

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية
فرانسيس جانسون

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics
National School of Built and Ground Works Engineering
Francis Jeanson

Mémoire de Magister

Option : Matériaux - Structures

GASSIS Soufiane

Ingénieur, diplômée de l'Ecole Nationale des Travaux Publics

Intitulé du mémoire

Dimensionnement optimal des poutres en bois selon Eurocode 5- EC5

Soutenu publiquement le Mardi 11/04/2017 à 10h00 devant le Jury
composé de :

M.Mahmoud BENSAIBI	Professeur, ENSTP	Président
M.Ferhat FEDGHOUCHE	Maitre de Conférences A, ENSTP	Directeur de thèse
M.Mohamed HADID	Professeur, ENSTP	Examineur
M.Nourredine BOURAHLA	Professeur, USD Blida	Examineur
M.Said KENAI	Professeur, USD Blida	Examineur

Remerciements

Je remercie tout particulièrement Monsieur Fedghouche Ferhat pour avoir dirigé mes travaux de thèse de magister.

Je le remercie pour son encadrement, son expérience, sa grande disponibilité, son aide, je le remercie aussi pour son soutien et ses conseils précieux et avisés tout au long de cette thèse.

J'exprime mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué d'une façon ou d'une autre à la concrétisation de ce travail.

Je voudrais enfin rendre hommage à toute ma famille, pour son soutien constant, quelles que soient les circonstances.

إهداء

إلى أمي

إلى عائلتي

ملخص :

هذا البحث مخصص لتطوير آلية لتصميم أمثل لعوارض خشبية وفق الشروط المحددة من طرف قانون الاتحاد الأوروبي للتصميم والبناء الخاص بمادة الخشب (Eurocode 5 (EC-5)).

تتكون الدالة الهدف المخفضة من: (1) تكلفة مادة الخشب المستعملة. (2) وزن العارضة. وتم تحديد الدوال الخاصة بالقيود وفق مقتضيات قانون (Eurocode 5 (EC-5)). هذه الدوال مكونة من إجهادات مقاومة الانعطاف، مقاومة القص الشاقولي، إجهادات الانعطاف جراء كتلة العارضة وأثقال التشغيل، والقيود الخاصة بالتصميم المحددة من طرف قانون Eurocode 5، كذا والقواعد العملية المتعارف عليها. إن حل منظومة تحديد القيمة الأمثل تم عن طريق برنامج Maple-15. وتمت دراسة مثالين لتوضيح منهجية النموذج المقترح. وأظهرت المقارنة التي أجريت بين نتائج مقارنة التصميم الأمثل والتصميم الكلاسيكي فروقا معتبرة لصالح التصميم الأمثل، مع تحقيق أرباح معتبرة. وفي النهاية يمكن القول بأن مقارنة التصميم الأمثل، مقارنة عملية وموثوق بها وفعالة من جهة التصميم والحساب، بالمقارنة بالمقارنة الكلاسيكية المعمول بها من طرف مهندسي مكاتب الدراسات.

الكلمات المفتاحية: استمثال، العارضة، الخشب، الحالات الحدية، قانون التصميم والبناء الأوروبي الخاص بالخشب EC-5، نظام الحلول الحسابية.

Résumé :

Ce travail de recherche est consacré au développement d'un modèle de conception optimale des poutres en bois selon l'Eurocode 5 (EC-5). La fonction objectif à minimiser comprend : i) le coût du matériau bois ; ii) le poids de la poutre. Les fonctions de contrainte sont définies pour répondre aux exigences de conception de l'Eurocode 5 (EC-5). Elles sont constituées de contraintes de résistance à la flexion, de résistance au cisaillement vertical, de contrainte de flèche due aux charges permanentes et aux charges d'exploitation, aux contraintes de conception imposées par l'Eurocode 5 (EC-5) et aux règles de pratiques courantes. La résolution du système d'optimisation formulé est effectuée par l'utilisation du logiciel Maple-15. Deux exemples sont traités pour illustrer la méthodologie du modèle proposé. Les solutions optimales obtenues sont comparées avec les solutions de dimensionnement classiques. Des gains substantiels ont été réalisés. En outre, l'approche proposée est pratique, fiable et efficace du point de vue conception et calcul par rapport aux approches classiques habituellement utilisées par les ingénieurs des bureaux d'études.

Mots-clés : optimisation ; poutre ; bois ; états limites ; Eurocode5 (EC-5) ; algorithme.

Abstract:

This research work is concerned with the optimum design of wood beams according to Eurocode5 (EC-5). The objective functions to minimize contain: i) the cost of the material wood; and ii) the weight of the beam. The constraints functions have been defined so as to meet the EC-5 requirements. These later have included: the flexural strength constraint, the vertical shear constraint, deflection constraint related to dead and live loads, design constraints as well as to practical use constraints.

The formulated optimization system has been resolved using Maple 15. Two examples have been studied to illustrate the proposed model. The optimal solutions obtained when compared to those of classical design have shown a substantial gain. The proposed approach is practical, reliable and efficient for design compared to classical methods used in design offices.

Keywords: optimization; beam; wood ; limit state ; Eurocode 5 (EC-5) ; algorithm

SOMMAIRE

Introduction générale.....	07
PREMIERE PARTIE : Synthèse bibliographique	
CHAPITRE 1: Le matériau bois	
1.1 Bois et forêt.....	13
1.1.1 Aspects écologiques.....	13
1.1.2 La Richesse forestière en Algérie.....	14
1.1.3 Valorisation du bois.....	16
1.2 Le matériau bois.....	17
1.2.1 Description de l'anatomie du bois.....	18
1.2.2 Avantages du bois lamellé-collé.....	20
1.2.3 Les caractéristiques du bois.....	20
1.3 Propriétés physiques du bois.....	22
1.3.1 Anisotropie.....	22
1.3.2 Hygroscopicité.....	23
1.3.3 Rétractabilité/Gonflement.....	25
1.3.4 Densité.....	25
1.3.5 Durabilité.....	26
1.3.6 Conductivité.....	27
1.3.7 Combustibilité.....	28
1.3.8 Grain.....	28
1.3.9 Texture.....	29
1.3.10 Homogénéité/Hétérogénéité.....	29
1.3.11 Couleur.....	29
1.4 Caractéristiques mécanique du bois.....	29
1.5 Un choix d'avenir : Le bois.....	33
1.5.1 Intérêt du bois.....	34
1.5.2 Ressources écologiques.....	35
1.5.3 Ressources architecturales et techniques.....	37
1.5.4 Propriétés techniques du bois.....	38
1.6 But et obligations d'un classement de résistance.....	39
1.6.1 Essences de bois.....	39
1.6.2 Notions de classement.....	40
1.6.3 Classes de résistances et classes visuelles.....	42
1.6.4 Les caractéristiques mécaniques des classes de résistance.....	42
1.6.5 Les utilisations possibles du bois en fonction des classes.....	43
1.6.6 Le marquage des pièces classées selon la résistance mécanique.....	43

CHAPITRE 2 : Règles de conception et de calcul selon Eurocode 5

2.1 Introduction.....	45
2.2 Les actions appliquées aux structures.....	46
2.2.1 Actions permanentes G.....	46
2.2.2 Actions variables Q.....	46
2.3 Conditions de vérifications : les états limites.....	47
2.3.1 État limite ultime (ELU)	47
2.3.2 État limite de service (ELS)	48
2.4 Combinaisons d'actions appliquées aux structures.....	48
2.4.1 État limite ultime.....	48
2.4.2 État limite de service.....	48
2.5 Classes de résistance du bois massif et du bois lamellé-collé.....	49
2.5.1 Valeurs caractéristiques des bois massifs.....	50
2.5.2 Valeurs caractéristiques des bois lamellés.....	51
2.6 Recherche des valeurs des résistances du bois.....	52
2.6.1 Facteur modificatif k_{mod}	52
2.6.2 Coefficient γ_M	53
2.7 Valeurs limites de flèches.....	53
2.8 Flexion des poutres simples.....	55
2.8.1 Vérification de la résistance (ELU)	57
2.8.2 Vérification des déformations (ELS)	61
2.9 Le cisaillement.....	62

DEUXIEME PARTIE : Optimisation

CHAPITRE 3 : Concepts et formulation générale d'un problème d'optimisation structurale

3.1 Introduction.....	68
3.2 Optimisation structurale.....	69
3.3 La modélisation mathématique.....	72
3.4 Processus d'optimisation.....	72
3.4.1 Variables du problème.....	74
3.4.2 Espace de recherche.....	74
3.4.3 Fonctions objectif.....	75
3.4.4 Méthode d'optimisation.....	76
3.4.4.1 Méthodes déterministes.....	76
3.4.4.2 Méthodes non-déterministes.....	78
3.5 Classification des problèmes d'optimisation.....	79
3.5.1 Linéarité.....	79
3.5.2 Problème linéaire.....	79
3.5.3 Problème non-linéaire.....	80
3.6 Formulation générale du problème d'optimisation.....	80

3.6.1	Définition d'un problème d'optimisation mono-objectif.....	80
3.6.2	Qualification de l'optimum.....	81
3.6.3	Algorithmes d'optimisation.....	81

CHAPITRE 4: Modèle de calcul de moindre cout d'une poutre rectangulaire en bois massif

4.1	Introduction.....	84
4.2	Formulation de la conception optimisée des poutres en bois.....	84
4.2.1	Variables de conception.....	85
4.2.2	Fonctions objectifs.....	85
4.2.2.1	Fonction coût.....	85
4.2.2.2	Fonction poids.....	86
4.2.3	Formulation des contraintes de conception.....	86
4.2.3.1	Vérification à l'état limite ultime (ELU).....	87
4.2.3.2	Vérification à l'Etat limite de service (ELS).....	87
4.2.3.3	Contraintes liées à la géométrie.....	88
4.2.4	Formulation d'un problème de conception à coûts optimal.	88
4.2.5	Formulation du problème de conception du poids minimal d'une poutre en bois.....	88
4.2.6	Méthode de résolution.....	89
4.3	Applications numériques.....	89
4.3.1	Exemple de conception A.....	89
4.3.2	Procédure étape par étape du modèle d'optimisation des coûts pour les poutres en bois.....	90
4.3.3	Comparaison entre les résultats de la solution optimale à coût minimal et la solution de l'approche classique.....	92
4.3.4	Comparaison entre les résultats de la solution optimale à poids minimal et la solution de l'approche classique.....	92
4.3.5	Comparaison des résultats des solutions optimales à coût et à poids minimal avec les solutions de l'approche classique.....	93
4.3.6	Méthode graphique.....	94
4.3.7	Exemple de conception (B)	94
4.4	Conclusions.....	96
	Recommandations et perspectives.....	97
	Annexe 1 : Liste des abréviations.....	98
	Annexe 2 : Listes des tableaux.....	100
	Annexe 3 : Listes des figures et des schémas.....	101
	Références bibliographiques.....	102

INTRODUCTION GENERALE

Actuellement, le développement durable est le maître mot, qui se voit intervenir dans bon nombre de décisions nationales et internationales, soucieuses de préserver l'environnement. Le secteur du bâtiment et de la construction est l'un des secteurs les plus concernés par les enjeux du développement durable. On parle déjà de la construction durable comme le défi du futur.

Les chiffres sur lesquels, institutions et experts internationaux, s'accordent sont en effet impressionnants : le bâtiment représente environ 40 % des émissions de CO₂ des pays développés, 37 % de la consommation d'énergie et 40 % des déchets produits.

La construction durable peut être décrite, comme étant la recherche de bâtiments satisfaisant un équilibre entre la dimension économique et la dimension écologique.

Une analyse fonctionnelle approfondie des dispositions constructives et du coût des travaux doit permettre de déterminer si le projet est ou non réalisable.

Il est en effet important de ne pas perdre de vue les conséquences économiques de la solution proposée : le choix d'un matériau respectueux de l'environnement ou d'un concept fondé socialement ne peut faire fi de la rentabilité économique. Dans ce contexte, il s'agit principalement de minimiser les coûts de construction, en plus de l'intérêt grandissant accordé aux coûts du cycle de vie du bâtiment.

Bien que le thème de la construction durable ne puisse être limité à sa seule dimension écologique, on ne peut ignorer que l'acte de bâtir produit un important impact environnemental. Il faut donc œuvrer pour protéger la biodiversité en réalisant des efforts considérables pour préserver la faune et la flore.

Aujourd'hui, construire un bâtiment ou un ouvrage d'art revient à résoudre un véritable problème d'optimisation au sens mathématique du terme.

Le problème à résoudre est souvent exprimé sous la forme générale d'un problème d'optimisation, dans lequel on définit une fonction objectif, fonction mérite ou fonction cible (voire plusieurs) : qualité architecturale, performance environnementale, exigences réglementaires de résistance (vérification à ELU et à ELS), performance énergétique, fonctionnalité, ...etc., que l'on cherche à minimiser par rapport à tous les paramètres concernés. La définition du problème d'optimisation est également complétée par la donnée

de contraintes : budgétaire, moyens humains, moyens matériels, délais, réglementation, intégration dans le contexte urbain existant, ...etc.

Tous les paramètres (ou variables de décision) de la solution proposée doivent respecter ces contraintes, faute de quoi la solution n'est pas réalisable.

Nul besoin d'être un brillant ingénieur pour savoir que ce problème n'a pas de solution unique. Autrement-dit, il n'existe pas de construction idéale qui maximise la totalité des objectifs qu'on lui attribue tout en respectant les contraintes auxquelles il est soumis.

Aussi, tout l'enjeu du problème consiste à mettre en évidence « une bonne solution », optimale et performante pour répondre aux attentes (objectifs de la construction) et faire face aux problèmes qu'engendre un projet de construction.

Lors de la conception d'une structure à l'architecture ambitieuse, les matériaux constructifs sont souvent poussés au plus près de leurs limites. La qualité du rendu repose en partie sur la bonne utilisation de la matière. Ceci est vrai pour réduire le coût de la construction, mais surtout pour affiner les structures. C'est le challenge de l'optimisation structurale.

Pour relever le défi de la construction durable, la puissance des outils mathématiques et numériques est aujourd'hui un facteur incontournable de réussite. Pour les acteurs de l'acte de construire, l'optimisation mathématique ouvre les portes à des solutions optimales, permettant l'exploration des ressources à moindre coût pour répondre globalement et pertinemment, aux enjeux du 21^{ème} siècle.

Un ingénieur, maîtrisant ces outils, posséderait ainsi un avantage compétitif certain pour répondre à ces enjeux. Parallèlement, l'optimisation apparaît comme l'une des branches des mathématiques les plus adaptées au développement d'outils pour l'ingénieur. Un des objectifs de cette étude est d'éclairer les professionnels sur l'intérêt de l'optimisation.

L'Algérie, doit s'inspirer des pays développés cherchant aujourd'hui à réduire leur consommation d'énergie et à utiliser des matières premières de substitution, notamment renouvelables dont le bois fait partie. Pour promouvoir son usage, le développement de méthodes favorisant son recours dans les systèmes constructifs pour la construction est nécessaire.

L'utilisation du bois, matériau renouvelable et à faible potentiel de réchauffement climatique, reste pourtant peu développée dans le domaine de la construction. Des freins d'ordre technique, culturel, économique rendent sa compétitivité difficile.

Le bois a l'avantage d'être relativement disponible et renouvelable, quand le béton doit faire face à des difficultés d'approvisionnement en sable et granulats. C'est également un excellent moyen de lutter contre

le réchauffement climatique. La construction en bois participe ainsi aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

A ces raisons climatiques, s'ajoute des considérations purement techniques. Les chantiers de construction bois ne nécessitent pas de sable, de séchage ou d'eau. Ils sont par conséquent moins polluants et moins bruyants. De plus, les principaux éléments sont construits en usine, ce qui permet d'adapter la construction à des terrains parfois difficiles d'accès et d'éviter les arrêts causés par les intempéries, réduisant ainsi la prolongation de la durée du chantier.

Par ailleurs, le bois est 5 à 6 fois plus léger que le béton. Ce qui fait de lui un bon candidat pour les constructions sur sols fragiles ou sur dalles au-dessus des voies routières et ferroviaires.

Enfin, une tendance est en train de se dégager dans les pays développés privilégiant de plus en plus le bois dans la construction en hauteur.

En raison de ses propriétés et ses qualités, le bois est un élément proche de la nature. Renouvelable, énergétique et économique ; il s'inscrit parfaitement dans la perspective du développement durable et écologique.

Le recours aux textes réglementaires d'Eurocode 5 (code aux états limites) pour établir les spécifications techniques détaillées auxquelles les poutres en bois, objet de notre étude, devront se conformer, obéit à la nécessité d'explorer ce nouveau règlement qui est un outil à la pointe des connaissances les plus récentes, et de montrer tout l'intérêt du dimensionnement optimal dans le cadre des exigences de l'Eurocode 5.

Les Eurocodes sont les normes européennes de conception, de dimensionnement et de justification des structures de bâtiment et de génie civil. Une partie importante de la nouvelle réglementation algérienne en matière de calcul des structures est une adaptation des Eurocodes.

Outre les impératifs de sécurité et de stabilité, l'objectif des Eurocodes est d'harmoniser le marché des services dans le domaine de l'ingénierie de la construction pour les pays membre de l'union européenne, qui est un partenaire stratégique de l'Algérie, notamment pour les besoins d'harmonisation de la réglementation nationale à celle de EU, facilitant ainsi les projets de coopération dans le domaine de la construction et permettent aussi la libre circulation, dans les deux sens, de certains produits du bâtiment.

Notre travail de recherche est consacré au développement d'un modèle de conception optimale des poutres en bois selon l'Eurocode 5 (EC-5). La fonction objectif à minimiser comprend :

- 1) Le coût du matériau bois.
- 2) Le poids de la poutre.

Les fonctions de contrainte sont définies pour répondre aux exigences de conception et de calcul de l'Eurocode 5 (EC-5).

Ce mémoire s'articule autour de deux grandes parties :

- *La première partie* est consacrée à l'étude des caractéristiques mécaniques et physiques du bois et à l'étude des avantages du matériau bois dans la construction. L'accent a été mis sur l'aspect comportement du bois vis à vis des charges structurelles, conformément aux règles générales établis par l'Eurocode 5. En plus de la dimension environnementale et économique.

- Dans *la seconde partie*, nous avons introduit les concepts de l'optimisation structurale, qui conviennent au traitement des problèmes de dimensionnement optimal.

Nous avons formulé notre problème de conception optimale des poutres en bois, cette formulation est au cœur de notre étude. Nous avons ensuite procédé au choix de l'outil de résolution qui s'adapte (au mieux) au système formulé.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons explicité la méthodologie du modèle proposé, étape par étape, par deux exemples traités. Il s'agit d'un problème de programmation non-linéaire. Les solutions optimales sont obtenues à l'aide du logiciel Maple-15, et comparées avec les solutions de dimensionnement classique.

Enfin, nous constatons que la méconnaissance et le peu d'intérêt réservé au matériau bois malgré ses qualités indéniables, notamment dans les aspects structurels et dans la dimension écologique ; L'avènement relativement récent des dispositions d'une réglementation européenne (les Eurocodes) basées sur les vérifications à l'état limite, ainsi que l'émergence des algorithmes d'optimisation structurale confère à notre travail toute son opportunité et ambitionne par conséquent à participer à sensibiliser les professionnels sur cet immense gisement, qui conduira inéluctablement aux bonnes solutions en maximisant les performances et en minimisant les coûts des constructions.

PREMIERE PARTIE :

Synthèse bibliographique

CHAPITRE 1 :

Le matériau bois

1.1 Bois et forêt

1.1.1 Aspects écologiques

Environ 90% de la biomasse accumulée sur terre se trouve dans les forêts sous forme de troncs, de branches de feuilles, de racines, accompagnés des animaux et des micro-organismes qui s'en nourrissent les troncs représentent environ la moitié de cette biomasse, alors que la part des animaux et des micro-organismes est négligeable.

La production annuelle nette de biomasse des forêts est d'environ 50 milliards de tonnes, ce qui est supérieur au total des autres productions de biomasse par photosynthèse dues aux prés, cultures, steppes, etc.

Par leurs interactions sur le cycle de l'eau et surtout sur celui du carbone, les forêts constituent, avec le phytoplancton des océans (biomasse marine), un régulateur écologique de base de la planète terre. Le processus de croissance de la forêt, et de la biomasse en générale, est basée sur la transformation du CO₂ gazeux de l'atmosphère en polyglucides assimilables par la cellule végétale. L'énergie de transformation est portée par les rayons lumineux du soleil et par la réaction de transformation condensée de l'oxygène qui est relâché dans l'atmosphère.

La forêt possède donc l'intérêt écologique d'être un mécanisme naturel de fixation du CO₂ et d'être le plus grand fournisseur d'oxygène de la planète.

Lors du constat de l'augmentation de l'effet de serre (*sommet de la terre de Rio en 1992*), une des principales mesures prise a été de reboiser la planète et de proposer un mode de développement durable, ménageant les ressources et protégeant la biodiversité de la planète et de ses microsystemes écologiques.

Les forêts exploitées de façon soutenue, c'est-à-dire avec des prélèvements limités aux arbres arrivés à maturité, sans perturber l'équilibre biologique général, sont des forêts pour lesquelles le dynamisme biologique est préservé. La croissance, est donc la fixation du dioxyde de carbone sont régulées.

Au contraire, la destruction, ou la substitution de forêts existantes visant à une autre utilisation du sol, provoquent une forte diminution de la biomasse accumulée et engendrent une forte relaxation de dioxyde de carbone. L'augmentation du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère est principalement due à la combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole, etc.), mais également, dans une mesure non négligeable, à la destruction par le feu des forêts. Dans le cadre de cette gestion des grands flux de dioxyde de carbone, la construction en bois se positionne donc comme un vecteur essentiel de stockage.

Il est difficile de trouver une définition claire de la forêt, le volume de bois sur pied pouvant varier de 1 à 1000 m³ par hectare. On parle généralement

de forêts fermées, dans le cas où les couronnes des arbres couvrent de plus de 20% de la surface du sol dans le cas contraire, on a affaire à des forêts ouvertes. Sur les 4.4 milliards d'hectares de forêts recouvrant le globe, seuls 2.7 milliards d'hectares sont des forêts fermées. Les forêts tropicales. De leur côté, représentent environ la moitié des forêts mondiales, l'autre moitié étant des forêts de zones tempérées ou boréales. On estime que 56% de la biomasse est accumulée dans les forêts tropicales alors que les 44% restants sont répartis dans les forêts tempérées ou boréales. Ce rapport est même de 62 et 38% pour la production nette de biomasse, ce qui montre l'importance des forêts tropicales dans l'écosystème organique.

Selon les estimations, 7 à 9 milliards des 50 milliards de tonnes de biomasse produites annuellement pourraient être utilisés pour la production du bois, mais seule une partie de cette quantité est exploitable, là où les forêts bénéficient d'une réelle gestion et d'une infrastructure (routes et chemins, places de stockage, plans de coupe). Ces dernières années, environ 3,5 milliards de m³ (1m³ équivaut à 1 tonne de biomasse, soit 1.5 tonne de CO₂ fixé) ont été exploités, ce qui est très inférieur au potentiel théoriquement. [59]

1.1.2 La Richesse forestière en Algérie

L'Algérie possède un véritable potentiel forestier qu'il est possible de mettre en valeur aussi bien pour la production de ressources ligneuses destinées au développement industriel et économique du pays que pour la protection de l'environnement et mêmes à des fins sociales à proximité des centres densément peuplés. Mais, en dépit des différents plans de développement la forêt algérienne ne semble pas aujourd'hui être en condition de production et donc ne peut satisfaire les besoins de la société, vue les besoins énormes en matières première ligneuses liées à l'accroissement de la population, aux exigences de l'élévation de son niveau de vie, au développement industriel et économique du pays et principalement du fait du profond délabrement de ces forêts.

