https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/procedes-de-fabrication</a> . [Accès le 27 Décembre 2023].