L'Algérie joui d'une situation exceptionnelle, dixième pays du monde par sa superficie et le plus grand pays du continent africain, cette situation géographique lui confère une diversité climatique et écologique particulière.

Ce vaste territoire est très diversifié par son climat, son relief, ses sols et ses végétations naturelles, ou en fonction de la géologie, de la lithologie et de la topographie notre pays s'organise en trois grandes unités structurales : le système tellien, les hautes plaines steppiques et le Sahara.

Cette diversité du paysage en Algérie, lui confère une diversité climatique et écologique particulière propice au développement d'une flore très riche et très diversifier, en effet, l'Algérie possède une des flores les plus diversifiées et les plus originales du bassin méditerranéen où elle compte 3139 espèces

répartis dans près de 150 familles parmi lesquelles 653 espèces sont endémiques, soit un taux de 12,6 % d'endémisme.

La répartition naturelle des essences et des formations forestières en Algérie montre la prédominance du pin d'Alep avec un capital sur pied assez pauvre, suivie respectivement par le chêne liège, les chênes zeen et afares, le cèdre, le pin maritime et les eucalyptus, ces essences constituent le premier groupe de forêts dites économiques qui totalisent 1249000 ha dont 424000 ha de peuplements artificiels. Le second groupe est constitué par le chêne vert, le thuya et le genévrier qui jouent un rôle de protection essentiellement, ce groupe ne couvre que 219000 ha, le reste des surfaces forestières qui s'étendent sur 2603940 ha se répartissent entre les reboisements de protection qui couvrent 727000 ha, les maquis et broussailles qui occupent 1876000 ha.

Essences	Boudy ¹ (1955)	Service des forêts ² (1966)	Admini des forêts ³ (1978)	Seïgue ⁴ (1985)	Ghazi el Lahouati ⁵ (1997)	RNE ⁵ (2000)	DGF ⁶ (2007)
Pin d'Alep	852000	792000	792000	855000	800000	881000	881000
Chêne liège	426000	463000	468000	440000	463000	229000	230000
Chêne vert	679000	354000	354000	680000	354000	219000	108000
Chêne zeen et afarès	-	65000	65000	67000	65000	48000	48000
Genévrier de Phénicie	279000	227000	277000	-	217000	-	-
Thuya	157000	191000	143000	160000	143000	-	-
Cèdre de l'Atlas	45000	23000	23000	30000	12000	16000	16000
Pin maritime	-	12000	12000	12000	38000	32000	31000
Sapin de Numidie	-	-	-	300	-	-	-
Maquis	780000	78000	-	-	-	-	1662000

Tableau (1-1) : Les superficies par décennie des principales essences forestières en Algérie. (Sources: 1 Boudy, 1955; 2 Kadik, 1986; 3 Letreuch-Belarouci, 1991, 4 Seïgue, 1985; 5 Khalifi, 2002 ; 6 DGF, 2010).

Mais malheureusement, ce territoire subi une dégradation très intense des terres et une désertification galopante qui en est le stade avancé, cette dégradation des milieux naturels se traduit par la réduction du potentiel biologique et par la rupture des équilibres écologiques et socio-économiques. Parmi ces éléments naturels, le milieu forestier demeure le milieu qui subit d'énormes pertes aussi bien sur le plan floristique que faunistique.

Finalement, en termes de bilan, l'Algérie a perdu au cours des trente dernières années plus de 4,35 millions d'ha de terres productives ; les pertes dues au déboisement sont de l'ordre de 1,5 millions d'ha, celles due à l'érosion

hydrique sont estimées à 1,4 millions d'ha, à l'ensablement des terres à 1 millions d'ha, l'empiétement urbains, industriels et routiers à 250000 ha et la salinisation des sols à 200000 ha.

Tous ces éléments indiquent l'urgence de la mise en place d'une politique nationale cohérente de gestion rationnelle du territoire d'une part et la nécessité d'une préservation des ressources phylogénétiques d'autre part les ressources naturelles (sol, plante, eau...) ne doivent plus être soumises aux multiples agressions qui se produisent à l'occasion des transformations des structures agraires (surpâturage, extension de la surface agricole utile..), de l'urbanisation et de l'extension des infrastructures qu'elle entraîne. [26],[66], [69]

1.1.3 Valorisation du bois

Enfin, le bois est une matière première renouvelable pour autant que le milieu dans lequel il se développe soit géré de façon appropriée. Les exploitations trop intensives et les déforestations de certains pays provoquent des déséquilibres important du biotope forestier dont les conséquences à long terme ne peuvent encore aujourd'hui être évaluées avec certitude.

Une exploitation judicieuse, en revanche, telle qu'elle est préconisée actuellement dans différents pays, permet une gestion saine du matériau de construction qu'est le bois, tout en développant les fonctions protectrices et écologiques de la forêt.

Par ailleurs, le bois étant un matériau naturel et renouvelable, son utilisation comme matériau de construction doit être privilégiée dans le cadre des nouvelles contraintes systématiques sur le développement durable au travers de la relation écologie-environnement-produits finis. Dans bien des cas, une revalorisation du bois comme matériau de construction sera le principal allié pour un entretien et un développement des surfaces forestières.

De point de vue écologique, la relation entre la forêt et la construction en bois est tout à fait essentielle. En effet, la forêt est le vecteur de transformation du carbone gazeux (CO₂) en carbone organique par fixation du dioxyde de carbone sous forme de macro-polymères organiques. La construction en bois représente donc un stockage de dioxyde de carbone, sorti momentanément du cycle du carbone. Elle permet donc, en consommant le bois, d'exploiter les forêts pour qu'elles conservent leur propre dynamique et leur propre potentiel de croissance, donc leur fonction de fixation du dioxyde de carbone à travers la croissance des plus jeunes arbres. [32], [59]

1.2 Le matériau bois

Dans la construction, le bois est utilisé principalement sous deux formes :

- Bois massif
- Bois reconstitué

Le bois massif ou bois scié ou bois équarri, est utilisé principalement pour les éléments de charpente traditionnelle et les ossatures de maisons à colombages ainsi que toutes les poutres ; son utilisation comme son dimensionnement relève surtout des habitudes locales.

De plus, les sections en bois massif n'étant pas très stable (déformation au séchage), la mise en œuvre de grandes sections augmente les risques de déformation et de fissuration.

Le bois reconstitué peut être fabriqué à partir de deux sous-produits tels que les sciures ou des bois de moindre qualité, ou à partir de composants en bois (lamelles par exemple). On distingue ainsi :

- ✓ Les panneaux : ces produits de grand format sont constitués d'éléments de placage fins, de lames de bois, de particules ou de fibres, assemblés par collage, pressage et/ou thermo-durcissement d'un liant. De nombreux panneaux ont été mis au point en fonction de divers usages spécifiques
- ✓ Les poutres reconstituées : le Bois Lamellé Collé (BLC) est le procédé le plus utilisé dans la construction bois. C'est une technique dérivée du sciage, qui consiste en un aboutage de grande longueur de lamelles de bois ayant en général des caractéristiques mécaniques, hygrométriques, et une densité très proches. L'épaisseur des lamelles est généralement limitée à 45 mm
- ✓ Le bois massif reconstitué ou BMR (*glued solid timber*) est un matériau constitué d'un assemblage de deux à cinq lames de bois massif de fortes épaisseurs (de 45 à 85 mm) collées face à face par leurs côtés plats et parallèlement au sens des fibres.

Les portées supérieures sont du domaine des poutres reconstituées, les dimensions des poutres en bois lamellé collé(BLC) varient de 7 à 40 m pour les longueurs et de 8x20 cm à 25x200 cm pour les sections.

La hauteur h d'une poutre en bois collé ou scié peut être estimée en fonction de la portée l selon le critère d'élançement suivant :

$$h = \frac{l}{20} \text{ à } \frac{l}{10}$$

Cependant, pour des raisons d'élançement et de stabilisation, les poutres simples en bois collé dépassent rarement une hauteur statique de 1,8 m.

Il existe plusieurs milliers d'espèces botaniques ou essences qui sont classées en deux grandes familles :

- Les Feuillus : Comme leur nom l'indique, les feuillus sont des arbres composés de feuilles. Ils les perdent en automne. On les appelle des arbres à feuilles caduques. Ces feuilles sont généralement larges.
Exemples : le chêne, le mûrier, le peuplier.
- Les Résineux : Contrairement aux feuillus, les résineux ont des feuilles sous forme d'aiguilles qui se renouvellent au fur et à mesure, l'arbre ayant ainsi toujours le même aspect. On parle alors de feuillage persistant. Les résineux sont aussi appelés conifères parce qu'ils portent des cônes. Les conifères les plus répandus sont les cèdres, cyprès, douglas, sapin, genévrier, agathis, mélèze, pin.

Chaque espèce a son propre domaine d'emploi dans la construction (charpente, poteau, coffrage, panneaux de contre-plaqué, planches d'échafaudage...). [59]

1.2.1 Description de l'anatomie du bois

Le bois est un tissu végétal, assimilable à un matériau composite, formé de cellules, canalisant la sève brute. Les principales parties d'un morceau du tronc d'un arbre sont, depuis l'extérieur jusqu'à l'intérieur, l'écorce, le phloème, le cambium, l'aubier et le bois de cœur.

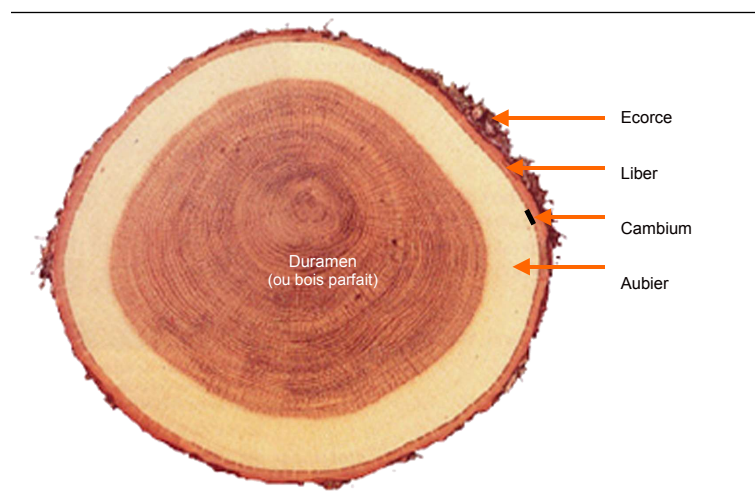


Figure (1-1) : Anatomie du bois. [18]

Le cambium est une partie vitale de l'arbre puisqu'il correspond à la zone où a lieu la production des couches de tissus cellulaires. Il y a une production de bois sur sa face interne et de liber (transformé par la suite en écorce) sur sa face externe.

L'aubier fait partie des tissus vivants de l'arbre. C'est dans cette zone que circule de manière ascendante la sève brute. Ce bois est situé en périphérie de l'arbre. En se déplaçant vers le centre de l'arbre, les parois cellulaires se transforment et les tissus meurent. C'est alors du bois parfait ou bois de cœur.

Si le bois de cœur est facilement identifiable de l'aubier alors il est appelé duramen

D'autre part, des alternances de zones claires et sombres sont visibles. Ces dernières correspondent aux cernes annuels. Un cerne représente la production de cellules de bois au cours d'une année. C'est en comptant le nombre de cernes qu'il est possible de connaître l'âge des bois.

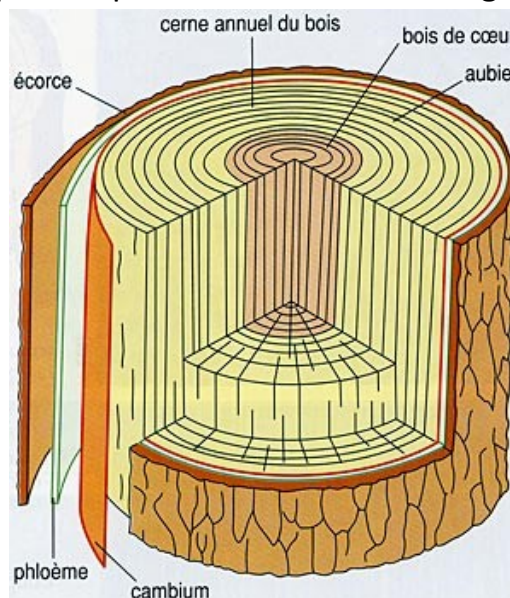


Figure (1-2) : Anatomie du bois. [18]

Un tronc d'arbre est composé de millions de cellules individuelles de bois. Ces cellules diffèrent de par leur taille et par leur forme, en fonction de leur rôle dans la physiologie de l'arbre. La plupart d'entre elles sont nettement plus longues que larges. Elles sont organisées entre elles en différents types de distribution à l'intérieur du bois, cette distribution variant selon les espèces. Les spécialistes distinguent les feuillus, où les cellules sont relativement spécialisées, des conifères où les choses sont plus simples.

- Les résineux ont une structure relativement simple. Leur masse est composée à 90% de cellules allongées et élancées, orientées parallèlement au tronc : les trachéides.

- Les feuillus ont une structure plus complexe. Les cellules sont disposées en tissus croisés : trachéides fibreuses et fibres filiformes. Cette structure leur confère une meilleure résistance au flambement.

Au printemps, l'arbre a un grand besoin de sève et il produit donc du bois initial dit aussi bois de printemps qui favorise la fonction de conduction de cette dernière. En revanche, au fil des mois après la floraison et la production de fruits, le besoin en sève diminue et se forme le bois final ou bois d'été. Dans une tige âgée, on distingue l'aubier, bois physiologiquement actif, perméable aux substances, moins dense, moins résistant que le duramen (bois parfait, bois de cœur) qui est un tissu mort, plus foncé, placé au centre du plan ligneux transversal.

Le vieillissement d'un tronc se traduit par la transformation progressive de l'aubier en bois de cœur. La répartition relative de ces deux zones dépend de l'âge et de l'espèce. [18], [51], [59]

1.2.2 Avantages du bois lamellé-collé

La fragmentation du bois massif en petits éléments, éventuellement épurés des parties endommagées ou altérées, permet d'obtenir par reconstitution des éléments en bois dont les propriétés sont grandement améliorées (panneaux, Bois Lamellé-Collé (BLC), Le bois massif reconstitué (BMR)...)

- l'homogénéité du produit est améliorée,
- le facteur d'anisotropie diminue fortement, par exemple quand les différentes couches sont croisées régulièrement (disposition courante pour les panneaux de contreplaqué),
- la taille des éléments obtenus dépasse ce qu'on pourrait obtenir naturellement

1.2.3 Les caractéristiques du bois

Le bois est un matériau mécanique naturel mis à disposition par la forêt, à travers un processus biologique de stockage de matière ligno-cellulosique au sein de l'arbre, cette définition naturelle du matériau bois explique ses trois grandes propriétés : sa variabilité, son anisotropie et sa biodégradabilité.

Issu de l'activité biologique de l'arbre, le bois est un matériau complexe avec la présence des vaisseaux, des cellules, des rayons ligneux, des canaux résinifères, etc. Il présente une forte hétérogénéité que l'on retrouve à différentes échelles d'observation :

- Le tronc : l'échelle de la structure (1 m)
- « Le bois sain » (sans défaut) : l'échelle macroscopique (10 cm)
- Les cernes : l'échelle mésoscopique (1 à 10 mm)
- Les cellules (0.1 mm)

- Les parois cellulaires : l'échelle microscopique (1 μm)
- Les composés du bois : l'échelle nanoscopique (1 nm)

Le bois est un tissu végétal, assimilable à un matériau composite, formé de cellules, dont les membranes incrustées de lignine jouent un rôle de soutien. La lignine est la plus répandue, de toutes les substances qui créent la vie.

En termes de variabilité, on observe deux composantes : la variabilité inter-essence et la variabilité intra-essence. L'origine phylogénétique des espèces biologiques permet d'expliquer les plus grandes différences du matériau produit, par exemple par la famille des résineux, avec une organisation du plan ligneux très primitive, et par celle des feuillus, beaucoup plus élaborée, lui conférant des propriétés technologiques supérieures. La mise en œuvre du bois dans la construction fera donc appel à un choix judicieux d'essences, en fonction des caractéristiques recherchées (comportement transversal, durabilité naturelle, couleur, disponibilité, etc.). La variabilité intra-essence s'explique par les conditions de croissance de l'arbre, et par son patrimoine génétique. Au sein d'une même essence, une échelle de variabilité de 10 à 12 des propriétés mécaniques de base pourra être observée.

D'un point de vue micro-structurel, la variabilité du bois s'explique par sa densitométrie séquentielle annuelle. Toujours pour des raisons de croissance, le densitogramme d'un arbre passe par des séquences d'accroissement annule, appelé cerne de croissance, lui-même très différent entre bois de printemps à densité faible, et bois d'été à densité élevée. Cette hétérogénéité micro-structurelle est à la base des propriétés d'instabilité dimensionnelle du bois, observées lors de variations hygroscopiques.

Par ailleurs, les propriétés thermiques du bois de construction sont très intéressantes. Sa dilatation thermique est faible et négligeable par rapport aux variations dimensionnelles liées aux mouvements hygroscopiques. La conductibilité thermique est également très faible. Ce qui fait du bois un matériau isolant.

Dans le domaine de la durabilité, le bois est un matériau organique cellulosique, fortement biodégradable par les micro-organismes et les insectes. Par rapport à la durabilité, les ouvrages seront répartis en classes de service, qui gouverneront les choix techniques, tels que le choix d'essence, de détails types ou encore de traitement chimique préventif. Etant également un matériau contenant beaucoup de carbone et hydrogène, le bois est un bon carburant. Heureusement, sa conductibilité thermique faible en fait un carburant à combustion lente, ce qui permet son utilisation en construction. Ces deux caractéristiques nécessitent cependant des règles de mise en œuvre extrêmement spécifique dans le domaine de la conception, pour protéger le bois et garantir la durabilité de l'ouvrage. On parlera donc de techniques

de protection constructive dans le domaine biologique, et de dimensionnement au feu en cas d'incendie. [4], [59]

1.3 Propriétés physiques du bois

Les propriétés physiques du bois sont les caractéristiques quantitatives du bois et son comportement à des influences extérieures autres que des forces appliquées. Les propriétés physiques du bois dépendent largement de sa structure, c'est à dire de la disposition et de la nature des éléments qui le composent. Nous parlerons ici des propriétés directionnelles (anisotropie), du contenu en humidité, de la densité, des propriétés dimensionnelle (rétractabilité/gonflement), de la conductivité (thermique, électrique ou sonore), de la durabilité et de l'apparence (grain, texture, couleur, odeur). La connaissance des propriétés physiques est importante car celles-ci peuvent influencer significativement la performance et la force du bois en utilisation. [27]

1.3.1 Anisotropie

Le bois est un matériau hétérogène, constitué de fibres, ce qui explique son caractère anisotrope. L'anisotropie signifie que les propriétés du bois vont varier suivant l'orientation des fibres. Il a donc une direction privilégiée de résistance maximale.

Ainsi les propriétés vont varier dans le sens de la longueur des fibres (plan longitudinal : parallèles aux fibres = le fil du bois) ; dans le sens des rayons ligneux (plan radial : perpendiculaire aux fibres et normales aux cernes) ; dans le sens perpendiculaire aux fibres (plan transversal : perpendiculaire aux fibres et tangent aux cernes) ou encore par rapport aux cernes annuels de croissance (plan tangentiel). Voir figure (1-3)

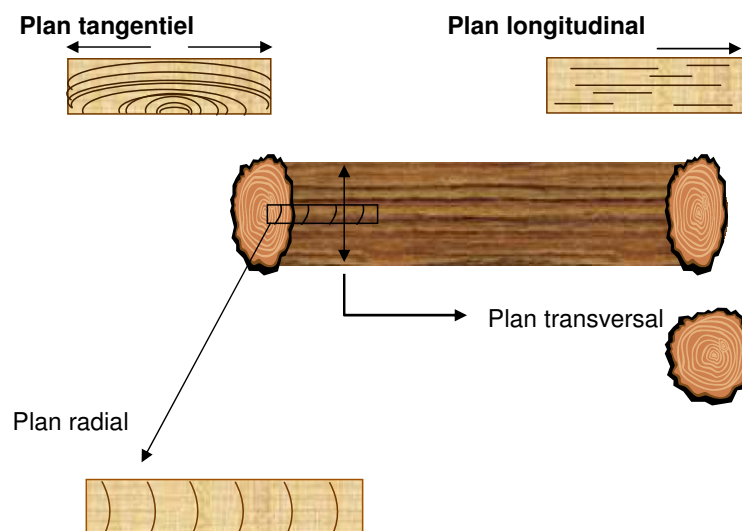


Figure (1-3) : La structure anisotrope du bois

Cette anisotropie est due à la disposition et la forme particulière des différents éléments du bois, dont la plupart (vaisseaux, fibres et trachéides) sont allongés dans la direction longitudinale. Pour cette raison, bien que la plupart des propriétés du bois diffèrent dans ces trois directions, les différences de propriétés entre l'axe radial et tangentiel sont en général mineures, les différences principales étant observées pour l'axe longitudinal. [59]

1.3.2 Hygroscopicité

L'hygroscopicité, comparable aux propriétés d'une éponge, fait que le bois à la capacité d'ajuster sa teneur en humidité, soit en plus (gonflement) ou en moins (retrait), aux conditions d'humidité de l'air ambiant. Cette aptitude que possède le bois à absorber ou résorber l'humidité (hygroscopicité) est une caractéristique majeure qui vise ce matériau. Le bois est effectivement un matériau organique fortement hygroscopique puisqu'il véhicule de l'eau en phase de croissance (sève), et qu'il est élaboré essentiellement à partir de l'eau, (et du dioxyde de carbone). A l'état vivant, le bois contient énormément d'eau, jusqu'à cinq fois son poids en bois dans le cas d'une essence très poreuse (balsa). Sa mise en œuvre nécessite donc un conditionnement, ou un séchage spécifique. C'est dans cette phase qu'apparaissent les instabilités dimensionnelles, liées aux variations concentriques de la densité et au gradient hygroscopique, donc au différentiel de retrait sur la section en fonction du mode de débit et de la phase de séchage.

L'humidité est également responsable de la pourriture du bois quand elle est en présence de certaines autres conditions environnantes. Pour le bois on parle généralement de taux d'humidité H , dite humidité sur sec (par rapport au bois anhydre, c'est-à-dire le bois à 0% d'humidité).

Le taux d'humidité peut varier de 25 à 250 % pour le bois saturé (bois vert), de 10 à 20 % pour le bois séché à l'air et 10 % et moins pour le bois séché artificiellement (par air chaud climatisé, pompe à chaleur ou vide principalement) (séchage entre 1 à 3 semaines). Dans la plupart des espèces, le taux d'humidité est plus important dans l'aubier que dans le bois de cœur.

L'eau dans le bois se présente sous deux formes :

- L'eau libre est l'eau présente dans le bois vert. L'eau libre remplit les vaisseaux et les vides intercellulaires (de façon imagée, c'est l'eau qui sort de l'éponge quand on la presse). L'évacuation de cette eau ne modifie pas

les dimensions et les propriétés du bois, sauf la densité (la densité diminue lorsque H diminue).

- L'eau liée est l'eau qui entre dans la composition des fibres (pour notre éponge, il s'agit de l'eau contenue entre les fibres de la matière mais que nous ne pouvons pas essorer). L'eau liée sature les fibres à un taux d'humidité de 30% environ, correspondant au « point de saturation des fibres ». C'est son évaporation qui provoque le retrait lors du séchage : au-dessous du point de saturation des fibres ($H < 30\%$), on commence à voir des déformations, et même des ruptures, en particulier si le processus de séchage est mal conduit.

Le taux d'humidité dans le bois en dessous du point de saturation des fibres varie avec le taux d'humidité et la température de l'air environnant. A une température donnée, le bois tend à absorber de l'eau dans un environnement qui s'humidifie et à perdre de l'eau dans un environnement qui s'assèche. De même, à un taux d'humidité de l'air donné, le bois tend à perdre de l'eau lorsque la température augmente. Cependant, les variations liées aux changements de température sont plus faibles que celles liées aux changements du taux d'humidité. Pour des conditions de températures et d'humidité données, le taux d'humidité du bois change jusqu'à atteindre un équilibre avec les conditions de l'air environnant. Une fois l'équilibre du contenu en eau atteint, le bois ne perd ni ne gagne d'eau tant que les conditions restent constantes.

Le temps requis pour atteindre l'équilibre dépend de la taille et de la perméabilité de l'échantillon de bois considéré et de la différence entre le taux d'humidité de l'échantillon de bois et le point d'équilibre en humidité potentiel de cet environnement. La température influence également la vitesse des changements du taux d'humidité en influençant la capacité de l'air à contenir de l'humidité ainsi que la vitesse de diffusion de l'humidité à travers le bois.

- *Le matériau bois* en utilisation est exposé à des changements à long (saisonniers) et court (journalier) terme en humidité relative et température de l'air alentour. Il expérimente donc continuellement au moins très légèrement, des changements dans son taux d'humidité. Ces changements sont en général progressifs et les changements à court terme tendent à n'influencer que la surface du bois. Les changements du taux d'humidité peuvent être retardés, mais non évités, par des revêtements protecteurs tels que vernis, laque ou la peinture.

L'objectif du séchage du bois est d'amener le bois à proximité de la teneur en humidité que le produit fini aura en service. [59]

1.3.3 Rétractabilité/Gonflement

La rétractabilité et le gonflement traduisent la capacité des dimensions du bois à changer en lien avec son taux d'humidité. Les dimensions du bois sont stables lorsque son taux d'humidité est au-dessus du point de saturation des fibres, mais varient lorsque le taux d'humidité change en dessous du point de saturation des fibres : le bois se rétracte lorsque les parois cellulaires perdent de l'eau, il gonfle lorsque les parois cellulaires gagnent de l'eau. Ces retraits et gonflements peuvent entraîner la déformation, le fendage ou l'éclatement des morceaux de bois, problèmes qui nuisent à l'utilité des produits du bois. Afin de diminuer les variations dimensionnelles du bois en utilisation, on procède généralement au séchage préalable du bois de façon à l'amener à un taux d'humidité proche de l'équilibre dans les conditions de son utilisation.

Le bois est un matériau particulièrement anisotrope en ce qui concerne les changements dimensionnels (retrait ou gonflement). Ainsi, le retrait est maximum dans la direction tangentielle (5% à 12% – le retrait est généralement exprimé en pourcentages qui représentent la variation des dimensions du bois anhydre par rapport aux dimensions du bois vert), environ 1,5 à 2 fois plus faible dans la direction radiale (2% à 9%) et très faibles dans la direction longitudinale (0,1% à 0,3%).

Comme le retrait longitudinal du bois est généralement faible, celui-ci n'a en général pas de signification technologique.

1.3.4 Densité

La densité est le rapport de la masse volumique du bois à celle de l'eau. Le bois est un matériau hygroscopique qui peut changer de poids et de volume en fonction des pertes et des gains d'humidité. Il est donc important de préciser la teneur en humidité de l'échantillon au moment de la mesure de la masse et du volume. La densité de référence est calculée avec un pourcentage de 12% d'humidité.

La densité du bois varie largement à l'intérieur et entre les espèces. La densité de la plupart des espèces se trouve entre 320 et 720 kg/m³.

La densité est largement influencée par la structure du bois. Chez les conifères, la densité augmente lorsque la proportion de bois final par rapport au bois initial augmente. L'inverse est vrai lorsque la proportion de bois initial augmente. Donc, la densité augmente lorsque la proportion de cellules étroites à paroi épaisses augmente (la quantité de plein sur la quantité de vide

augmente). Chez les feuillus, les fibres expliquent les différences de densité entre les bois tant d'un point de vue qualitatif que quantitatif. La densité du bois dépend de la proportion relative des fibres par rapport aux éléments cellulaires, notamment les éléments de vaisseaux, ainsi que de l'épaisseur propre de la paroi des fibres. Une proportion de fibre élevée va favoriser une densité élevée. De même, des fibres à lumens étroits et à parois épaisses vont favoriser des bois denses. A l'intérieur d'une même espèce, c'est-à-dire à qualité de fibres relativement égale, le bois le plus dense sera celui qui contient proportionnellement le plus de tissus fibreux.

1.3.5 Durabilité

La durabilité d'un bois caractérise sa résistance aux agressions externes qui peuvent avoir plusieurs origines : les organismes biologiques destructeurs (bactéries, champignons lignivores, insectes à larves xylophages, termites et organismes xylophages marins), les sollicitations physiques (humidité de l'air, lumière, froid, pluie, érosion mécanique) et chimiques (acides, bases ou autres agents chimiques). En effet, ces différents agents sont susceptibles d'altérer la composition et la structure du bois et donc ces propriétés.

En général, les bois les plus durables sont : ceux qui contiennent des quantités importantes de résines (Pins, Mélèze...), d'oléo-résines (Teck, Eucalyptus...), de tannins (Chêne, Châtaignier...); sont denses ; sont exempts de matière fermentescible. Ainsi, le bois de cœur est plus durable que l'aubier, qui contient de l'amidon et des glucoses, éléments nutritifs qui favorisent le développement des organismes vivants.

Parmi les espèces les plus durables, on classe le cèdre, le sequoia, le robinier, le mélèze, le chêne, le châtaignier... ; et parmi les moins durables : le sapin, l'épicéa, le hêtre, le peuplier, le tilleul....

Généralement, la durabilité est surtout affectée par le groupe des organismes biologiques, et plus particulièrement par les champignons et les insectes. C'est la raison pour laquelle la notion de "durabilité naturelle" est souvent associée à la résistance contre les attaques biologiques.

La durabilité naturelle du bois est au premier chef déterminée par sa composition chimique (teneur en hémicellulose, présence d'extractibles, de cristaux, de silice ...), par sa structure anatomique et sa capacité à absorber l'eau. Les espèces très durables contiennent fréquemment des substances présentant un caractère fongicide et/ou insecticide. Dans l'aubier, ces substances sont rarement présentes, ce qui explique que l'aubier ne puisse jamais prétendre à une durabilité naturelle élevée. L'intensité et la rapidité avec lesquelles le bois peut absorber l'eau jouent un rôle important dans

la durabilité, en influençant l'extraction et le délavage de ces substances et donc la résistance biologique.

Les risques d'attaque par les champignons ou par les insectes sont directement liés à l'humidité contenue dans le bois et à la température ambiante. Le bois maintenu constamment sec est protégée de la dégradation (par exemple les tombeaux égyptiens qui ont plusieurs millénaires). Ainsi, une grande proportion des bois sont maintenus secs au cours de leur utilisation et sont donc extrêmement durables. De façon similaire, si le bois est maintenu continuellement submergé dans l'eau, même pour de longues périodes, la dégradation est très limitée. Les bactéries et certains champignons peuvent attaquer le bois submergé, mais la détérioration résultante est très lente.

Les champignons n'affectent que le bois présentant un taux d'humidité de plus de 20 %. Ainsi, le bois se détériore plus rapidement dans des endroits chauds et humides que dans des endroits froids et secs. Les hautes altitudes sont moins favorables à la dégradation car les températures sont basses et la saison de croissance des champignons qui causent la dégradation est plus courte.

1.3.6 Conductivité

La conductivité désigne l'aptitude du bois à transmettre la chaleur, le son et l'électricité ; on parle alors de conductivité thermique, phonique et électrique. Ces conductivités dépendent de la structure cellulaire du bois. Puisque celui-ci contient une grande quantité de cavités remplies d'air, le bois a une conductivité faible pour la température, le son et l'électricité ; c'est un excellent isolant (la résistance du bois est grande).

La conductivité dépend également de la densité du bois et du taux d'humidité. Plus un bois est dense et plus il est humide, plus il est conducteur.

La conductivité augmente également avec la température et lorsque la présence d'extractible augmente.

Le bois est un isolant naturel en raison des millions de pochettes d'air contenues dans sa structure cellulaire. Comme le transfert de la chaleur s'accroît avec la densité, le bois constitue un meilleur isolant que des matériaux plus denses, tels l'acier ou le béton. La conductivité thermique du bois est moins grande que plusieurs autres matériaux. Le bois constitue donc un bon isolant. Il est 400 fois plus isolant que l'acier et 8,5 fois plus isolant que le béton. La perte de chaleur due aux ponts thermiques est donc amoindrie par l'utilisation d'une charpente de bois. Cette diminution du transfert de chaleur à travers les parois du bâtiment réduit la consommation d'énergie pour le chauffage et la ventilation.

Ainsi, l'emploi de matériaux plus conducteurs, comme l'acier et le béton, nécessiterait l'ajout d'une isolation supplémentaire pour égaler les propriétés isolantes du bois.

Le bois possède aussi une bonne inertie thermique lui permettant d'emmagasiner la chaleur. Les parois en bois massif favorisent ainsi une bonne régulation de la température intérieure malgré la variation des températures extérieures. Les propriétés thermiques du bois en font donc un matériau de choix dans toute construction visant à atteindre les objectifs de construction durable.

Enfin, la conductivité dépend de l'orientation des cellules dans le bois : elle est supérieure dans le sens du fil.

1.3.7 Combustibilité

La combustibilité désigne l'aptitude du bois à brûler. Elle dépend fortement de la teneur en eau et de la densité. Le pouvoir calorifique du bois augmente avec la densité. Le bois s'enflamme vers 270°C.

La combustion du bois génère à la surface du bois une couche de carbone isolant le bois non brûlé de la chaleur dégagée par les flammes. Ce phénomène réduit de beaucoup la vitesse de carbonisation. Cette dernière est relativement constante au cours d'un feu et se situe à environ 0,6 mm par minute. Après près de 45 minutes de combustion, une pièce de bois aura brûlé jusqu'à une profondeur approximative de 27 mm. L'intérieur d'une pièce de bois est alors peu touché thermiquement lorsque les faces externes se consomment. La partie non brûlée ne perd que de 10 % à 15 % de sa résistance totale sous l'effet des très hautes températures dues au feu.

1.3.8 Grain

Le grain est une impression visuelle produite par le sectionnement des éléments du bois, spécialement des éléments conducteurs en coupe transversale. On obtient un classement en 2 catégories :

- grain fin : les éléments sont peu visibles à l'œil nu. C'est le cas pour le bois des conifères, ou pour les feuillus qui ont des vaisseaux de petit diamètre (en particulier les feuillus à pore diffus). Par exemple, l'érable, le hêtre, le noyer ou le peuplier sont des bois à grain fin.

- grain grossier : les éléments sont visibles à l'œil nu. Les bois à zone initiale poreuse sont souvent des bois à grain grossier car ils possèdent généralement des vaisseaux de larges diamètres.

Un cas intermédiaire peut parfois être utilisé, les bois à grain mi-fin ou moyen. Dans ce cas les éléments sont un peu visibles à l'œil nu. Certains bois à zone initiale poreuse avec des vaisseaux de diamètre moyen ont un grain moyen. Par exemple le châtaigner.

Le grain est un paramètre important à prendre en compte pour les opérations de finition (ponçage, vernissage, peinture). En effet, les bois présentant un grain grossier nécessitent souvent un bouche-porage préalable à l'application de produits de finition.

1.3.9 Texture

La texture est le rapport de la largeur de la zone de bois finale sur la largeur totale du cerne de croissance. Elle est exprimée en pourcentage. Les bois ayant une forte proportion de bois final ont une texture forte, les bois ayant une faible proportion de bois final ont une texture faible.

1.3.10 Homogénéité/Hétérogénéité

Un bois homogène est un bois dans lequel le bois de printemps est peu différent par sa structure, son aspect et ses propriétés du bois d'été, si bien que le bois initial et le bois final à l'intérieur d'un cerne, de même que les cernes de croissance entre eux, sont peu distincts.

Au contraire, un bois hétérogène est un bois dans lequel le bois initial contraste fortement par sa structure, son aspect et ses propriétés, avec le bois final, ce qui rend très apparentes les deux zones à l'intérieur d'un cerne ainsi que les limites entre les différents cernes.

1.3.11 Couleur

C'est l'impression visuelle due aux pigments propres à chaque arbre. Dans la plupart des espèces, le bois d'aubier est de couleur claire, tandis que les extractibles donnent au duramen une couleur plus foncée. Cependant, chez certaines espèces (pruche, épicéa, sapin, tilleul, peuplier, hêtre) il y a peu ou pas de différence de couleur entre l'aubier et bois de cœur. La couleur est également plus variable dans un bois hétérogène : les différences marquées de couleur entre le bois initial clair et le bois final plus foncé de chaque cerne créent des motifs dans le bois.

1.4 Caractéristiques mécaniques du bois

Les caractéristiques mécaniques du bois, très importantes pour le dimensionnement des structures, varient en fonction de l'essence, et au sein de l'arbre lui-même, qui est hétérogène (densités différentes du bois initial et du bois final, cernes de croissance d'épaisseurs variables, présence d'aubier

et de duramen, direction des fibres parfois non parallèle à l'axe du tronc ou à l'axe longitudinal de l'élément, présence de nœuds, etc.) et anisotrope (ses caractéristiques physiques et mécaniques varient selon les directions longitudinale, radiale ou tangentielle) .

D'un point de vue mécanique, le bois possède un comportement anisotrope marqué avec un rapport particulièrement élevé entre modules de Young ou résistances dans les directions parallèle et perpendiculaire au fil. Ajouté à cela, le comportement et le niveau de résistance, dans une direction donnée, ne sont pas les mêmes selon que le bois est sollicité en traction ou en compression. Le bois est, en effet, un matériau cellulaire et certaines de ses particularités mécaniques sont propres à ce type de matériaux.

Les trois directions d'orthotropie du bois génèrent une symétrie cylindrique qui se retrouve dans la plupart de ses propriétés mécaniques. Elles sont considérées comme orthogonales entre elles, ce qui conduit à parler d'orthotropie cylindrique du bois. Dans ce repère, l'orthotropie génère trois plans de symétrie (LT , LR , TR). Il résulte de cette orthotropie que la caractérisation complète du bois au sens de la mécanique repose sur la détermination de trois modules d'élasticité, trois modules de cisaillement et six coefficients de Poisson. L'expression mathématique du comportement élastique du bois peut se réduire à une matrice symétrique possédant neuf constantes élastiques. La loi de Hooke se généralise aux axes L , R et T et la matrice de complaisance élastique est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix}$$

$\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$: déformation selon les trois directions

$\gamma_{RT}, \gamma_{LT}, \gamma_{LR}$: glissement selon les trois plans de cisaillement

E_L, E_R, E_T : modules d'élasticité selon les trois directions

G_{RT}, G_{LT}, G_{LR} : modules de cisaillement selon les trois plans

$\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}$: coefficients de Poisson

$\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$: contraintes normales selon les trois directions

$\tau_{RT}, \tau_{LT}, \tau_{LR}$: contraintes de cisaillement selon les trois plans

Les valeurs moyennes connues des constantes élastiques intervenant dans la matrice de complaisance sont données dans le tableau (1.2) pour le chêne et l'épicéa (bois sans défaut), pour un taux d'humidité moyen de 12%.

Tableau (1.2) : Constantes élastiques du chêne et de l'épicéa

		Epicéa	Chêne
Module d'élasticité (MPa)	E_L	13760	13000
	E_R	910	2190
	E_T	490	990
Module de cisaillement (MPa)	G_{RT}	30	400
	G_{LT}	510	780
	G_{LR}	730	1320
Coefficients de Poisson	ν_{LR}	0,372	0,369
	ν_{RL}	0,04	0,074
	ν_{TL}	0,025	0,036
	ν_{LT}	0,467	0,428
	ν_{RT}	0,435	0,618
	ν_{TR}	0,245	0,300

Les *caractéristiques mécaniques* du bois que l'on cherche à déterminer en vue de son utilisation sont :

- la *compression* ; la résistance à la compression augmente proportionnellement à la masse volumique et diminue avec la teneur en eau : elle est plus élevée dans le sens axial que transversal ;
- la *traction* ; dans le sens axial, elle offre le maximum de résistance ; dans le sens transversal, c'est le minimum ;
- le *cisaillement*, lorsqu'il est longitudinal, est à peu près égal à la compression perpendiculaire ;
- la *flexibilité*, qui correspond à la déformation du bois sous une charge permanente ;

- la *fissibilité*, caractéristique des bois aptes au fendage de rondins pour la fabrication de bardage, bardeaux, merrains et la préparation des « bûches » pour le bois de feu ;
- la *dureté*, définie comme la résistance à la pénétration d'une pointe ou d'une bille ; comme la résistance à la compression, elle est proportionnelle à la masse volumique et diminue avec l'humidité ; elle est utilisée pour caractériser les bois exposés à l'usure (parquets) ;
- la *résistance aux chocs*, maximale dans le sens radial et minimale dans le sens tangentiel ;
- le *fluage*, déformation irréversible due au comportement viscoélastique du bois et des panneaux ; le résultat est l'augmentation de la flèche, sous l'action de charges permanentes ; cette déformation se fait d'abord très rapidement, puis ralentit. [58], [59]

✓ Propriétés à rupture

Les propriétés mécaniques du bois à rupture, telles que les résistances, varient en fonction des essences, des conditions de croissance, du taux d'humidité, de la présence plus ou moins marquée de singularités et des variations anatomiques (nœuds, fentes, rectitude du fil, largeur des cernes d'accroissement ...). Le caractère anisotrope du bois contribue encore à la variabilité de ces caractéristiques à rupture qui sont dépendantes du sens d'application des efforts (directions axiale, radiale ou tangentielle). Le bois est très résistant dans le sens axial et peu dans le sens transversal. [4], [59]

Tableau (1.3) : Résistance à la rupture moyenne (MPa) de l'épicéa et du chêne à 12% d'humidité.

Essences	Compression		Traction	
	Axiale	Transversale	Axiale	Transversale
Epicéa	35 à 45	6 à 8	90 à 100	1,2
Chêne	40 à 60	12 à 15	100 à 120	3

Au-delà de ses propriétés à rupture dépendantes de la direction, le matériau bois présente également un comportement mécanique dépendant du type de sollicitation. En effet, un effort de traction induit un comportement à rupture qualifié de fragile alors qu'une sollicitation en compression produit de la ductilité du matériau figure (1.4).

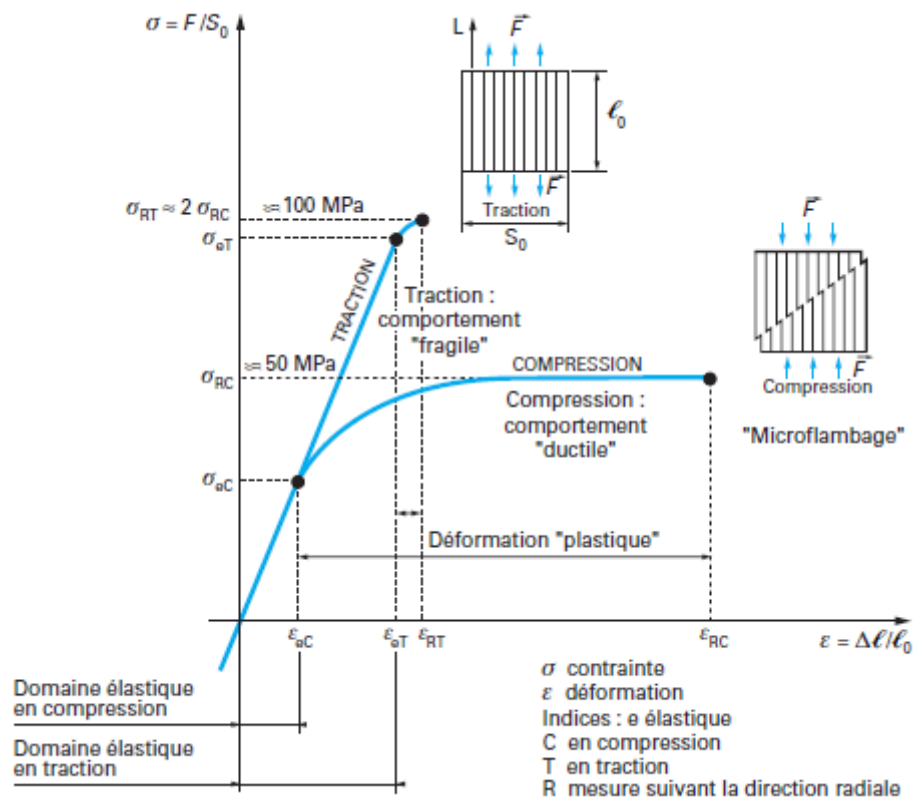


Figure (1-4) : Comportement du bois en traction / compression dans la direction longitudinale. [51]

1.5 Un choix d'avenir : Le bois

En raison de ses caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques et de la diversité des essences, le bois est une matière incontournable et importante pour les besoins de la société de demain.

De tout temps, le bois a connu un développement constant qui s'accroît fortement dans la société actuelle. Son utilisation doit être mesurée et fonctionnelle. Il constitue une ressource indispensable pour l'avenir, il est facteur d'économie d'énergie par son pouvoir isolant d'où la construction et l'aménagement en ossature de bois.

Dans un monde sensibilisé à l'environnement, le bois est un matériau de premier choix. Il a beaucoup à offrir pour améliorer la performance environnementale globale des bâtiments. L'utilisation du bois permet de réduire la trace environnementale en matière notamment de consommation d'énergie, d'utilisation des ressources ainsi que de pollution de l'eau et de l'air.

Le bois est un matériau qui évolue en symbiose avec l'environnement. En plus d'être naturel, esthétique et chaleureux, il est extrêmement performant, résistant et durable. On retrouve une gamme complète de produits de bois, qui se prêtent à une multitude d'applications en construction, que ce soit comme éléments structuraux ou d'apparence.

L'analyse du cycle de vie quantifie les impacts qu'un produit, un procédé ou une activité a sur l'environnement au cours de sa vie. Elle considère l'ensemble des étapes allant de l'extraction des matériaux, la transformation, le transport, l'installation, l'utilisation, l'entretien jusqu'à l'élimination finale ou la réutilisation (figure 1-5). L'analyse du cycle de vie des matériaux est un outil précieux pour quantifier le caractère écologique des projets de construction et soutenir les systèmes de certification environnementale des bâtiments. [14], [15], [61]

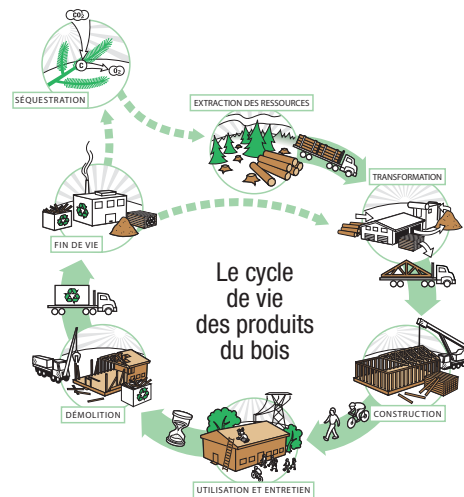


Figure (1-5) : Cycle de vie des matériaux de construction [14]

1.5.1 Intérêt du bois

Aujourd'hui, nul ne peut rester insensible aux conséquences des changements climatiques, de la pollution de l'air, de la disparition progressive des énergies fossiles ou du réchauffement de la planète.

Entré en vigueur en 2005, le protocole de Kyoto fixe des objectifs chiffrés de réduction des « gaz à effet de serre ».

Utiliser du bois provenant de forêts bien gérées contribue à participer au développement de ces dernières et à la lutte contre le changement climatique.

Désormais, le bois est une solution réfléchie et opportune, il est reconnu comme un matériau de construction écologique et innovant.

Issu d'une ressource naturelle renouvelable, gérée de façon durable, le bois apporte des réponses environnementales concrètes, notamment en matière de lutte contre l'effet de serre, et par ses qualités intrinsèques, il concourt à relever les défis esthétiques, techniques, économiques et créatifs des constructeurs.

1.5.2 Ressources écologiques

Le bois est l'un des matériaux les moins énergivores. En effet, l'énergie grise, c'est-à-dire la quantité d'énergie qu'il aura fallu dépenser durant toute sa durée de vie (extraction, transport, transformation, commercialisation, mise en œuvre, usage, recyclage en fin de vie). A chaque étape de sa transformation et de son utilisation, le bois a un impact environnemental et énergétique faible ou neutre, ce qui le place parmi les matériaux de construction les plus performants.[35]

1) Lutte contre l'effet de serre par fixation du carbone :

En effet, l'arbre, par le phénomène de photosynthèse, absorbe en forêt le CO_2 présent dans l'atmosphère. En fin de vie, il se décompose et rejette une partie du carbone retenu pendant sa croissance, une autre partie étant stockée dans le sol. En revanche, s'il est récolté :

- de nouveaux arbres poussent : le CO_2 continue d'être absorbé.
- le bois est utilisé : le carbone reste fixé dans les fibres. Les produits bois, tels que les constructions, les charpentes, les meubles, mais aussi les emballages et les papiers prolongent le stockage du carbone pendant leur durée de fabrication et leur durée de vie. On parle de « séquestration du carbone ».

La forêt, véritable puits de carbone, est ainsi un lieu de « stockage » durable et en quantité importante de CO_2 dans la biomasse et dans les sols. En moyenne, 1 m^3 de bois permet de stocker 1 tonne de CO_2 .

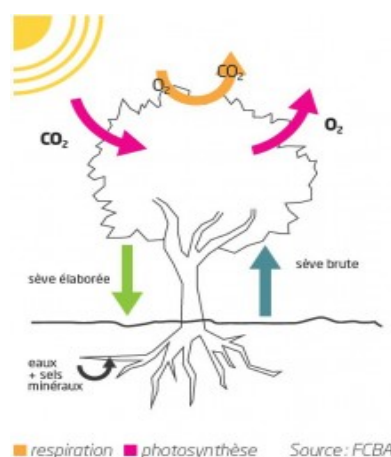


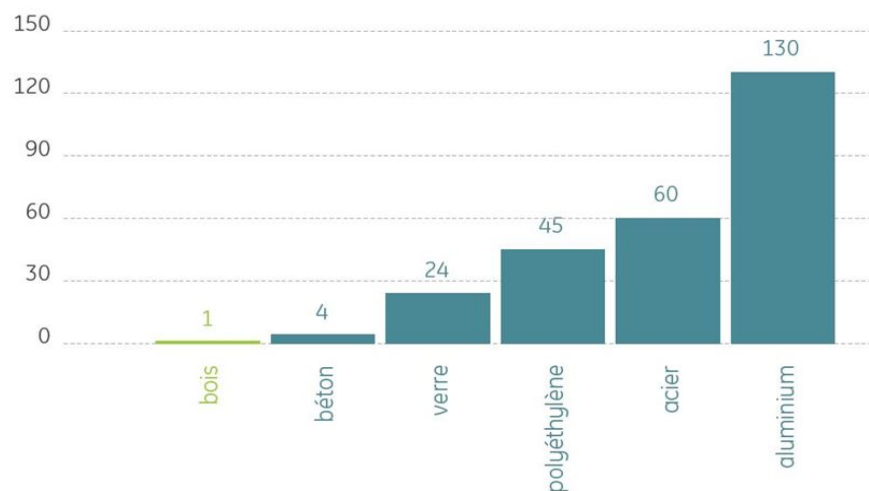
Figure (1-6) : fixation du carbone

2) Seul matériau renouvelable (conditions de gestion des forêts) :

Le bois est le seul matériau issu d'une ressource naturelle renouvelable : la forêt. Contrairement aux idées reçues, l'exploitation du bois n'est pas néfaste à la forêt, bien au contraire ! La récolte du bois favorise le renouvellement régulier des forêts, à conditions qu'elles soient gérées durablement : on prélève et on replante. Ainsi, le bois devient une ressource inépuisable et de proximité.

3) Faible énergie de transformation :

L'énergie grise, c'est la somme totale de l'énergie nécessaire à assurer l'élaboration d'un produit, et ceci de l'extraction du/des matériau(x) brut(s), le traitement, la transformation, la mise en œuvre du produit, ainsi que les transports successifs qu'aura nécessité la mise en œuvre. Sont également incluses les dépenses énergétiques des matériels et engins ayant contribué à son élaboration. De tous les matériaux de structure, le bois est celui dont le contenu en énergie grise est le plus faible : il est par exemple plus de 100 fois inférieur à celui de l'aluminium.



*Le bois: un matériau à faible coût énergétique
Énergie nécessaire à la fabrication d'1 kg de
matériau - en Mégajoules | Source: FCBA*

Figure (1-7) : Consommation énergétique des matériaux de construction

4) Valorisation des sous-produits (sciure, écorce, petit bois) :

Les produits connexes de la transformation du bois (écorces, sciures, rebuts de production ...) tout comme les produits issus de l'exploitation forestière

(rémanents, bois déchiquetés ..) sont brûlés et valorisés comme source d'énergie achevant le cycle vertueux du bois.

5) Régulation du cycle de l'eau (limitation de l'érosion et amélioration de la perméabilité des sols)

6) Amélioration du cadre de vie (paysages, lieux de détente, association aux projets HQE (Haute Qualité Environnementale))

La Haute Qualité Environnementale est une démarche volontaire qui tente de maîtriser les impacts environnementaux des chantiers de construction et de rénovation tout en répondant aux exigences croissantes de confort, de sécurité et de vie saine des maîtres d'ouvrage.

Pour ce faire, la HQE propose un langage commun (exprimé au travers de 14 cibles), il est évident que le matériau bois répond favorablement aux objectifs HQE, notamment pour la cible 2 où le bois constitue un Choix intégré des procédés et produits de construction, pour la cible 3 où les chantiers de construction en bois sont à faible nuisance, et la cible 4 avec une gestion peu énergétivore à construire et à entretenir, enfin la cible 8 où le bois assure un bon confort hygrométrique.

1.5.3 Ressources architecturales et techniques

1) Le bois se prête à toutes les formes (arcs, dômes, éléments torsés)

2) Importance d'une bonne ventilation :

Le confort d'habitation est décisif pour le bien-être des occupants d'une construction. En été, la chaleur doit rester à l'extérieur tandis qu'en hiver, elle doit rester à l'intérieur. Pour offrir une sensation de confort, une habitation par exemple doit avant tout être étanche aux courants d'air.

C'est le cas des maisons à base de bois de conception récente.

3) Performances naturelles : Mécaniques Thermiques Acoustiques
Résistance aux ambiances agressives Tenue au feu

4) Nombreux produits dérivés

5) Longévité et durabilité : Un bâtiment à base de bois bien conçu peut durer des générations !

Le bois est un matériau naturel et biodégradable. Il est durable comme le prouvent les structures en bois parfaitement intactes retrouvées dans des tombeaux égyptiens vieux de plus de 3 500 ans. Pour simplifier, il est possible d'affirmer que le bois est pratiquement éternel pour autant qu'il ait été séché et maintenu à l'abri de l'humidité.

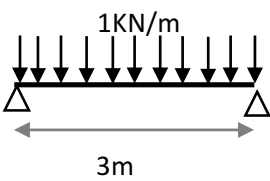
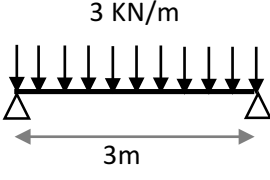
Plus proche de nous, de nombreux bâtiments en bois parfaitement conservés, datant de plusieurs centaines d'années, apportent la preuve de l'excellente longévité de la construction en bois. C'est la qualité de la conception et le soin apporté à l'exécution qui déterminent la longévité d'un ouvrage et permettent de limiter voire d'éviter les attaques biologiques. [35]

1.5.4 Propriétés techniques du bois

Le bois est un matériau solide, léger, facile à utiliser et peut être transformé en une multitude de produits. En plus de ses qualités esthétiques, le bois possède de remarquables propriétés techniques :

- 1) Il offre une bonne performance mécanique et un ratio résistance/masse très élevé.
- 2) Il résiste bien aux solutions gazeuses, acides ou salées.
- 3) Son comportement en cas d'incendie lui permet de conserver une bonne capacité portante.
- 4) Sa structure cellulaire contribue à la performance thermique et au confort acoustique.
- 5) Issu d'une ressource renouvelable et nécessitant peu d'énergie pour sa transformation, il est reconnu comme le matériau le plus écologique. [35]

Tableau (1-4) : Approche écologique[35]

		Masse	Energie	Bilan CO ₂
	Bois	30 Kg	30 kJ	- 50 Kg
	Acier	30 Kg	1800 KJ	+ 20 Kg
	Béton	300 Kg	1800 KJ	+ 110 Kg
	Bois	100 Kg	100 kJ	- 160 Kg
	Acier	60 Kg	3800 KJ	+ 40 Kg
	Béton	300 Kg	1800 KJ	+ 110 Kg

1.6 But et obligations d'un classement de résistance

Pour les différentes essences de bois (résineux et feuillus) et pour différents types de mise en œuvre du bois tels que le bois destiné à la structure, que ce soit sous forme de structures en bois massif, en bois lamellé-collé ou sous forme de charpentes industrialisées, sont données des grilles de classement, normalisées. Dans ces grilles de classement, le nom de la classe est défini par un indice numérique correspondant à la valeur caractéristique limite ultime en flexion qui est le fractile 5% . [19], [20], [21], [22]

1.6.1 Essences de bois

Les essences de bois ou groupes d'essences de bois sont identifiés par un code de quatre lettres suivant la NBN EN 13556 et NBN EN 14081-1. (Tableau 1-5)

Tableau (1-5) : Nomenclature pour les résineux européens

Codes de quatre lettres pour les résineux européens

Nom botanique	Code de 4 lettres		Nom commercial
		groupe	
<i>Pinus sylvestris</i> L.	PNSY	WPNN	Pin (européen)
<i>Pinus nigra</i> Arnold subsp. <i>Larico</i> (Poir) Marie	PNNL		Pin noir de Corse
<i>Pinus nigra</i> Arnold subsp. <i>nigra</i>	PNNN		Pinnoir d'Autriche
<i>Pinus pinaster</i> Ait	PNPN		Pin des Landes
<i>Abies alba</i> Mill.	ABAL	WPCA	Sapin argenté
<i>Picea abies</i> (L.) Karst	PCAB		Epicéa (européen)
<i>Picea sitchensis</i> (Bong.) Carr.	PCST		Epicéa Sitka
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Mirb.)	PSMN	WLAD	Douglas
<i>Larix decidua</i> Mill.	LADC		Mélèze d'Europe
<i>Larix Kaempferi</i> (Lamb.) Carr	LAKM		Mélèze du Japon

Lors de la conception de son ouvrage l'utilisateur devra avant de choisir un bois mettre en adéquation le choix de l'essence avec les conditions d'utilisation du bois.

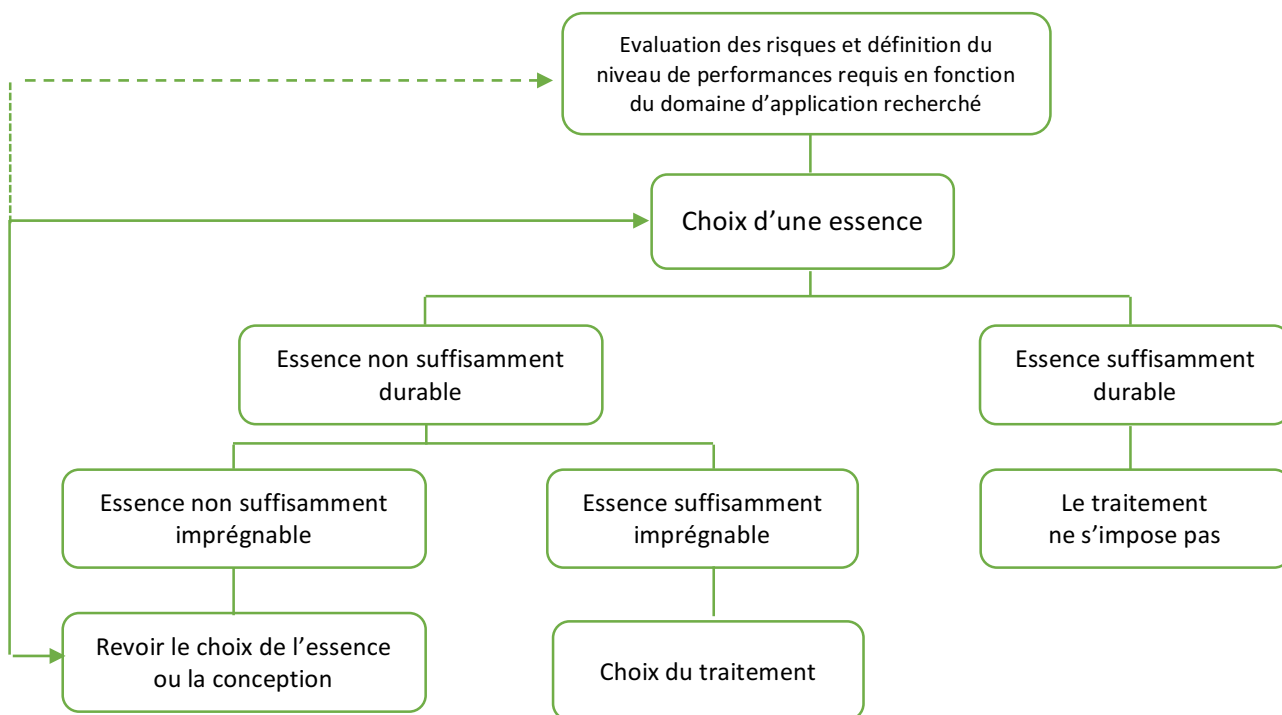


Figure (1-8) : Démarche pour le choix d'une essence (EN 350).[18]

1.6.2 Notions de classement

L'utilisation d'un bois en usage structurel est conditionnée à la connaissance de ses propriétés mécaniques. Afin de pouvoir utiliser le bois comme un matériau de construction à part entière, l'ingénieur doit disposer de valeurs de calcul (notamment dans le cadre de l'utilisation de l'Eurocode 5). Il doit connaître les contraintes admissibles ou les contraintes de rupture d'une pièce de bois. Ainsi le classement structure a pour but de proposer différentes classes où les bois seront triés en lot homogènes de même résistance, selon leurs performances mécaniques en vue d'optimiser leur utilisation en construction.

Pour réaliser ce classement, deux méthodes existent :

- La méthode visuelle (d'après la norme NFB 52- 001 de décembre 1998)
- La méthode par machine (d'après la norme EN 519 de mars 1998)

1) La méthode visuelle

Elle permet de définir une classe de résistance des sciages destinés à des emplois en structure de façon simple et utilisable sans appareillages spécifiques. Dans ce but, des critères visuels basés sur l'aspect du bois, le débit pratiqué, les altérations biologiques et les déformations géométriques des sciages ont été mis en correspondance avec des classes de résistance.

Cette méthode s'effectue selon une norme de classement référencée NFB 52-001.

Trois classes visuelles ont été retenues (ST-I, ST-II ou ST-III) pour les résineux et le peuplier et 1, 2 et 3 pour les feuillus. (Chacune de ces classes est associée à une classe de résistance).

2) La méthode par machine

Elle permet de détecter, de façon non destructive, une ou plusieurs propriétés du bois et de trier les poutres en classes de résistance. La norme NF EN 338 trie les poutres en trois classes de résistances, C18, C24 et C30 pour les résineux et le peuplier, et D18, D24 et D30 pour les feuillus. Les correspondances des classements visuels et machine sont définies par la norme NF EN 1912.

Chaque classe de tri doit correspondre à l'une des classes de résistance reprises dans la NBN EN 338 (Bois de structure – Classes de résistance). La lettre C est utilisée pour les résineux (Coniferous). La lettre D correspond quant à elle aux feuillus (Deciduous). Le nombre qui suit les lettres C ou D est la contrainte caractéristique de flexion (5ème percentile). Lorsqu'une essence feuillue ne satisfait pas à la classe de résistance la plus basse D30, le bois est classé dans une classe de résistance C (cas du peuplier).

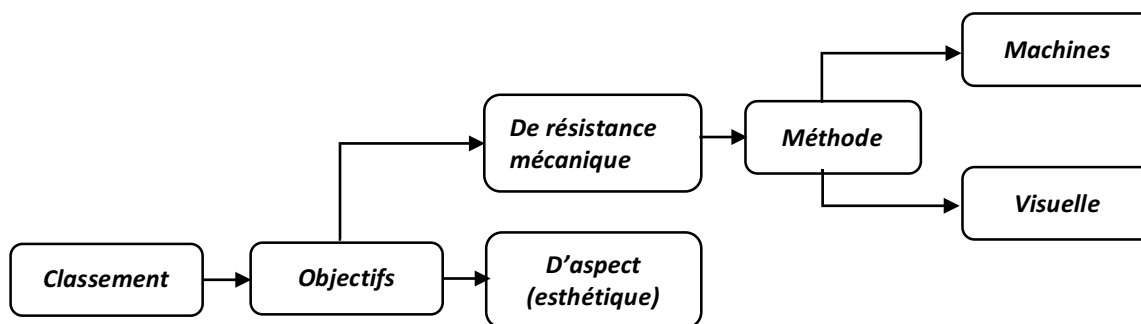


Figure (1-9) : Classes de résistance

La plupart des machines de classement en service à ce jour déterminent un module d'élasticité moyen en flexion 3 points sur de faibles portées.

La détermination du module d'élasticité est également possible par des méthodes autres que la flexion telles que les vibrations et les ultrasons. Il est également possible d'utiliser des techniques optiques, dans lesquelles les quatre faces du bois sont examinées simultanément par caméra vidéo. La détermination des proportions en surface des nœuds s'effectue par des techniques d'analyse d'images.

L'utilisation de la technologie des rayons X dans les machines de classement est intéressante car elle présente l'avantage d'augmenter considérablement la vitesse de défilement des bois. Chaque information obtenue correspond à une mesure de masse surfacique qu'il est facile de traduire en masse volumique. [51]

1.6.3 Classes de résistances et classes visuelles

Deux méthodes de classement selon la résistance sont possibles :

Tableau (1-6) : Correspondance entre le classement visuel et le classement mécanique

CLASSEMENT VISUEL NF B 52-001	CLASSEMENT MÉCANIQUE NF EN 338	EXEMPLES D'ESSENCES
ST I	C30	Sapin, épicéa, pin sylvestre, mélèze
ST II	C24	Douglas, peuplier, pin maritime
ST III	C18	Western red cedar
1	D30	Chêne, érable
2	D24	Ronde réglable en acier traité noir
3	D18	Hauts et basses en acier bichromaté

1.6.4 Les caractéristiques mécaniques des classes de résistance (EN 338 de 1995)

Le tableau de caractéristiques mécaniques présenté ci-dessous indique les valeurs de contraintes admissibles et de modules de déformations directement utilisables pour le calcul des structures pour les principales classes. Les valeurs des contraintes et des modules des autres classes sont rassemblées dans la norme EN 338.

Tableau (1-6) : Caractéristiques mécaniques

Caractéristiques mécaniques	C30	C24	C18
Contraintes admissibles (MPa)			
Flexion parallèle	13,2	10,5	8,0
Compression parallèle	11,0	9,0	8,0
Traction axiale	8,0	6,0	5,0
Cisaillement longitudinal	1,3	1,1	0,8
Compression transversale	2,5	2,3	2,0
Traction transversale	0,15	0,15	0,15

Modules conventionnels de déformation (MPa)			
Cisaillement	750	690	550
Longitudinal, effort tranchant inclus	12000	11000	10000

Source : FNB, France

1.6.5 Les utilisations possibles du bois en fonction des classes

Parmi les dizaines d'essences de bois de toutes provenances disponibles sur le marché, l'utilisateur, professionnel ou non, est souvent confronté à des choix difficiles lorsqu'il s'agit d'identifier ou d'acheter un bois. Si un bois peut séduire par son aspect (couleur, grain, texture, veinage, etc.), il convient de savoir si ses caractéristiques physiques, mécaniques, technologiques...le rendent effectivement apte à l'emploi auquel on le destine

les utilisations possibles en structure des différentes classes sont indiquées dans le tableau(1-5) ci-après :

Tableau (1-7) : Utilisation en fonction des classes du bois

Type de charpente/Classes	ST-I - C 30	ST- II- C 24	ST-III- C 18
Traditionnelle			
Industrielle (fermettes)			
Lamellé collé			

Source : FNB, France

1.6.6 Le marquage des pièces classées selon la résistance mécanique

Les principes énoncés dans la norme NF B52-001

Chaque pièce de bois structurel classée et devant circuler doit être marquée obligatoirement (cas de l'Europe).

Le marquage comportera au minimum les informations suivantes :

- ✓ La classe visuelle (ST-I, ST-II ou ST-III) ou la classe mécanique (C40, C35, C30, C24 et C18) selon l'utilisation de la méthode de classement (visuelle ou machine).
- ✓ L'essence ou le groupe d'essences.
- ✓ Le producteur.
- ✓ La norme de référence du classement effectué (NF B-52 001, EN 519...)

CHAPITRE 2 :
Règles de conception
et de calcul
selon Eurocode 5

2.1 Introduction

Les principaux objectifs des Eurocodes sont de favoriser les échanges entre les pays européens et d'harmoniser les méthodes de calculs des structures. Le statut de normes européennes (EN) des Eurocodes les relie avec toutes les directives du Conseil et/ou décisions de la Commission traitant de normes européennes comme la directive du Conseil 89/106 CEE sur les produits de la construction. Cette directive concerne le marquage CE.

Pour être vendus en Europe, tous les produits de construction doivent obligatoirement être munis du marquage CE attestant de leur conformité aux spécifications techniques imposées par la directive.

Dans le domaine des produits de construction, les exigences essentielles visent à garantir que les ouvrages auxquels ces produits sont intégrés, à condition que ces ouvrages soient convenablement conçus et construits, répondent à des prescriptions de sécurité, de résistance, de protection de l'environnement et d'économie d'énergie. Contrairement aux autres directives, les exigences essentielles portent sur les ouvrages et non sur les produits, d'où le recours à des textes de transposition (les Eurocodes par exemple) pour établir les spécifications techniques détaillées auxquelles les produits devront se conformer. [17], [77]

L'Eurocode 5 est un code aux états limites. Il envisage seulement deux types d'états limites :

- les états limites ultimes,
- les états limites de services.

Les états limites ultimes sont associés à l'effondrement de la structure ou à toutes autres formes de rupture structurale. Ainsi, ils intègrent :

- la perte d'équilibre statique,
- les ruptures dues à des déformations excessives,
- les phénomènes d'instabilité et la transformation de la structure en mécanisme.

Les états limites de service concernent :

- les déformations qui affectent l'esthétique ou l'exploitation de l'ouvrage,
- les vibrations qui causent l'inconfort des personnes ou l'endommagement de la structure,
- l'altération (incluant le développement des fissures ou fentes) qui est susceptible d'avoir un effet néfaste pour la durabilité de la structure.[31], [33], [71], [73], [81], [83]

2.2 Les actions appliquées aux structures

Le dimensionnement du système porteur débute par l'analyse des actions qui peuvent s'exercer sur la structure choisie. Deux types d'actions sont à considérer :

2.2.1 Actions permanentes G

Les actions permanentes sont essentiellement composées du poids propre de la structure et d'éventuels équipements fixes.

2.2.2 Actions variables Q

Les actions variables sont essentiellement composées des charges d'exploitation et des actions climatiques.

Les principales charges d'exploitation sont définies dans le tableau (2-1).

Tableau (2-1) : valeurs des charges d'exploitation en fonction de l'usage du bâtiment.[83]

Catégorie	q _k (kN/m ²)	Q _k (kN)
A Logement		
Plancher	1,5	2
Balcon	2,5	2
Escalier	3,5	2
B Bureau		
Bureau	2,5	4
C Locaux publics		
C1 Locaux avec tables (écoles, restaurants, etc.)	2,5	3
C2 Locaux avec sièges fixes (théâtres, cinémas, etc.)	4	4
C3 Locaux sans obstacles à la circulation (musées, salles d'exposition, etc.)	4	4
C4 Locaux pour activités physiques (dancings, salles de gymnastique, etc.)	5	7
C5 Locaux susceptibles d'être surpeuplés (salles de concert, terrasses, etc.)	5	4,5
D Commerces		
D1 Commerces de détail courants	5	5
D2 Grands magasins	5	7
E Aires de stockage et locaux industriels		
E1 Surfaces de stockage (entrepôts, bibliothèques...)	7,5	7
E2 Usage industriel	Cf. CCTP	
H Toitures		
Si pente ≤ 15 % + étanchéité	0,8*	1.5
Autres toitures	0	1.5
I Toitures accessibles		
Pour les usages des catégories A à D	Charges identiques à la catégorie de l'usage	
Si aménagement paysager	≥ 3	
q : charge uniformément répartie Q : charge ponctuelle (*) q _k sur une surface rectangulaire projetée (A x B) de 10 m ² tel que 0.5 A/B ≤ 2.		

2.3 Conditions de vérifications : les états limites

Une structure doit être vérifiée pour assurer pendant toute sa durée d'exploitation la sécurité des personnes et permettre une utilisation conforme à sa destination.

Elle doit résister à toutes les actions et influences (humidité) susceptibles d'intervenir pendant sa réalisation (montage sur le chantier) et sa durée d'utilisation.

2.3.1 État limite ultime (ELU)

Cet état limite vise à assurer la sécurité des personnes et de la structure. On distingue trois ELU :

- vérification de la résistance et des déformations des différentes parties de la structure.
- vérification des risques de perte d'équilibre statique.
- vérification du non-dépassement de la résistance du sol.

L'état limite ultime est dépassé lorsqu'il y a effondrement ou ruine du matériau.

La sollicitation doit être inférieure ou égale à la résistance : sollicitation \leq résistance.

Il faut vérifier que la valeur de calcul de la force interne, du moment ou de la contrainte induite par les actions appliquées à la structure reste inférieure ou égale à la valeur de calcul de la résistance correspondante.

Les effets des actions doivent rester inférieurs aux résistances de calcul :

$$E_d \leq R_d.$$

E_d est l'effet déterminé à partir des actions (force interne, moment ou contrainte).

R_d est la valeur de calcul de la résistance déterminée de la structure, exprimée pour une contrainte avec les annotations de l'Eurocode : [83]

$$\sigma_d (F_k, \gamma_F, \psi_i) \leq f_d (f_k, 1/\gamma_M, k_{mod})$$

σ_d : contrainte induite par les actions

F_k : actions caractéristiques (G, Q, S, W, etc.)

γ_F : coefficient partiel normal de l'action

ψ_i : coefficient de combinaison des actions

f_d : contrainte de résistance calculée

f_k : résistance caractéristique du matériau

γ_M : coefficient partiel normal du matériau

k_{mod} : coefficient modificatif

2.3.2 État limite de service (ELS)

Cet état limite vise à assurer le confort des personnes (vibrations) et à limiter les déformations. L'état limite de service est dépassé lorsque les déformations maximales sont dépassées.

Il faut vérifier que la flèche provoquée par les actions appliquées à la structure reste inférieure ou égale à la flèche limite.

2.4 Combinaisons d'actions appliquées aux structures

Il faut vérifier la fiabilité structurale pour un état limite sous l'effet simultané de différentes actions. Une combinaison correspond à un chargement calculé en effectuant la somme des actions retenues pondérées par les différents coefficients. On distinguera des combinaisons pour les ELU pour :

- La résistance de la structure ;
- La vérification de l'équilibre (soulèvement) ;
- La vérification des situations accidentelles.

D'une manière usuelle, on peut caractériser les combinaisons de la manière qui suit.

2.4.1 État limite ultime

Pour la résistance de la structure et la vérification de l'équilibre :

Combinaison fondamentale

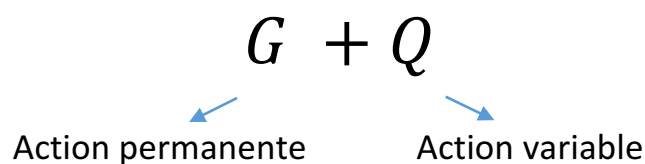
$$\gamma_G G + \gamma_Q Q$$

Avec

γ_G Coefficient partiel de l'action permanente.

γ_Q Coefficient partiel de l'action variable.

2.4.2 État limite de service



2.5 Classes de résistance du bois massif et du bois lamellé-collé

Le matériau bois présente de grandes variations de résistance et d'élasticité. Cette variabilité se retrouve d'une essence à l'autre mais également à l'intérieur d'un même arbre. Lorsque l'on réalise des essais, la majorité des échantillons auront une résistance proche de la résistance moyenne. Plus on s'en écartera, moins il y aura d'échantillons. Ces résultats sont reportés sur une courbe pour former une courbe de Gauss. Cette propriété permet de calculer une valeur de résistance mécanique afin que 95 % des échantillons aient une résistance supérieure à cette valeur calculée et que 5 % des échantillons aient une résistance inférieure à cette valeur calculée. Cette valeur est nommée valeur caractéristique. C'est une différence fondamentale entre l'Eurocode 5 et les Règles CB 71. Pour l'Eurocode 5, la valeur caractéristique résulte d'une recherche statistique ; par contre, pour les Règles CB 71, tout reposait sur la valeur admissible (contrainte lors de la rupture divisée par un coefficient de sécurité).

Il est fréquent de constater pour une même essence des variations de résistance allant de 1 à 10. Le classement de structure du bois permet de diminuer l'amplitude de cette variation. Les bois sont classés en catégories de résistance par un classement visuel (EN 518, NF B 52001) ou par un classement machine (EN 519).

On retiendra pour chaque catégorie issue du classement des valeurs caractéristiques. On la nomme « résistance au fractile de 5% ». Elles représentent par catégorie de bois une limite inférieure assurant que 95 % des bois auront une contrainte de rupture en flexion supérieure ou égale à la valeur de la classe. Par exemple, dans la classe de résineux C24, 95 % des bois de cette catégorie ont une résistance à la rupture en flexion à 24 MPa.

Le bois massif a une résistance moyenne légèrement supérieure à celle du bois lamellé-collé. Toutefois le bois reconstitué élimine de nombreuses singularités (nœuds, pente de fil importante, fentes...) et homogénéise le matériau. La dispersion de la résistance sera donc plus faible et la valeur caractéristique au fractile 5% supérieure à celle du bois massif. L'Eurocode 5 permet de prendre en compte cette propriété.

La notation des valeurs caractéristiques est la suivante.
Classement de structure :

- C24 est un bois résineux (C) de 24 MPa de contrainte caractéristique de flexion;
- D40 est un bois feuillu (D) de 40 MPa de contrainte caractéristique de flexion

- GL28h est un bois lamellé-collé (GL) homogène (h) de 28 MPa de contrainte caractéristique de flexion, les lamelles ont la même qualité sur toute la hauteur de la poutre ;
- GL32c est un bois lamellé-collé (GL) combiné (c) de 32 MPa de contrainte caractéristique de flexion, les lamelles sont d’une qualité supérieure dans les parties haute et basse de la poutre.

2.5.1 Valeurs caractéristiques des bois massifs :

Les tableaux (2-2 et 2-3) précisent les valeurs caractéristiques du bois massif (NF EN 338 - Bois de structure – Classes de résistance)

Par exemple $f_{t,90,k}$ est une contrainte (f) de traction (t), perpendiculaire au fil du bois (90°), caractéristique (k).

- $E_{0,mean}$ est un module d’élasticité (E), parallèle au fil du bois (0°), moyen ($mean$) ;
- $E_{0,05}$ est un module d’élasticité (E), parallèle au fil du bois (0°), au fractile 5 % ou au 5^e pourcentile.

Tableau (2-2) : valeurs caractéristiques des bois massifs résineux. [83]

Symbole	Désignation	Unité	C14	C16	C18	C22	C24	C27	C30	C35	C40
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	14	16	18	22	24	27	30	35	40
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	8	10	11	13	14	16	18	21	24
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	16	17	18	20	21	22	23	25	26
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2,0	2,2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	1,7	1,8	2,0	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8
$E_{0,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	7	8	9	10	11	11,5	12	13	14
$E_{0,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	4,7	5,4	6,0	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,23	0,27	0,30	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47
G_{mean}	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,44	0,50	0,56	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	290	310	320	340	350	370	380	400	420
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne	kg/m ³	350	370	380	410	420	450	460	480	500

Tableau (2-3) : valeurs caractéristiques des bois massifs feuillus. [83]

Symbole	Désignation	Unité	D30	D35	D40	D50	D60	D70
$f_{m,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	30	35	40	50	60	70
$f_{t,0,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	18	21	24	30	36	42
$f_{t,90,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
$f_{c,0,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	23	25	26	29	32	34
$f_{c,90,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5
$f_{v,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0
$E_{0,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	10	10	11	14	17	20
$E_{0,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8
$E_{90,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33
G_{mean}	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25
ρ_k	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	530	560	590	650	700	900
ρ_{mean}	Masse volumique moyenne	kg/m ³	640	670	700	780	840	1080

2.5.2 Valeurs caractéristiques des bois lamellés :

Le tableau (2-4) précise les valeurs caractéristiques du bois lamellé-collé (NF EN 338 - Bois de structure – Classes de résistance)

Tableau (2-4) : valeurs caractéristiques des bois lamellés. [83]

Symbole	Désignation	Unité	Lamellés-collés homogènes				Lamellés-collés panachés			
			GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c
$f_{m,g,k}$	Contrainte de flexion	N/mm ²	24	28	32	36	24	28	32	36
$f_{t,0,g,k}$	Contrainte de traction axiale	N/mm ²	16,5	19,5	22,5	26,0	14,0	16,5	19,5	22,5
$f_{t,90,g,k}$	Contrainte de traction perpendiculaire	N/mm ²	0,40	0,45	0,50	0,60	0,35	0,40	0,45	0,50
$f_{c,0,g,k}$	Contrainte de compression axiale	N/mm ²	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
$f_{c,90,g,k}$	Contrainte de compression perpendiculaire	N/mm ²	2,7	3,0	3,3	3,6	2,4	2,7	3,0	3,3
$f_{v,g,k}$	Contrainte de cisaillement	N/mm ²	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
$E_{0,g,mean}$	Module moyen axial	kN/mm ²	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
$E_{0,g,05}$	Module axial au 5 ^e pourcentile	kN/mm ²	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
$E_{90,g,mean}$	Module moyen transversal	kN/mm ²	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
$G_{g,mean}$	Module de cisaillement	kN/mm ²	0,75	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
$\rho_{g,k}$	Masse volumique caractéristique	kg/m ³	380	410	430	450	350	380	410	430

2.6 Recherche des valeurs des résistances du bois

La résistance du bois et des produits dérivés est liée à leur humidité moyenne, à la durée d'application des charges et à la grande dispersion des caractéristiques mécaniques.

2.6.1 Facteur modificatif k_{mod}

La résistance d'un bois (à l'intérieur d'une même classe de résistance) est influencée par deux paramètres :

- la durée d'application des chargements ;
- l'humidité moyenne du bois lorsqu'il est mis en œuvre.

En effet, un bois sec supportant une charge de courte durée sera plus résistant qu'un bois humide supportant une charge sur une longue période. Ces deux caractères permettent de définir le facteur k_{mod} (modificatif).

Le facteur k_{mod} doit être sélectionné en fonction de la charge la plus courte. Si une combinaison de charge comprend des charges de structure et des charges d'exploitation, le facteur k_{mod} sera sélectionné en fonction des charges d'exploitation.

Le tableau (2-5) mentionne la valeur du k_{mod} en fonction de la durée de la charge et de la classe de service.

Tableau (2-5) : valeur du k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué. [83]

Durée de chargement		Classe de service		
Classe de durée	Exemple	1 Hbois < 13 % (local chauffé)	2 13 % < Hbois < 20 % (sous abri)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
Permanente (> 10 ans)	Charge de structure	0,6	0,6	0,5
Long terme (6 mois à 10 ans)	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme (1 semaine à 6 mois)	Charges d'exploitation	0,8	0,8	0,65
	Neige Altitude > 1 000 m			
Court terme (< 1 semaine)	Neige Altitude < 1 000 m	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Vent, neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9

2.6.2 Coefficient γ_M

La dispersion des caractéristiques mécaniques du métal est plus faible que la dispersion des produits dérivés du bois, qui elle-même est plus faible que la dispersion du bois massif. Le coefficient γ_M (matériau) diminue la résistance des matériaux. Le tableau (2-6) indique la valeur du γ_M pour les principaux matériaux de structure.

Tableau (2-6) : valeur du γ_M en fonction de la dispersion du matériau. [83]

États limites ultimes		
Combinaisons fondamentales		
Matériaux	Bois	1,3
	Lamellé-collé	1,25
	Lamibois (LVL), OSB	1,2
Assemblages (p. 171)		1,3
Combinaisons accidentelles		1,0
États limites de service		1,0

La résistance de calcul se détermine par la formule suivante : par exemple, pour la résistance en flexion : $f_{m,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$

k_{mod} : coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (humidité du bois).

γ_M : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

2.7 Valeurs limites de flèches

L'Eurocode 5 distingue la flèche instantanée (W_{inst}), la flèche de fluage (W_{creep}), la contre-flèche (W_c), la flèche résultante finale ($W_{net,fin}$) et la flèche finale (W_{fin}).

La flèche instantanée (W_{inst}) est provoquée par l'ensemble des charges au moment de leur application.

La flèche de fluage (W_{creep}) correspond à l'amplification de la flèche due aux charges de longue durée. Le calcul des charges est réalisé à partir des combinaisons d'actions quasi permanentes (ELS_{diff}). Un coefficient multiplicatif k_{def} permet de tenir compte du fluage du bois en service.

La flèche finale (W_{fin}) est la somme de la flèche instantanée (W_{inst}) et la flèche de fluage (W_{creep}) : $W_{fin} = W_{inst} + W_{creep}$.

La contre-flèche (W_c) peut être réalisée à l'atelier lors de la fabrication de la poutre, notamment les poutres en lamellé-collé. Elle permet d'augmenter sensiblement la valeur absolue de la déformation de la poutre tout en restant dans les limites réglementaires.

La flèche résultante finale ($W_{net,fin}$) est la flèche apparente totale mesurée sous la ligne des appuis. Elle est déterminée par la formule :

$$\begin{aligned} W_{net,fin} &= W_{fin} - W_c \\ &= W_{inst} + W_{creep} - W_c \end{aligned}$$

La flèche résultante finale (W) est mesurée sous les appuis

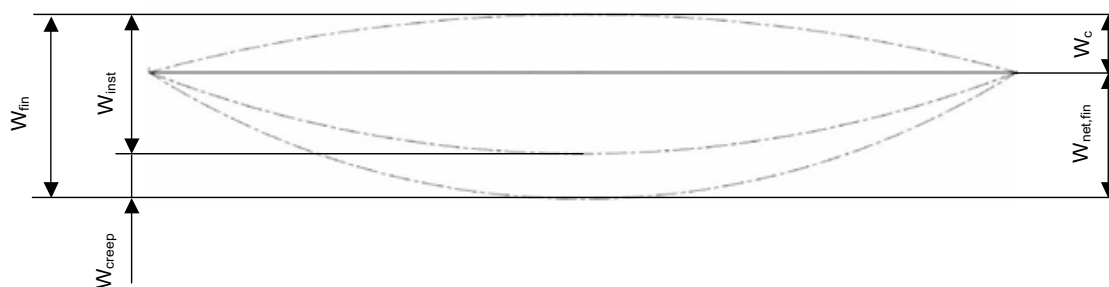


Schéma : (2-1)

Les valeurs de flèches proviennent de la norme NF EN 1995-1-1/NA, indice de classement : P21-711-1/NA.

Trois contraintes sont imposées : la flèche finale, la flèche instantanée sous charges variables ($W_{inst}(Q)$) et l'éventuelle contre-flèche (incluse dans W_{fin}). Le tableau (2-7) indique les valeurs de flèche conventionnelles. Ces valeurs sont des flèches relatives à la distance entre appuis. [83],[84]

Tableau (2-7) : valeurs limites pour les flèches verticales et horizontales. [83]

	Bâtiments courants			Bâtiments agricoles et similaires		
	$W_{inst}(Q)$	$W_{net,fin}$	W_{fin}	$W_{inst}(Q)$	$W_{net,fin}$	W_{fin}
Chevrans	–	L/150	L/150	–	L/150	L/150
Éléments structuraux	L/300	L/200	L/125	L/200	L/150	L/100

L/300 représente une flèche de 2 cm pour une poutre de 6 m entre appuis.

Consoles et porte-à-faux : la valeur limite sera doublée. La valeur limite minimum est 5 mm.

Panneaux de planchers ou supports de toiture : $W_{net,fin} < L/250$.

Flèche horizontale : L/200 pour les éléments individuels soumis au vent. Pour les autres applications, elles sont identiques aux valeurs limites verticales des éléments structuraux.

Le tableau (2-8) permet de calculer l'influence du fluage sur la déformation. Il mentionne la valeur de k_{def} en fonction de l'humidité du bois. Ce critère est très important, car il peut varier de 0.6 à 2, voire 3 pour du bois dont l'humidité est supérieure à 20 %.

Tableau (2-8) : valeur de k_{def} (fluage). [83]

Matériau / classe de durée de charge		Classe de service		
		1 Hbois < 13 % (local chauffé)	2 13 % < Hbois < 20 % (sous abris)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
Bois massif ⁽¹⁾	NF EN 14081-1 de mai 2006	0,60	0,80	2,00
Lamellé-collé	NF EN 14080 de décembre 2005	0,60	0,80	2,00
Lamibois (LVL)	NF EN 14374 de mars 2005	0,60	0,80	2,00
Contreplaqué	NF EN 636 de décembre 2003			
	Milieu sec	0,80	Sans objet	Sans objet
	Milieu humide	0,80	1,00	Sans objet
	Milieu extérieur	0,80	1,00	2,50
OSB	NF EN 300 d'octobre 2006			
	OSB/2	2,25	Sans objet	Sans objet
	OSB /3 /4	1,50	2,25	Sans objet
Panneau de particules	EN 312 de février 2004			
	Milieu sec (P4)	2,25	Sans objet	Sans objet
	Milieu humide (P5)	2,25	3,00	Sans objet
	Sous contrainte élevée, milieu sec (P6)	1,50	Sans objet	Sans objet
	Sous contrainte élevée, milieu humide (P7)	1,50	2,25	Sans objet

(1) – Pour les bois massifs placés à une humidité supérieure à 20 % et susceptibles de sécher sous charge (classe de service 2), k_{def} est augmenté de 1,00.

2.8 Flexion des poutres simples

La flexion concerne de nombreuses pièces, telles que les solives, poutres maîtresses et tous autres éléments horizontaux. Cette sollicitation est la plus fréquemment rencontrée.

Les poutres travaillent en flexion simple lorsqu'elles se déforment dans un plan et lorsqu'elles ne subissent pas simultanément d'autres sollicitations, telles que la traction ou la compression.

La justification des poutres droites travaillant en flexion doit être réalisée sur le critère résistance, la poutre ne doit pas casser et sur le critère déformation, la flèche de la poutre ne doit pas dépasser une valeur limite tenant compte de l'augmentation de la flèche dans le temps, c'est le fluage. Les déformations augmentent avec la durée d'application de la charge et l'humidité du bois

Si les dimensions et conditions d'appui de la poutre sont suffisantes pour prévenir les phénomènes d'instabilité, les déformations apparaissent seulement dans le plan de chargement. La flexion produit une contrainte dans la direction de l'axe de la poutre, c'est -à- dire normale à la section de la poutre. Cette contrainte est nulle sur la ligne moyenne (milieu de la poutre si la section est symétrique). Elle est maximale dans la zone supérieure et inférieure de la poutre (schéma 2-2).

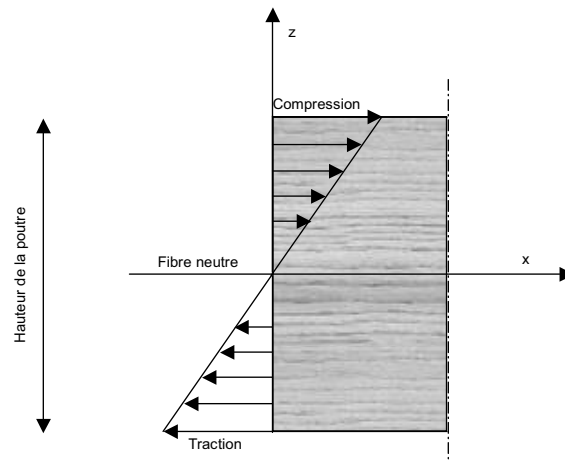


Schéma : (2-2) : Diagramme des contraintes de flexion

Alors suivant la théorie de l'élasticité, la contrainte de flexion dans une section est donnée par l'équation :

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{f,y}}{\frac{I_{G,y}}{V}}$$

$M_{f,y}$: moment de flexion.

$I_{G,y}$: moment quadratique, $\frac{bh^3}{12}$ pour une section rectangulaire disposée sur chant.

V : distance à la fibre neutre, $\frac{h}{2}$ pour une section rectangulaire disposée sur chant.

$\frac{I_{G,y}}{V}$: module de flexion, $\frac{bh^2}{6}$ pour une section rectangulaire disposée sur chant.

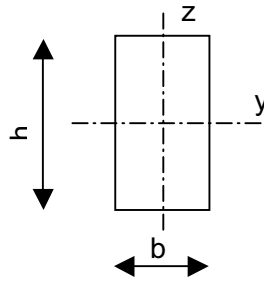


Schéma (2-3) : axes y et z de la section

En générale, cette équation peut être utilisée pour décrire le comportement d'une poutre :

- fléchie uniquement dans son plan transversal,
- fléchie suivant son axe longitudinal avec des blocages latéraux répartis régulièrement de telle sorte que l'élanement soit faible. [57], [73], [83]

2.8.1 Vérification de la résistance (ELU)

La contrainte de flexion est induite par la charge qui est calculée aux ELU, états limites ultimes. Elle doit rester inférieure à la contrainte de résistance déterminée.

$$\text{Taux de travail} = \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

Étant donné que l'Eurocode 5 permet le calcul des structures en bois suivant l'hypothèse d'un comportement élastique, l'expression ci-dessus peut être utilisée pour le calcul. [81]

$f_{m,d}$: résistance de flexion calculée en MPa

La résistance de calcul en flexion $f_{m,d}$ d'une poutre est définie par :

$$f_{m,d} = f_{m,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \cdot k_{sys} \cdot k_h$$

$f_{m,k}$: contrainte caractéristique de résistance en flexion en MPa.

k_{mod} : coefficient modificatif prend en compte l'influence de la durée de charge, de l'ambiance et de la classe de service du matériau.

γ_M : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

k_{sys} : (coefficient d'effet système)

L'effet système apparaît lorsque plusieurs éléments porteurs de même nature et de même fonction (solives, fermes) sont sollicités par un même type de chargement réparti uniformément. La résistance de l'ensemble est alors supérieure à la résistance d'un seul élément pris isolément. Nous limiterons son application aux solives et fermes assemblées par connecteurs. Le coefficient est de 1,1.

k_h : (coefficient de hauteur)

Le coefficient k_h majore les résistances pour les hauteurs inférieures à 150 mm pour le bois massif et 600 mm pour le bois lamellé-collé. Le risque de défauts cachés dans la structure du bois est moins important pour les petites sections que pour les grandes sections.

✓ Calcul du coefficient de hauteur pour du bois massif.

- Si $h \geq 150$ mm, $k_h = 1$

- Si $h < 150$ mm, $k_h = \min(1,3 ; (150/h)^{0,2})$.

Avec h la hauteur de la pièce en mm.

✓ Calcul du coefficient de hauteur pour du bois lamellé-collé.

- Si $h \geq 600$ mm, $k_h = 1$.

- Si $h < 600$ mm, $k_h = \min(1,1 ; (600/h)^{0,1})$.

Avec h la hauteur de la pièce en mm.

k_{crit} : coefficient d'instabilité provenant du déversement. Une poutre soumise à un moment de flexion peut déverser (flambement latéral de la membrure comprimée). Le calcul du coefficient k_{crit} s'effectue à partir de la contrainte critique de flexion σ_{crit} et de l'élanement relatif de flexion $\lambda_{rel,m}$.

Enfin si la poutre est utilisée dans un système induisant des redistributions d'efforts, sa résistance en flexion peut être augmentée par un coefficient k_{ls} .

➤ Instabilité des poutres

La première étape de la conception est de déterminer la capacité portante et la rigidité en flexion selon l'axe principal d'inertie, dans le plan vertical en général. Ceci conduit à une forme de section où la rigidité dans le plan vertical est généralement beaucoup plus grande que celle dans le plan horizontal. [81]

Pour une poutre simplement appuyée de section rectangulaire $b \times h$, la contrainte critique en flexion (contrainte à partir de laquelle apparaît le déversement) est donnée par la relation simplifiée :

$$\sigma_{crit} = E \frac{\pi}{l_{ef}} \frac{b^2}{h} \sqrt{\frac{G}{E}} \sqrt{\frac{1 - 0,63 \frac{b}{h}}{1 - \frac{b^2}{h^2}}}$$

Où

E : le module d'élasticité longitudinal du matériau,

G : le module de cisaillement du matériau,

l_{ef} : la longueur libre de la poutre.

Le terme de droite correspondant à la racine carrée varie entre 0,94 et 1,5 pour des valeurs de b/h comprises entre 0,1 et 0,7. Ce rapport de dimensions est courant pour les poutres de section rectangulaire. Il est donc conservatif de remplacer le terme racine carrée par 0,94. Pour un matériau homogène, il y a seulement une valeur pour E et G . Dans le bois les valeurs de E et G dépendent de la direction des contraintes par rapport à la direction des fibres du bois.

En général, la valeur de $E_{0,05}$ (parallèle au fil) peut être utilisée et G est de manière conservative prise égale à $E_{0,05}/16$.

Ceci conduit à une contrainte critique (pour bois résineux de section rectangulaire) égale à :

$$\sigma_{crit} = \frac{0,78 \cdot E_{0,05} \cdot b^2}{h \cdot l_{ef}}$$

$E_{0,05}$: module axial au 5^e pourcentile (ou caractéristique) en MPa.

b et h : hauteur et épaisseur de la poutre en mm.

l_{ef} : longueur efficace, $l_{ef} = L \times k_{lef}$.

Valeurs de k_{lef} lorsque les appuis sont limités en torsion (sabots, encastrement dans un mur...) :

Sur appuis simples : – charge répartie : 0,9 ; – charge concentrée : 0,8.

Porte-à-faux : – charge répartie : 0,5 ; – charge concentrée : 0,8.

Si la poutre est chargée sur sa fibre comprimée l_{ef} est augmentée de la valeur $2h$. Si la poutre est chargée sur sa partie tendue, l_{ef} est diminuée de $0,5h$.

La position du point d'application des actions est importante. L'application des actions sur la fibre supérieure d'une poutre élancée a un effet déstabilisateur. À l'opposé, un chargement sur la fibre supérieure a un effet stabilisateur. De manière évidente, les conditions d'appui sont aussi importantes. Un blocage latéral empêche le développement des déformations latérales correspondant aux effets de torsion de la poutre au niveau des appuis dans la direction x . Il augmente donc la stabilité latérale de la poutre. L'augmentation de la stabilité due à l'amélioration des conditions d'appui se traduit généralement par de plus petites valeurs de longueur effective.

En résumé, les principaux facteurs qui influencent la stabilité latérale sont :

- la portée libre de la partie comprimée de la poutre (c'est à dire la distance entre les points de blocage latéral),
- la rigidité en flexion de la poutre EI_z ,
- la rigidité en torsion de la poutre GI_{tor} ,
- les conditions d'appuis aux extrémités de la poutre.

La capacité résistante d'une poutre susceptible de déverser peut-être augmentée par la mise en place de blocages latéraux. Les principales exigences sont que ces éléments de blocage soient suffisamment rigides pour empêcher tout mouvement latéral de la poutre et suffisamment résistants pour supporter les efforts transmis par la poutre.

L'Eurocode 5 exige une vérification des conditions d'instabilité en appliquant un coefficient k_{crit} à la résistance en flexion :

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d}$$

où

$$k_{crit} = 1 \quad (\text{pour } \lambda_{rel,m} \leq 0,75)$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m} \quad (\text{pour } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4)$$

$$k_{crit} = \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2} \quad (\text{pour } 1,4 < \lambda_{rel,m})$$

et où l'élanement relatif $\lambda_{rel,m}$ en flexion est donné par :

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}}$$

$\sigma_{m,crit}$: contrainte critique de flexion.

$f_{m,k}$: contrainte de flexion caractéristique en MPa.

Valeur du coefficient k_{crit}

Si $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$; $k_{crit} = 1$, pas de déversement.

Si $0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4$; $k_{crit} = 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m}$

Si $1,4 < \lambda_{rel,m}$; $k_{crit} = 1/\lambda_{rel,m}^2$

2.8.2 Vérification des déformations (ELS)

La deuxième vérification concerne la déformation. Pour la majorité des poutres en bois travaillant en flexion, c'est le critère dimensionnant, c'est-à-dire le plus défavorable. L'état limite de service est respecté lorsque les déformations restent inférieures aux valeurs admises.

Il faut vérifier que la flèche provoquée par les actions appliquées à la structure reste inférieure ou égale à la flèche limite $W_{\text{verticale}}$ ou $W_{\text{horizontale}}$ limite

$$\frac{W_{inst}(Q)}{W_{\text{verticale ou horizontale limite instantatée}}} \leq 1 ; \frac{W_{net,fin}}{W_{\text{verticale ou horizontale limite net finale}}} \leq 1$$

et
$$\frac{W_{fin}}{W_{\text{verticale ou horizontale limite finale}}} \leq 1$$

La flèche instantanée $W_{inst}(Q)$ est provoquée par l'ensemble des charges variables au moment de leur application.

On rappelle que la flèche nette finale $W_{net;fin}$ est déterminée par la formule :

$$\begin{aligned}W_{net;fin} &= W_{inst} + W_{creep} - W_c \\ &= W_{fin} - W_c\end{aligned}$$

- Calcul de la combinaison des actions pour vérifier la flèche instantanée W_{inst}

La flèche instantanée est calculée avec la combinaison ELS. L'action permanente (poids de la structure par exemple) n'est pas prise en compte et l'action variable de base (charge d'exploitation par exemple) n'est pas pondérée. S'il y a une action variable d'accompagnement, elle sera minorée par le coefficient ψ_0 . La flèche instantanée ne doit pas dépasser une valeur limite.

- Calcul de la combinaison des actions pour déterminer la flèche différée W_{creep}

La flèche différée est calculée avec la combinaison ELS. Le poids de la structure est pondéré par le coefficient k_{def} , les actions variables (charges d'exploitation, de neige, etc.) sont pondérées par le coefficient k_{def} et le coefficient ψ_2 .

La flèche différée doit être ajoutée à la flèche instantanée totale, c'est-à-dire en tenant compte des actions permanentes et variables lorsqu'il n'y a pas de contre flèche. La somme correspond à la flèche nette finale. Elle ne doit pas dépasser une valeur limite. [83]

2.9 Le cisaillement

La présence de cisaillement vertical et horizontal dans les poutres droites horizontales soumises à un chargement vertical est expliqué. La distribution des contraintes de cisaillement dans la section d'une poutre est présentée ainsi que la résistance en cisaillement (cisaillement parallèle aux fibres).

Au sein d'un élément fléchi, des contraintes de cisaillement apparaissent suivant la théorie de l'élasticité. Les contraintes de cisaillement perpendiculaires à l'axe de la poutre sont toujours associées à des contraintes de cisaillement équivalentes parallèles à l'axe de la poutre.

Dans les poutres à âmes minces collés (poutre en I et poutre caisson), des contraintes de cisaillement se développent dans l'âme (cisaillement plan) et dans la zone de contact entre l'âme et les membrures (cisaillement roulant). La résistance en cisaillement roulant est normalement plus faible que

la résistance en cisaillement plan. Cependant, les deux phénomènes doivent être pris en compte, l'un ou l'autre pouvant être critique. Des considérations similaires s'appliquent aux poutres à âmes minces collées. Le cisaillement a aussi un effet sur le déversement des âmes ou des panneaux.

Pour le bois (et le bois lamellé coupé), la résistance en cisaillement longitudinal est très inférieure à la résistance en cisaillement perpendiculaire au fil (coupant les fibres). Ainsi le premier est critique et doit être pris en compte dans le calcul des poutres en bois lamellé collé.

Des résultats de recherche indiquent que la résistance en cisaillement dépend du volume contraint. Mais jusqu'à présent cet éventuel effet du volume contraint en cisaillement n'est pas introduit dans l'Eurocode 5.

Selon la théorie des poutres en élasticité linéaire la contrainte de cisaillement en tout point d'une section de la poutre est définie par : [73], [83]

$$\tau_d = \frac{V S}{I b}$$

où τ_d est la contrainte de cisaillement,

V est l'effort tranchant,

I est le moment d'inertie de la section de la poutre par rapport à l'axe neutre en mm^4 ,

b est la largeur du plan de cisaillement au niveau considéré,

S est le moment statique de l'aire au-dessus du plan de cisaillement par rapport à l'axe neutre, en mm^3 .

Pour une section rectangulaire, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement est :

$$\tau_d = \frac{3 V}{2 A}$$

Pour une section rectangulaire, la distribution des contraintes de cisaillement est parabolique, Schéma (2-4) avec une valeur maximale sur l'axe neutre.

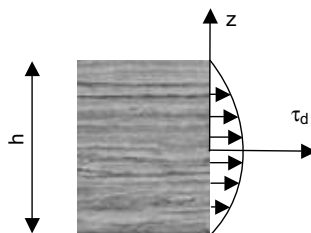


Schéma (2-4) : la contrainte de cisaillement d'une poutre à section symétrique.

Pour une section circulaire, la valeur maximale est :

$$\tau_d = \frac{4V}{3A}$$

L'effort tranchant et donc la contrainte sont induits par la charge qui est calculée aux états limites ultimes. Elle doit rester inférieure à la contrainte de résistance déterminée.

$$\text{Taux de travail} = \frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 1$$

Si la poutre est entaillée au niveau de l'effort (appuis par exemple), la résistance sera diminuée par le coefficient k_v . Le taux de travail devient :

$$\text{Taux de travail} = \frac{\tau_d}{k_v f_{v,d}} \leq 1$$

De nombreux chercheurs ont montré que les contraintes de cisaillement dues à un chargement proche des appuis sont plus faibles que celles calculées suivant la théorie des poutres. Ceci a conduit à l'introduction de la notion d'effort tranchant réduit.

On peut écrire contrainte de cisaillement pour une poutre en bois τ_d induite par la combinaison d'action des ELU :

$$\tau_d = \frac{k_f \times V}{b \times h_{ef}}$$

k_f : coefficient de forme de la section valant 3/2 pour une section rectangulaire et 4/3 pour une section circulaire.

V : effort tranchant.

b : épaisseur de la pièce.

h_{ef} : hauteur réelle exposée au cisaillement.

- $f_{v,d}$: résistance de cisaillement est donnée par :

$$f_{v,d} = f_{v,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$f_{v,k}$: contrainte caractéristique de résistance de cisaillement.

k_{mod} : coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service.

γ_M : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

- k_v : coefficient d'entaillage

Ce coefficient traduit l'effet de concentration de contrainte provoqué par un usinage sur une zone sollicitée au cisaillement. Il doit être appliqué lorsque les deux conditions suivantes sont réunies :

- l'entaille de la poutre est dans la zone tendue (généralement la partie inférieure de la poutre) ;
- la pente de l'entaille est supérieure à 10 %. Ce coefficient vaut 1 si l'entaille est dans la zone comprimée (généralement la partie supérieure de la poutre) ou si la pente de l'entaille est inférieure à 10 %.

DEUXIEME PARTIE :

Optimisation

CHAPITRE 3 :

Concepts

&

formulation générale

d'un problème

d'optimisation structurale

3.1 Introduction

Les techniques d'optimisation sont aujourd'hui utilisées dans de très nombreux domaines, et bien sûr, ces outils sont utilisés dans les bureaux d'études de mécanique et de génie civil.

Ce n'est plus une affaire de spécialistes comme ça l'était dans les années 1980. On ne peut plus ignorer ces méthodes et leur bonne compréhension devient essentielle. Les problèmes d'optimisation occupent à notre époque une place de choix. Certains outils d'optimisation sont spécifiques à un type de problème et ont été développés pour répondre à un besoin précis, d'autres sont généraux...

Des outils spécifiques ont vu leur champ d'application s'étendre progressivement, d'autres ont une utilisation qui est restée limitée. Mais tous les outils d'optimisation ont un point commun : ils reposent sur un socle mathématique relativement important et sont souvent difficiles à comprendre et à utiliser.

Il est en effet important de mettre en évidence, et de manière simple, la connaissance pratique des méthodes d'optimisation. Nous n'aborderons pas le problème de l'optimisation d'un point de vue mathématique, mais simplement du point de vue d'un ingénieur pragmatique.

De tout temps, le concepteur des structures a été confronté à trois questions : Est-ce possible ? Peut-on faire mieux ? Quelle est la meilleure solution ? Ces questionnements et les concepts sous-jacents sont à l'opposé des modes de pensée classique, il ne s'agit plus de résoudre des problèmes directs mais des problèmes inverses.

Un problème est direct quand, à partir des données qui sont toutes connues, on cherche la solution.

Un problème est inverse quand, connaissant le résultat que l'on souhaite, on cherche les données qui permettent de l'atteindre. En conception optimale, on ne connaît pas à l'avance le résultat mais on connaît les performances que l'on souhaite atteindre car on se les impose. C'est un cas particulier de problème inverse. Pour diverses raisons, il peut ne pas y avoir de solution, ou il peut y en avoir de nombreuses. L'optimisation et en particulier l'optimisation des structures est donc étroitement liée à la famille des problèmes inverses.

Historiquement, les premières méthodes d'optimisation provenaient de résolutions mathématiques, que l'on retrouve par exemple dans les travaux de Fermat, Lagrange et Hamilton. Des méthodes algorithmiques itératives ont également été proposées par Newton et Gauss. Les premières méthodes dites de "programmation linéaire" ont été introduites par Kantorovich peu de temps avant qu'elles ne soient redécouvertes et améliorées par Dantzig. Ces méthodes étaient originellement dédiées à la planification de programmes

militaires pendant la seconde guerre mondiale. D'où le terme "programmation", qui ne fait pas référence au départ à une programmation informatique, mais plutôt aux termes planification et ordonnancement. Ces méthodes ont ensuite été étendues à tout type d'optimisation linéaire.

Une grande partie du métier d'ingénieur consiste à trouver une solution à un problème, qu'il soit technique (ce qui constitue le cœur du métier), financier, organisationnel. Pour être admissible, cette solution doit atteindre un objectif ou une fonction principale et elle doit satisfaire à un certain nombre de contraintes, traduites ou non par les lois de la physique selon le type de problème. Il existe toujours plusieurs solutions possibles et le concepteur est tenté de rechercher la meilleure (au sens qu'il devra définir) : il est donc tenté d'optimiser.[34], [36], [37], [65], [67], [68], [74], [80]

3.2 Optimisation structurale

Déterminer la forme appropriée des éléments structuraux est un problème de première importance pour l'ingénieur. Dans tous les domaines de la mécanique des structures, l'impact de la bonne conception d'une pièce est très important sur sa résistance, sa durée de vie et son utilisation en service. Ce défi est quotidien dans les secteurs des travaux publics et du génie civil....Le développement de l'art de l'ingénieur requiert des efforts considérables pour améliorer sans cesse les techniques de conception des structures. L'optimisation intervient de façon primordiale dans l'augmentation des performances des structures entraînant ainsi de substantielles économies.

Pour illustrer l'évolution des techniques d'optimisation structurale, on peut scinder arbitrairement l'optimisation des structures en trois grandes familles. Historiquement, chacune a été abordée par ordre croissant de difficulté et de généralité :[64], [70]

1) Le dimensionnement des structures (figure a) qui ne permet de modifier que la section droite ou l'épaisseur transversale des éléments d'une structure dont la forme et la topologie sont fixées. Aucune modification du modèle géométrique n'est possible.

Ce type d'optimisation de dimensionnement (optimisation paramétrique) est utilisé pour améliorer le design de structures dont la maturité est déjà bien avancée. C'est aussi l'optimisation la plus intuitive dans sa formulation, dans la mesure où elle correspond directement à la formulation du cahier des

charges de la structure.

L'objectif correspond le plus souvent à la minimisation de la masse.

Les variables considérées sont n'importe quel champ de propriété ou matériau du modèle. Ci-après, quelques exemples non-exhaustifs :

Tableau (3-1) : Exemples des variables du problème d'optimisation

Type de variable	Ce qui peut varier
Elément 1D	Section, Inerties, Moment de torsion
Elément 2D	Epaisseur
Matériau isotrope	Module de Young E

Pour les contraintes du problème, il s'agit de formuler la liste des exigences du cahier des charges.

2) L'optimisation de forme (figure b) admet des changements de forme compatibles avec une topologie fixée au préalable. L'optimisation de forme classique modifie la représentation paramétrique des frontières du domaine. En faisant bouger les frontières des domaines, on peut rechercher une meilleure solution parmi l'ensemble de toutes les structures obtenues par transformation homéomorphe de la structure originale. Dans ce cas, il est clair que l'on peut admettre un changement des dimensions transversales aussi bien qu'une modification de la configuration de la structure, mais il n'est certainement pas permis d'altérer la connectivité ou la nature des membres structuraux.

L'optimisation de forme est, comme l'optimisation de dimensionnement, une optimisation avec un objectif en masse, dont les contraintes correspondent au cahier des charges de la structure. Toutefois, dans l'optimisation de forme, ce sont les coordonnées des nœuds du maillage qui changent, selon une transformation admissible.

L'optimisation de forme est donc utilisée dans des phases projet où il y a encore une certaine liberté dans la définition du design et correspond bien à des phases de maturité moyenne.

On notera que l'optimisation de forme peut être couplée avec une optimisation de dimensionnement.

3) Enfin, l'optimisation topologique (figure c) permet de modifier plus fondamentalement la nature de la structure. Cette fois, la géométrie de la pièce est envisagée sans aucun a priori sur la connectivité des domaines

ou des membres structuraux présents dans la solution. Optimiser la topologie conduit naturellement à déterminer d'une certaine manière la forme ou les dimensions transversales optimales de la structure, de sorte que certains auteurs lui attribuent aussi le nom d'optimisation de forme généralisée.

Pour un projet de structure l'optimisation topologique intervient habituellement dans les phases préliminaires du projet. L'idée est de trouver le meilleur chemin de raidissement dans un volume donné de matière. Ainsi, la masse ne se trouve que là où on en a besoin, ce qui est un très bon départ pour une optimisation de forme ou de dimensionnement.

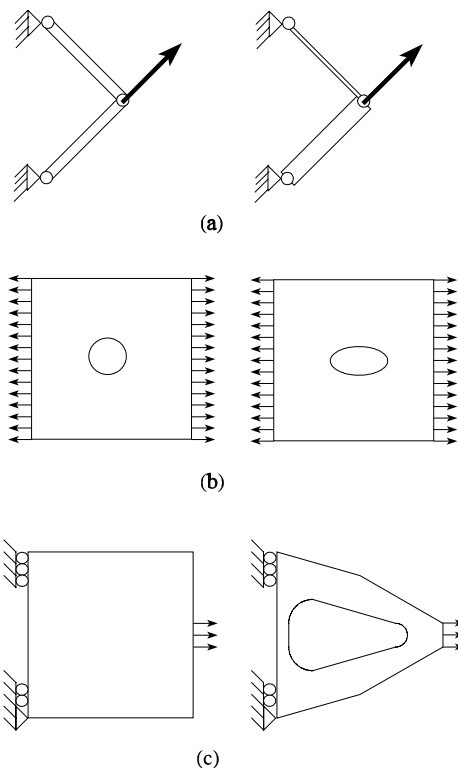


Figure (3-1) : Les 3 classes de problèmes d'optimisation des structures. (a) Dimensionnement. (b) Forme avec topologie fixée. (c) Topologie variable. [70]

Il est évident que les gains de performance sont une fonction croissante de la liberté dont on dispose pour réaliser l'optimisation. Ainsi, la flexibilité disponible avec une topologie variable permet des gains de performance très significatifs et nettement supérieurs à ceux obtenus par une méthode d'optimisation de forme paramétrique.

Pour des problèmes de conception courants, on peut estimer que les gains moyens de performance vont, en dimensionnement, de 5 à 10% et, en optimisation de forme avec une topologie fixée, de 10 à 30%. Avec l'optimisation topologique, on pense que les gains générés peuvent aller de 40 à 100 % sur le critère de performance. Ces chiffres démontrent toute l'utilité

et toute la potentialité de l'optimisation des structures.

Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisés. Les techniques d'optimisation des structures élastiques linéaires sont capables de maîtriser les problèmes de conception dont les variables sont des dimensions transversales et des paramètres de forme. De nombreuses applications sont venues prouver la maturité des codes de calcul qui en résultent. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique.

L'optimisation est une branche des mathématiques cherchant à modéliser, à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à minimiser ou maximiser une fonction sur un ensemble. [70]

3.3 La modélisation mathématique :

Tout problème d'optimisation comporte une étape essentielle : la modélisation mathématique. Elle consiste en trois étapes :

- 1) Identification des variables de décisions (souvent désignées par un vecteur $X \in R^n$) : ce sont les paramètres sur lesquels l'utilisateur peut agir pour faire évoluer le système considéré.
- 2) Définition d'une fonction coût (appelée fonction objectif) permettant d'évaluer l'état du système (ex : rendement, performance, ...).
- 3) Description des contraintes imposées aux variables de décision.

Le problème d'optimisation consiste alors à déterminer les variables de décision conduisant aux meilleures conditions de fonctionnement du système (ce qui revient à minimiser ou maximiser la fonction coût), tout en respectant les contraintes d'utilisation définies à l'étape 3. [5], [6], [7], [36], [52], [62]

3.4 Processus d'optimisation

L'optimisation se définit comme la sélection du meilleur élément (appelé optimum) parmi un ensemble d'éléments autorisés (appelé espace de recherche), en fonction d'un critère de comparaison.

La mise en œuvre de la notion de « meilleure conception » est décrite sur la base d'une conception initiale définie par un certain nombre de paramètres

de valeur variable, appelés variables de conception, l'optimisation vise à déterminer de manière automatique la conception qui est la meilleure au regard de critères liés à des performances structurales. La solution trouvée par ce procédé itératif, alternant analyse structurale et application d'une technique d'optimisation, est qualifiée de conception optimale.

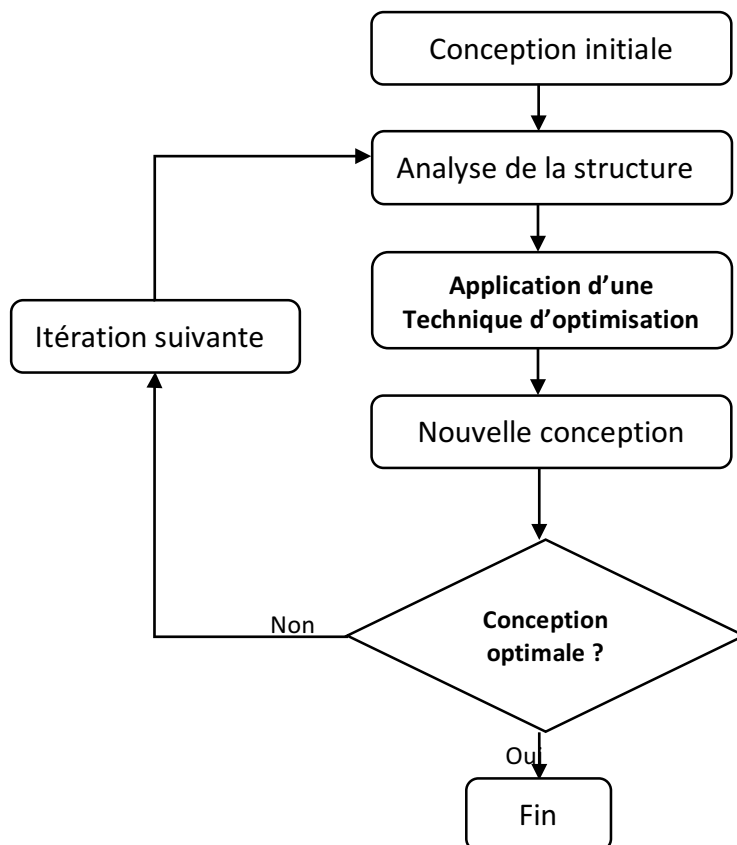


Figure (3-2). Mise en œuvre de l'optimisation des structures.[64]

On peut présenter le processus d'optimisation en trois étapes : analyse, synthèse et évaluation. Tout d'abord, il convient d'analyser le problème et d'opérer un certain nombre de choix préalables :

- Variables du problème : Quels sont les paramètres intéressants à faire varier ?
- Espace de recherche : Dans quelles limites faire varier ces paramètres ?
- Fonctions objectif : Quels sont les objectifs à atteindre ? Comment les exprimer mathématiquement ?

- Méthode d'optimisation : Quelle méthode choisir ?

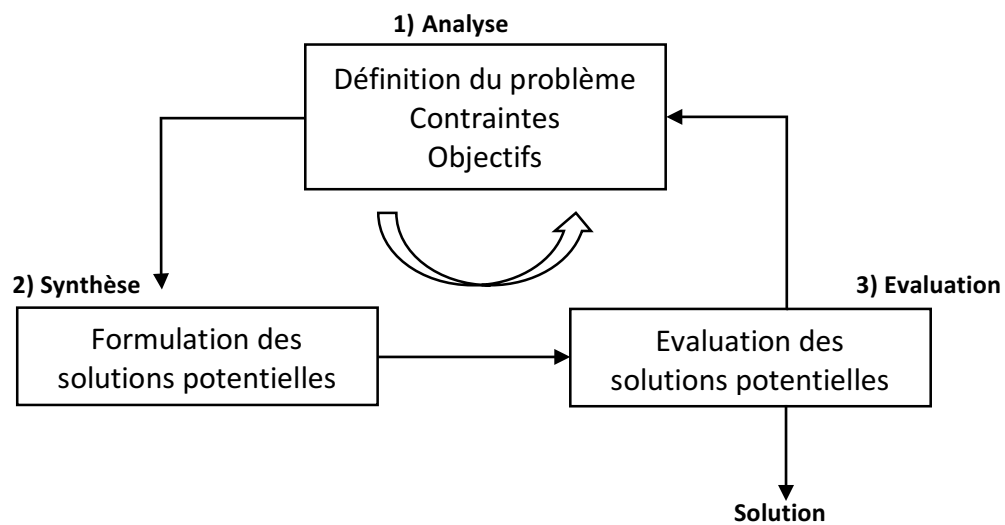


Figure (3-3) : Processus d'optimisation selon Asimow.

3.4.1 Variables du problème :

C'est à l'utilisateur de définir les variables du problème. Il peut avoir intérêt à faire varier un grand nombre de paramètres pour augmenter les degrés de liberté de l'algorithme afin de découvrir des solutions nouvelles. Ou bien, s'il a une vue suffisamment précise de ce qu'il veut obtenir, il peut limiter le nombre de variables à l'essentiel.

Les variables peuvent être de natures diverses. Par exemple, il peut s'agir de la forme et de ses dimensions géométriques, des matériaux utilisés, des conditions d'appui, etc. Nous désignerons par X_1, \dots, X_n les n variables du problème. Celles-ci peuvent être réelles, complexes, entières, booléennes, etc.

3.4.2 Espace de recherche :

Dans certains algorithmes d'optimisation, l'espace de recherche est infini pour d'autres, il est nécessaire de définir un espace de recherche fini. Cette limitation de l'espace de recherche n'est généralement pas problématique. En effet, ne serait-ce que pour des raisons technologiques ou informatiques (taille de la fenêtre de modélisation), les intervalles de définition des variables sont en général naturellement limités. De plus, on a souvent une idée des ordres de grandeur des variables du problème.

Nous désignerons par X_{imin} et X_{imax} les bornes de chaque variable X_i :

$$X_{imin} \leq X_i \leq X_{imax} \quad \forall i \in [1;n]$$

3.4.3 Fonctions objectif:

Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser. Nous la nommerons fonction d'adaptation, fonction mérite ou fonction cible. On parle généralement de fonction de coût pour un problème de minimisation et de fonction objectif pour un problème de maximisation.

L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction, quelle que soit sa définition. La pertinence de la solution dépendra donc de la pertinence de la " question " posée à l'ordinateur. La fonction f doit donc exprimer le plus fidèlement possible le désir de l'utilisateur sous forme mathématique. C'est une fonction des variables X_1, \dots, X_n . Sa définition peut être simplement analytique, ou elle peut faire appel à un modèle numérique, ou elle peut éventuellement faire appel au jugement de l'utilisateur, etc.

1) Objectif unique

Dans le cas d'un objectif unique, la définition de f ne pose généralement pas de problème. Par exemple, si l'on se fixe l'objectif de trouver un dispositif dont le rendement est maximum, f sera égale au rendement. Dans le cas où l'on utilise un modèle numérique, on commence par évaluer les caractéristiques des solutions potentielles en utilisant le modèle. Puis on calcule la fonction d'adaptation à partir de ces caractéristiques.

2) Objectifs multiples (multicritères)

Certains problèmes d'optimisation doivent satisfaire des objectifs multiples, souvent concurrents, ce qui implique un compromis. La méthode classique consiste à définir plusieurs fonctions objectif f_i , traduisant chaque objectif à atteindre, et à les combiner au sein de la fonction d'adaptation. La combinaison la plus simple est une somme pondérée des fonctions objectif.

C'est à l'utilisateur de fixer convenablement la combinaison la plus pertinente. On peut généralement classer les objectifs par importance. Le processus d'optimisation a beau être automatisé, l'utilisateur doit donc quand même optimiser " à la main " la définition de la fonction d'adaptation.

L'optimisation à objectifs multiples est un domaine de recherche très actif car les enjeux économiques et industriels sont énormes. [76],[86]

3.4.4 Méthode d'optimisation :

Une fois définie la fonction à optimiser, il s'agit de choisir une méthode adaptée au problème posé. Les méthodes d'optimisation peuvent être classées de différentes manières : nous les classerons en méthodes déterministes et méthodes non-déterministes. Les méthodes déterministes sont généralement efficaces quand l'évaluation de la fonction est très rapide, ou quand la forme de la fonction est connue a priori. Les cas plus complexes (temps de calcul important, nombreux optima locaux, fonctions non-dérivables, fonctions fractales, fonctions bruitées...) seront souvent traités plus efficacement par des méthodes non-déterministes. [16], [23], [53]

3.4.4.1 Méthodes déterministes

Une méthode d'optimisation est dite déterministe lorsque son évolution vers la solution du problème est toujours la même pour un même contexte initial donné, ne laissant aucune place au hasard. Ce sont en général des méthodes efficaces, peu coûteuses, mais qui nécessitent une configuration initiale (point de départ) pour résoudre le problème.

Cette famille de méthodes d'optimisation regroupe l'ensemble des techniques de résolution de problème n'utilisant pas de concept stochastique. Elles peuvent se diviser en deux classes principales :

- ✓ Les méthodes directes : Se servent d'hypothèses sur la fonction objectif à optimiser. Par exemple, la fonction peut être continue et dérivable en tout point de l'espace de recherche. Une méthode directe très connue est la méthode du gradient.
- ✓ Les méthodes indirectes : Utilisent des principes mathématiques pour résoudre des systèmes d'équations linéaires, non linéaires, avec ou sans contraintes.

La recherche des extrema d'une fonction f revient à résoudre un système de n équations à n inconnues, linéaire ou non linéaire.

Ce sont souvent des méthodes locales, c'est-à-dire qu'elles convergent vers l'optimum le plus proche du point de départ, qu'il soit local ou global.

Nous pouvons diviser ces méthodes, qu'elles soient directes ou indirectes, en deux groupes: les méthodes de descente et les méthodes géométriques.

- ✓ Les méthodes de descente se basent sur la connaissance d'une direction de recherche souvent donnée par le gradient de la fonction.

Les exemples les plus significatifs de méthodes analytiques sont la méthode du gradient conjugué, et les méthodes de Quasi-Newton.

- ✓ Les méthodes géométriques explorent l'espace par essais successifs en recherchant les directions les plus favorables. La méthode géométrique la plus connue est la méthode du simplexe. L'idée de la méthode du simplexe est de modifier un ensemble des solutions de façon à atteindre le point d'optimisation. Le simplexe est une figure géométrique de dimension n , créé à partir de $n+1$ points, où chaque dimension correspond à un paramètre du problème à optimiser.

En général, l'utilisation de ces méthodes nécessite comme étape préliminaire la localisation des extrema. Celle-ci peut être faite, par exemple, sur un graphique ou par une discrétisation fine de l'espace de recherche. La fonction à optimiser est évaluée en chacun des points de discrétisation.

La valeur maximale est alors considérée comme une bonne approximation de l'optimum de la fonction. Cette méthode est brutale et le temps de calcul augmentera exponentiellement en fonction du nombre de variables.

Dans un contexte de données, on est sûr d'obtenir toujours le même résultat avec ce type de méthode.

- ✓ Avantages :

- A contextes initiaux identiques, on retrouve les mêmes solutions.
- Elles utilisent peu d'évaluation de la fonction à optimiser (environ 100)

- ✓ Inconvénient :

- Sont inadaptés si ces conditions de convexité, de continuité et de dérivabilité ne sont pas respectées ;
ou alors lorsque :
 - Le nombre de variables et/ou de contraintes devient important
 - Les fonctions définissant la fonction objectif et les contraintes sont fortement non linéaires
 - Il existe plusieurs optimums locaux. On parle alors de problèmes «difficiles»
- Ces méthodes peuvent aussi se bloquer sur un optimum local.

3.4.4.2 Méthodes non-déterministes

Les méthodes d'optimisation non-déterministes (stochastiques) s'appuient sur des mécanismes de transition probabilistes et aléatoires. Cette caractéristique indique que plusieurs exécutions successives de ces méthodes peuvent conduire à des résultats différents pour une même configuration initiale d'un problème d'optimisation. Ces méthodes ont généralement une capacité plus forte à trouver l'optimum global du problème. Contrairement à la plupart des méthodes déterministes, elles ne nécessitent ni la définition d'un point de départ, ni la connaissance du gradient de la fonction objectif pour atteindre la solution optimale. Cependant, elles demandent un nombre important d'évaluations avant d'arriver à la solution du problème.

Ces méthodes sont purement probabilistes :

- ✓ **Avantage :**
 - Ces méthodes possèdent la capacité de trouver l'optimum global.
- ✓ **Inconvénients :**
 - A contextes initiaux identiques, on trouve des solutions différentes.
 - Elles nécessitent beaucoup d'évaluation de la fonction à optimiser (environ 10000).

Ces méthodes font appel à des tirages de nombres aléatoires. Elles permettent d'explorer l'espace de recherche plus efficacement. Citons entre autres :

1) L'algorithme génétique est une des méthodes les plus diffusées dans la résolution de problèmes d'optimisation dans de nombreux domaines d'applications. La méthode permet de sélectionner les régions les plus prometteuses de l'espace de recherche afin de les explorer, ce qui permet d'atteindre un optimum global. Mais il faut choisir soigneusement le nombre d'évaluations à réaliser car une population trop petite peut ne mener qu'à un minimum local, tandis qu'une trop grande population ralentira considérablement le processus d'optimisation.

2) Les Algorithmes Evolutionnaires : le principe est de simuler l'évolution d'une population d'individus divers auxquels on applique différents opérateurs génétiques et que l'on soumet à chaque génération à une sélection. Ces algorithmes sont de plus en plus utilisés dans l'industrie car ils sont particulièrement adaptés aux problèmes d'optimisation comportant de nombreux paramètres. [3], [30], [64], [75], [82]

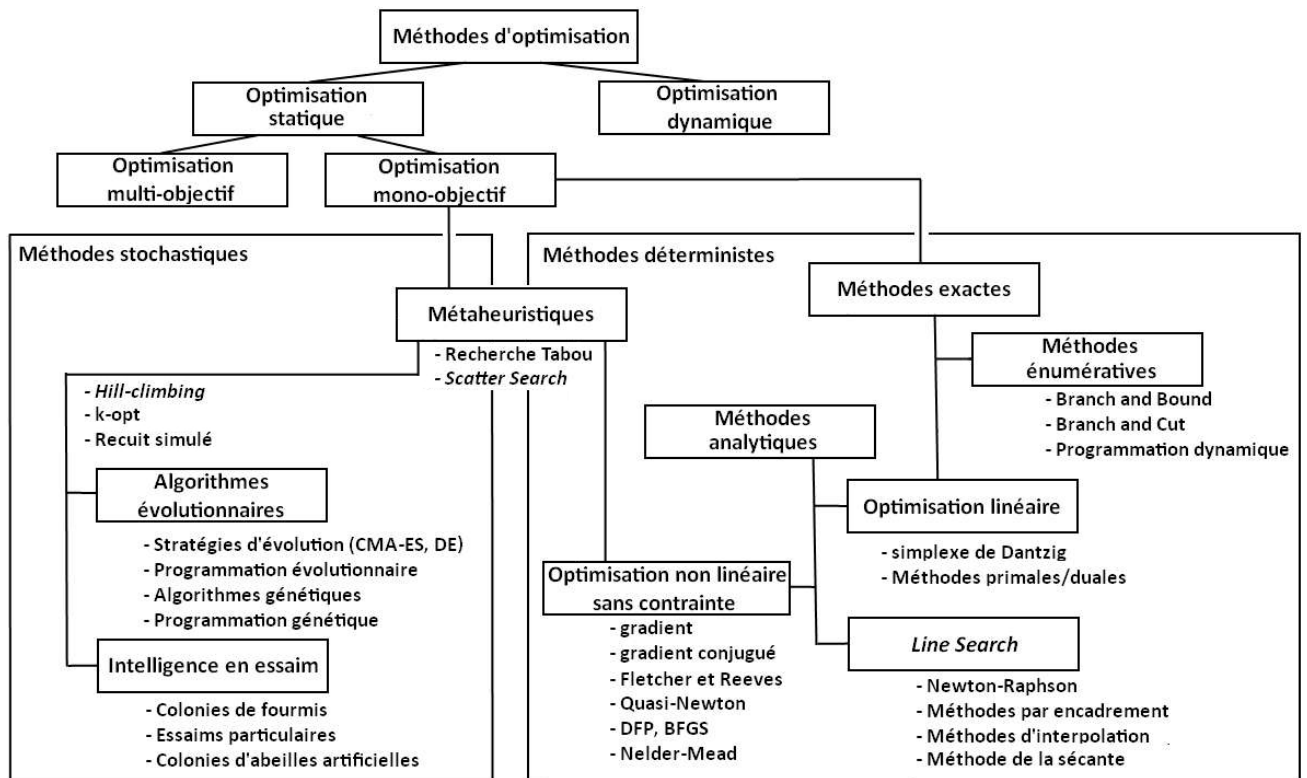


Figure (3-4) : Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation.

3.5 Classification des problèmes d'optimisation

3.5.1 Linéarité :

La linéarité désigne un rapport de dépendance entre plusieurs variables : la variable z dépend linéairement des variables x_1, \dots, x_n ou on dit encore qu'elle s'exprime comme combinaison linéaire de ces variables, quand il existe des constantes a_1, \dots, a_n tels qu'on ait la relation :

$$z = a_1x_1 + \dots + a_nx_n$$

3.5.2 Problème linéaire

L'optimisation linéaire a pour but de trouver la variable de décision qui maximise ou minimise la fonction objectif linéaire (ou linéarisée) en respectant les contraintes, elles aussi linéaires. Tous les points qui satisferont ces contraintes deviennent des solutions admissibles pour la fonction objectif. Dans l'optimisation linéaire, les hypothèses comme la divisibilité, la linéarité,

l'additivité et la non-négativité, sont appliquées. En effet on utilise des nombres réels, des fonctions linéaires, des variables dont les effets peuvent être additionnés, ainsi que des variables de décision qui ne peuvent pas prendre de valeurs négatives. Ces hypothèses limitent le nombre de problèmes pour lesquels l'optimisation linéaire peut être utilisée. Malgré tout dans la plupart de ces cas de figure, ces limites peuvent être contournées, comme pour le cas de l'optimisation linéaire en nombres entiers.

Un programme linéaire est un problème dans lequel on est amené à maximiser (ou minimiser) une application linéaire, appelée fonction objectif, sur un ensemble d'équations et/ou d'inéquations linéaires, dites contraintes.

3.5.3 Problème non-linéaire

La fonction d'adaptation et/ou les contraintes utilisées dans ce problème n'ont pas de forme linéaire. Les variables des problèmes non-linéaires peuvent prendre des valeurs réelles, entières ou booléenne.

La résolution de ces problèmes n'est généralement pas aisée puisque la propriété de convexité du domaine des solutions n'est plus valable. [1], [34], [35]

3.6 Formulation générale du problème d'optimisation :

3.6.1 Définition d'un problème d'optimisation mono-objectif

Historiquement, le problème de maximiser ou minimiser une fonction sous des conditions d'égalité est un problème mathématique classique. Il s'agit d'un problème d'optimisation qui remonte à Lagrange après un premier intérêt porté par Monge en 1776. Le fait d'étendre la théorie de Lagrange et de ses multiplicateurs au cas où il y a aussi des contraintes d'inégalité est relativement nouveau et les premiers résultats ne datent que depuis 1948. C'est-à-dire à l'arrivée du monde informatique.

Un problème d'optimisation vise à minimiser ou maximiser une fonction objectif (parfois appelée fonction coût) dans son domaine de définition.

$$\min_{x \in D} (f(x))$$

Où x est le vecteur formé par les variables du problème : $x = \{x_i\}_{i \in [1, \dots, n]}$

Cette fonction objectif est donc soumise à des contraintes (au sens mathématiques) qui sont de deux types :

$$\begin{cases} \text{Des inégalités: } \forall i \in [1..n_g], g_i(x) \leq 0 \\ \text{Des égalités: } \forall i \in [1..n_h], h_i(x) = 0 \end{cases}$$

Le problème d'optimisation est considéré comme ayant une solution si un optimum vérifiant les contraintes est trouvé.

On dit qu'une contrainte est saturée lorsque $g_i(x) = 0$.

On dit qu'une contrainte est violée lorsque $h_i(x) > 0$ ou $h_i(x) \neq 0$

Remarque :

L'existence d'une solution respectant toutes les contraintes n'est pas garantie. Cela dépend évidemment de la compatibilité des contraintes. Il faut donc être vigilant lors de la formulation d'un tel problème. [1], [2], [29], [36], [37], [55], [56], [63], [64], [85]

3.6.2 Qualification de l'optimum

On distingue deux types d'optimum :

Un optimum est dit global lorsqu'on ne peut trouver de meilleure solution au sens de notre objectif

Un optimum est dit local lorsqu'il s'agit de la meilleure solution pour un sous-domaine de l'ensemble de définition de nos variables.

Selon les algorithmes considérés, on trouvera des optimums locaux ou globaux.

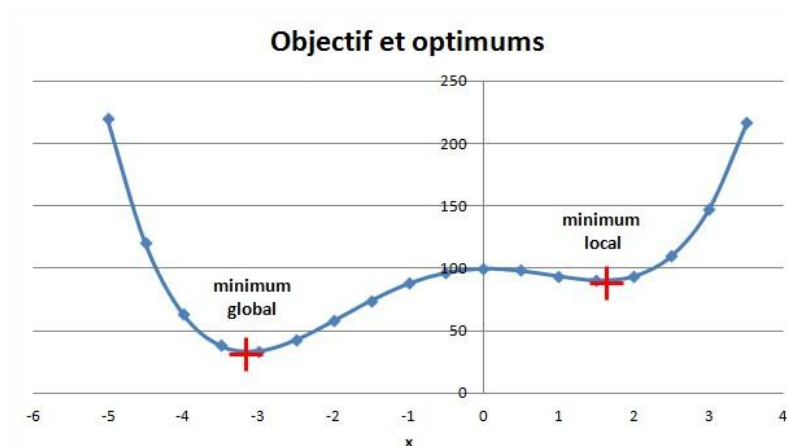


Figure (3-5) : Exemple d'optimums local et global

3.6.3 Algorithmes d'optimisation

La satisfaction des critères d'optimisation peut être atteinte grâce à des algorithmes d'optimisations. Un algorithme d'optimisation est

une procédure de recherche et de comparaison de solutions possibles admissibles, jusqu'à ce qu'une solution optimale soit trouvée. L'algorithme d'optimisation doit permettre de converger vers l'objet optimal en minimisant ou maximisant cette fonction par rapport aux paramètres variables. Généralement, pour toute méthode d'optimisation, l'ingénieur définit les variables du problème, l'espace de recherche et la fonction d'adaptation relative au problème.

La figure (3-6) montre la structure d'un algorithme d'optimisation itératif pour la conception assistée par ordinateur (CAO).

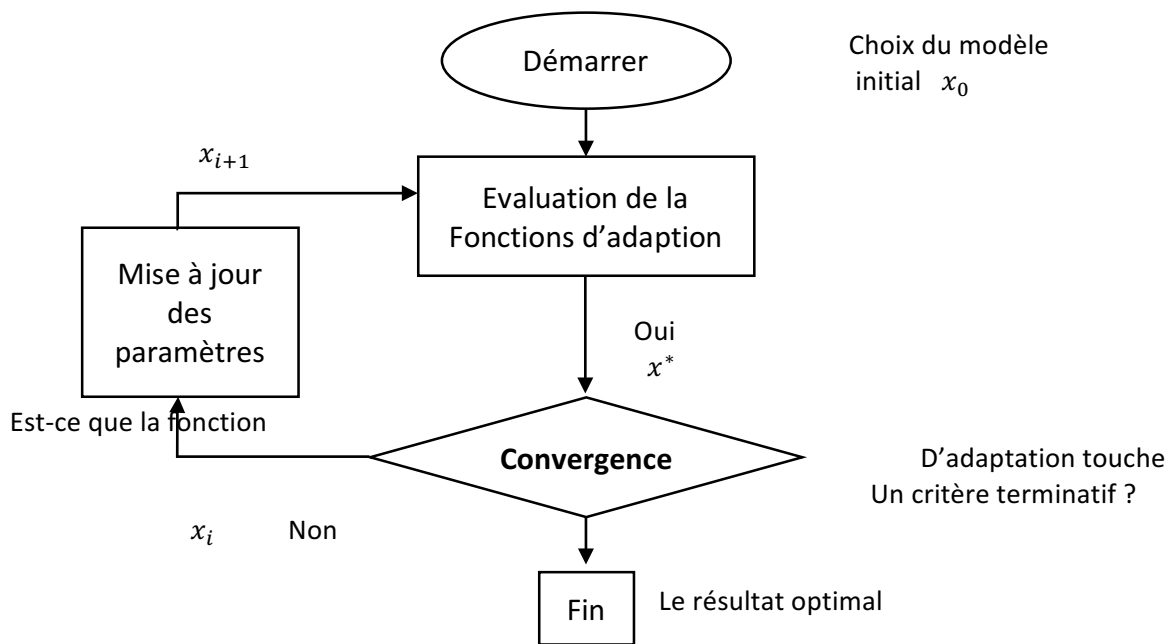


Figure (3-6) : Algorithme d'optimisation [1]

Aucun algorithme d'optimisation n'est universel. Il est au contraire développé pour trouver des solutions à une famille de problèmes très spécifique. Une bonne compréhension des algorithmes est donc indispensable pour choisir l'algorithme le mieux adapté à la résolution d'un problème donné. [54], [72], [78]

CHAPITRE 4 :
***Modèle de calcul
de moindre coût
d'une poutre
rectangulaire en bois***

4.1 Introduction

Le développement actuel des techniques numériques et l'existence d'ordinateurs puissants fournissent une solution pour mettre en œuvre une procédure d'optimisation permettant de trouver la conception à coût minimum des poutres en bois. Comme l'utilisation des matériaux en bois peut-être coûteuse il est utile de chercher des solutions efficaces permettant d'obtenir des structures de poids minimum, sans réduction de leur résistance et de leur performance mécanique. L'économie est réalisée par la minimisation de la fonction objectif. Il est possible d'avoir la meilleure solution structurelle par des techniques d'optimisation, qui répondent aux contraintes de conception et de fabrication. [38], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [48], [60] Récemment, un certain nombre de études traitant de la conception des structures en bois ont vu le jour. Le but maintenant est d'ajouter un pas dans cette démarche en traitant le problème de la conception et de l'optimisation d'une poutre en bois rectangulaire en utilisant Eurocode 5(EC-5). Les poutres en bois sont généralement conçues pour résister à des efforts de flexion, (le bois est apprécié pour ses qualités de résistance à la flexion), puis on vérifie le cisaillement et le déversement. L'optimisation de notre structure en bois a été réalisée par l'approche de programmation non-linéaire (PNL). Dans cette étude, nous avons utilisé Maple 15 pour traiter notre problème de programmation non linéaire afin d'obtenir la conception de coût minimal et la conception de poids minimal des poutres en bois. [8], [9], [10], [11], [12], [13], [25], [28], [79], [87]

4.2 Formulation du problème de dimensionnement optimal des poutres en bois

Pour l'étude de l'optimisation des poutres en bois on considère les états limites conformément à l'actuel code de conception Européen Eurocode-5/annexe française. Nous considérons les poutres de bois ayant la section transversale représentée sur la Figure (4-1).

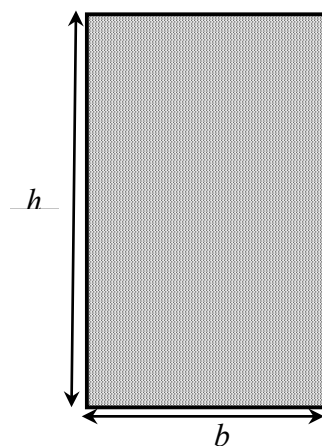


Figure (4-1) : Partie rectangulaire typique de la poutre en bois simple

Généralement, le bois qui est composé de fibres, est plus résistant lorsque les contraintes sont appliquées parallèlement aux fibres (dans la direction longitudinale) que perpendiculairement (directions radiale et tangentielle). Pour les poutres courtes, la contrainte tangentielle est la valeur de construction requise, d'autre part pour les poutres de longueur moyenne, la contrainte normale est la valeur de construction requise, mais pour les poutres longues, la déviation des poutres est la valeur de conception requise. [24], [47], [49], [50]

4.2.1 Variables de conception

Les variables de conception sélectionnées pour l'optimisation sont énumérées dans le tableau (4-1) ci-dessous.

Tableau (4-1) : Définition des variables de conception

Variables de conception	Définition
b	Largeur de la poutre en bois
h	Profondeur de la poutre en bois

4.2.2 Fonctions objectifs

4.2.2.1 Fonction coût

La fonction objectif à minimiser dans ce problème d'optimisation est le coût total de la poutre en bois par unité de longueur de la poutre. Cette fonction peut être définie comme suit :

$$C = \frac{C_t}{L} = C_w bh \quad (1, C)$$

Où:

C : Coût total par unité de longueur de la poutre en bois.

C_w : Coût unitaire de la poutre en bois

C_t : Coût total de la poutre en bois.

Le coût total absolu peut alors être obtenu en utilisant la relation :

$$C_t = CL \quad (1, C_t)$$

Les prix comprennent la fourniture de la poutre, le système de fixation, les techniques utilisées pour relever l'élément en place et comprend aussi tous les travaux connexes ; Tels que l'approvisionnement en bois, le transport vers le site, le traitement, le façonnage, y compris les assemblages, à l'exception des assemblages utilisés pour le raccordement au bois déjà en place, le sciage et l'installation.

4.2.2.2 Fonction poids

La fonction poids à minimiser peut-être écrite comme suit :

$$W = \frac{W_t}{L} = \rho_w bh \quad (1, W)$$

Où:

ρ_w : est la densité du bois massif, W est le poids unitaire par unité de longueur de la poutre en bois et W_t : le poids total de l'élément poutre en bois.

$$W_t = WL \quad (1, W_t)$$

4.2.3 Formulation des contraintes de conception

Les contraintes suivantes pour les poutres en bois sont définies conformément aux spécifications de code de conception de l'Eurocode-5 : annexe française.

La liste des contraintes qui a été prise en compte dans cette étude est :

4.2.3.1 Vérification à l'état limite ultime (ELU) :

a- Résistance au moment de flexion de la poutre en bois :

(Moment agissant $M_{Ed} \leq$ Moment résistant M_{Rd})

le bois est à l'intérieur, où l'humidité est contrôlée.

$$\frac{M_{Ed}}{k_{crit} f_{m,k} k_{mod} k_{sys} k_h b h^2} \leq 1 \quad (2)$$

b- Le déversement de la poutre en bois n'est pas à vérifier lorsque :

$$\sqrt{\frac{f_{m,k}}{0.78 E_{0.05} b^2} / h(0.9L + 2h)} \leq 0.75 \quad (3)$$

c- Résistance au cisaillement vertical de la poutre en bois :

(Cisaillement externe $V_{Ed} \leq$ Résistance au cisaillement de la section de bois V_{Rd})

$$\frac{k_f V_{Ed} / b h}{f_{v,k} k_{mod} / \gamma_M} \leq 1 \quad (4)$$

4.2.3.2 Vérification à l'Etat limite de service (ELS) :

d- Contrainte de déformation : la déformation à mi-travée de la poutre simplement appuyée soumise à l'action des charges appliquées selon la combinaison (Charge permanente + Charge d'exploitation) pour la poutre en bois :

$$\frac{5 [G(1+k_{def}) + Q(1+k_{def}\psi_2)] L^4}{384E_{0,mean} bh^3/12} \leq \delta_{lim} \quad (5)$$

4.2.3.3 Contraintes liées à la géométrie :

e- Contraintes des variables de conception, y compris les règles de bonne pratique courante :

$$b_{min} \leq b \leq b_{max} \quad (6)$$

$$h_{min} \leq h \leq h_{max} \quad (7)$$

f- Non-négativité des variables :

$$b, h > 0 \quad (8)$$

4.2.4 Formulation d'un problème de conception à coût minimal

La formulation de la conception optimale des coûts des poutres en bois peut-être mathématiquement énoncée comme suit :

Le problème consiste à trouver les 02 variables (b , h) de conception qui minimisent le coût total du matériau de construction par unité de longueur des poutres en bois telle que :

$$C = C_w bh \quad (1, C)$$

Sachant que la fonction coût est soumise aux sept (07) contraintes de conception (équations, Eq. (2) à Eq. (8)).

4.2.5 Formulation du problème de conception du poids minimal d'une poutre en bois.

Nous devons trouver les variables de conception b et h , qui minimisent le poids total par unité de longueur d'une poutre en bois, de sorte que :

$$W = \rho_w bh \quad (1, W)$$

Sous réserve des contraintes de conception (équations, Eq. (2) à Eq. (8)).

4.2.6 Méthode de résolution

La fonction objectif Eq (1, C), la fonction objectif Eq. (1, W) et les équations de contraintes, Eq. (2) à Eq. (8) forment un problème d'optimisation non linéaire.

Les raisons de la non-linéarité de ce problème d'optimisation sont dues à l'ordre des dimensions de la section transversale dans les expressions de la résistance au moment de flexion et des autres équations de contraintes.

La fonction objectif et les fonctions de contrainte sont non linéaires en termes de variables de conception. Pour résoudre ce problème d'optimisation non linéaire, on utilise le logiciel MAPLE-15.

4.3 Applications numériques

Nous allons prendre un exemple typique du problème de conception optimisée, on établit la procédure du modèle de conception de coût optimal étape par étape, puis on entame une comparaison entre la solution de la solution optimale obtenue et conception classique.

Nous traitons ensuite, un deuxième exemple qui illustre un modèle de réduction du poids et du coût pour les poutres en bois selon les règles de Eurocode-5.

4.3.1 Exemple de conception A

Comme indiqué précédemment, les contraintes de conception sont définies conformément aux spécifications de conception du code Eurocode-5 annexe française.

Les solutions optimales seront comparées aux solutions de conception classique obtenues conformément au code de conception Eurocode-5.

L'étude d'un système statique correspond à une poutre en bois simplement appuyée à ses extrémités et soumise aux charges uniformément réparties

(G , Q) selon la Figure (4.2).

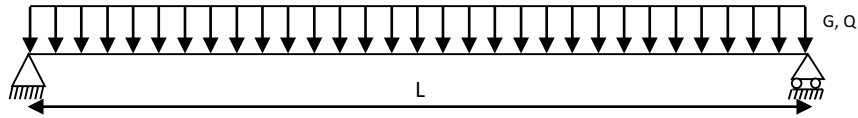


Figure (4-2) : Poutre isostatique chargée uniformément.

Les paramètres pré-assignés correspondants sont définis comme suit:

Les données relatives aux charges et aux dimensions géométriques correspondent à :

$$L=12.00m; b_{min}=0.15m; b_{max}=0.25m; h_{min}=L/20=0.60m; h_{max}=L/12=1.20m$$

$$M_{Ed}=0.1782 MN.m; V_{Ed}=0.0594 MN; G=0.004 MN / m; Q=0.003 MN / m;$$

$$W_{lim}=L/200=0.060m .$$

Données relatives aux caractéristiques du matériau bois:

Classe de résistance du bois C24; Bois massif

$$f_{m,k}=24 MPa; f_{m,d}=12.18 MPa; k_{moy}=0.6; \gamma_M=1.3; k_{sys}=1.1, E_{0.05}=7400 MPa;$$

$$E_{0,mean}=11000 MPa; k_{lef}=0.9; k_{crit}=1; k_f=1.5; f_{v,k}=2.5 MPa, f_{v,d}=1.15MPa;$$

$$k_{def}=0.80; \psi=0.3; \rho_{bois}=350Kg/m^3, \text{ bois massifs structuraux de classe C24.}$$

Données d'entrée pour les coûts unitaires des matériaux de construction :

$$C_w = 100 \text{ €/m}^3$$

4.3.2 Procédure étape par étape du modèle d'optimisation des coûts pour les poutres en bois

Nous devons trouver les variables de conception b, h qui minimisent le coût total du matériau de construction par unité de longueur de la poutre en bois

de sorte que:

$$C = 100bh \quad (1', C)$$

a- Résistance au moment de flexion de la poutre de bois :

Le bois est à l'intérieur, où l'humidité est Contrôlée.

(Moment agissant $M_{Ed} \leq$ Moment de résistant M_{Rd})

$$\frac{0.1782}{15.84bh^2/7.8} \leq 1 \quad (2')$$

b- Le déversement de la poutre en bois n'est pas à vérifier lorsque :

$$\sqrt{\frac{24}{5772b^2/h(0.9*12+2h)}} \leq 0.75 \quad (3')$$

c- Résistance au cisaillement vertical de la poutre en bois :

(Cisaillement externe $V_{Ed} \leq$ Résistance au cisaillement vertical de la section de bois V_{Rd})

$$\frac{0.089/bh}{1.50/1.3} \leq 1 \quad (4')$$

d- Contrainte de déformation : la déformation à mi-travée de la poutre simplement appuyée soumise à l'action des charges appliquées selon la combinaison (Charge permanente + Charge d'exploitation) pour la poutre en bois :

$$\frac{5[0.01332]12^4}{4224000bh^3/12} \leq 0.06 \quad (5')$$

e- Contraintes des variables de conception, y compris les règles de bonne conduite courante :

$$0.15 \leq b \leq 0.25 \quad (6')$$

$$0.60 \leq h \leq 1.20 \quad (7')$$

f- Non-négativité des variables :

$$b, h > 0 \quad (8')$$

4.3.3 Comparaison des résultats de la solution optimale à coût minimal avec la solution de l'approche classique.

Les valeurs des variables de conception de la solution classique et la solution optimale de conception du coût utilisant l'approche proposée sont indiqués dans le tableau (4-2) ci-dessous

Tableau (4-2): Comparaison de la solution classique et de la solution optimale

Variables de conception	Conception classique	Conception optimale avec Coût minimum
b [m]	0.25	0.24
h [m]	0.65	0.64
C (€)	16.25	15.36
Gain		06%

A partir des résultats ci-dessus, et en comparant la solution classique à la solution optimale, on observe un gain significatif égal à 06% qui peut être obtenu en utilisant la formulation de la conception proposée.

4.3.4 Comparaison entre les résultats de la solution optimale à poids minimal et la solution de l'approche classique

Les valeurs des variables de conception de la solution classique et la solution optimale de conception du poids utilisant l'approche proposée sont indiqués dans le tableau (4-3) ci-dessous

Tableau (4-3) : Comparaison de la solution classique avec la solution optimale

Variables de conception	Conception classique	Conception optimale Poids minimum
$b[m]$	0.25	0.24
$h[m]$	0.65	0.64
$W(MN)$	0.0005574	0.0005368
Gain		06%

A partir des résultats ci-dessus, et en comparant la solution classique à la solution optimale, on observe un gain significatif égal à 06% qui peut être obtenu en utilisant la formulation de la conception proposée.

4.3.5 Comparaison des résultats des solutions optimales à coût et à poids minimal avec les solutions de l'approche classique

Les valeurs de variables de conception de la solution classique et des solutions optimales de conception du coût et du poids sont présentés dans le tableau (4-4) ci-dessous.

Tableau (4-4) : Comparaison de la solution classique et des solutions optimales

Variables de conception	Conception classique	Conception optimale avec Coût minimum C	Conception optimale avec Poids minimum W
$b[m]$	0.25	0.24	0.24
$h[m]$	0.65	0.64	0.64
Gain		06%	06%

Un gain de 06% est réalisé par les deux approches de conception optimale sur la démarche classique adoptée par les notes de calcul utilisées par les bureaux d'étude.

4.3.6 Méthode graphique

Dans cette formulation, toutes les contraintes sont supposées être des fonctions de b et h uniquement. L'espace réalisable peut être tracé comme indiqué à la figure (4-3).

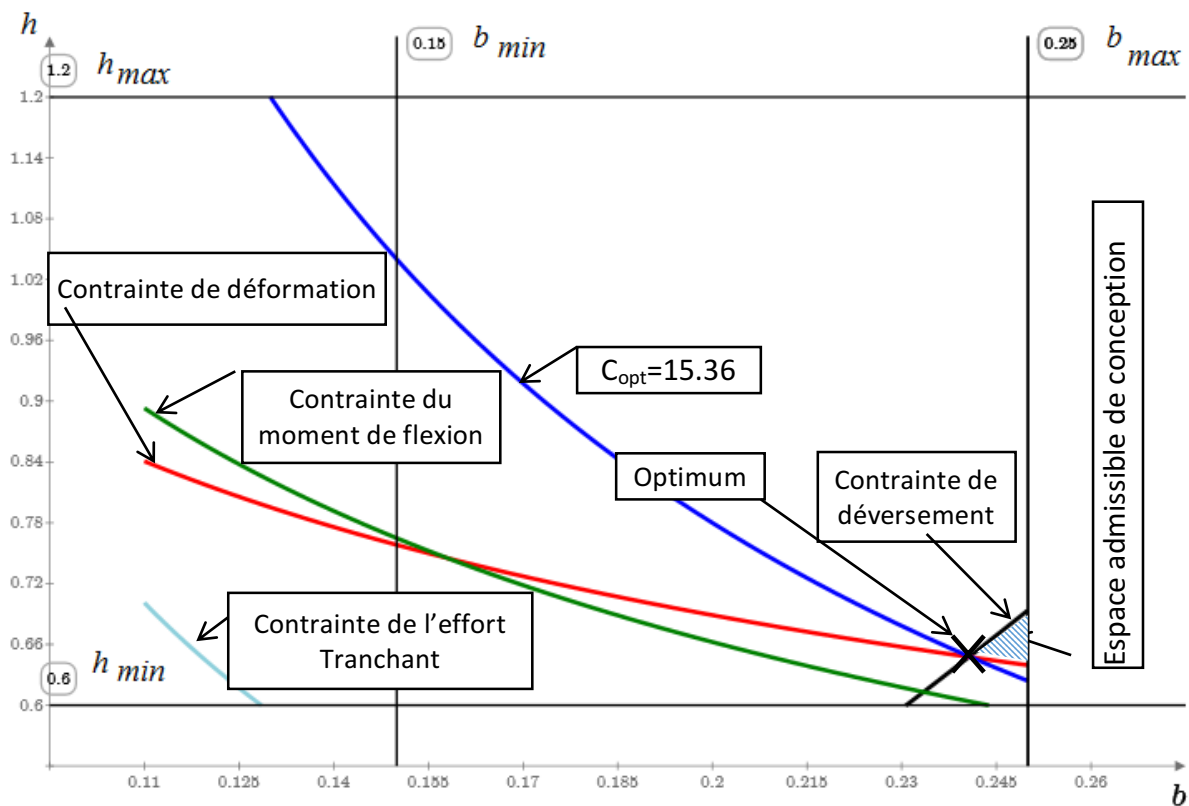


Figure (4-3) : Espace de conception admissible de la poutre en bois rectangulaire

4.3.7 Exemple de conception (B)

Le deuxième exemple de conception correspond à une poutre en bois simplement appuyée à ses extrémités et préconçue conformément aux dispositions du code de conception EC-5.

Les données relatives aux charges et aux dimensions géométriques

correspondent à : $L=10.00$ m; $b_{min}=0.15$ m; $b_{max}=0.25$ m;

$h_{min}=L/20=0.50$ m ;

$h_{max}=L/12=0.83$ m

$M_{Ed}=0.270$ MN.m; $V_{Ed}=0.118$ MN; $G=0.006$ MN / m; $Q=0.009$ MN / m;

$W_{lim}=L/200=0.050$ m

Données relatives aux caractéristiques du matériau bois:

Classe de résistance du bois C24; Bois massif

$f_{m,k}=24$ MPa; $f_{m,d}=12.18$ MPa; $k_{moy}=0.6$; $\gamma_M=1.3$; $k_{sys}=1.1$, $E_{0.05}=7400$ MPa;

$E_{0,mean}=11000$ MPa; $k_{lef}=0.9$; $k_{crit}=1$; $k_f=1.5$; $f_{v,k}=2.5$ MPa, $f_{v,d}=1.15$ MPa;

$k_{def}=0.80$; $\psi=0.3$; $\rho_{bois}=350$ Kg/m³, bois massifs structuraux de classe C24.

Données d'entrée pour les coûts unitaires des matériaux de construction :

$$C_w= 100\text{€}/\text{m}^3$$

Les valeurs de variables de conception de la solution classique et des solutions optimales de conception du coût et du poids minimal sont présentés dans le tableau (4-5) ci-dessous.

Tableau (4-5) : Comparaison de la solution classique et de la solution optimale

Variables de conception	Solution classique	Conception optimale avec Coût minimum C	Conception optimale avec Poids minimum W
b[m]	0.25	0.24	0.24
h[m]	0.80	0.74	0.74
Gain		12%	12%

On constate à partir de ces résultats que la comparaison de la solution classique aux solutions optimales permet d'obtenir un gain significatif égal à 12% en utilisant la formulation des conceptions proposées.

4.4 Conclusions

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette étude :

- La formulation du problème d'optimisation d'une poutre en bois peut-être transformée en un problème de programmation non linéaire, dont la solution numérique est déterminée efficacement à l'aide du logiciel MAPLE-15.
- La comparaison des résultats numériques obtenus révèle que l'utilisation de l'optimisation basée sur le concept de coût minimal et le poids minimal peut conduire à des économies substantielles de la quantité de matériaux de construction à utiliser par rapport aux solutions classiques de conception de poutres de bois. Cette étude a montré que le coût et le poids optimisés à l'aide du logiciel Maple-15 sont respectivement de l'ordre de 06% et 12% d'économie par rapport à la conception classique dans les deux exemples A et B.
- Les fonctions objectifs et les contraintes considérées dans cet article sont de nature illustrative. Cette approche basée sur la programmation mathématique non linéaire peut être facilement étendue à d'autres sections couramment utilisées dans la conception structurelle. Des objectifs et des considérations plus élaborées peuvent être facilement pris en compte par des modifications appropriées de ce modèle développé.
- La méthodologie proposée pour la conception à coût minimal et la conception à poids minimal, est efficace et donne des résultats économiques par rapport aux méthodes classiques. Les résultats de l'analyse montrent la pertinence du procédé d'optimisation présenté et son application semble abordable.
- Dans cette étude, les valeurs optimales des variables de conception ne sont pas affectées par le choix de la fonction objectif, que ce soit pour la fonction de coût, la fonction poids. En d'autres termes, les variables optimales sont identiques que ce soit pour une approche à coût minimal ou pour une approche à poids minimum.

Recommandations & perspectives

Dans la perspective des études sur le dimensionnement optimal, nous recommandant les thèmes suivants :

- Mener une étude de dimensionnement optimal des poutres en bois selon un autre règlement, tel que le Code National du Bâtiment du Canada (CNB), ce qui permettra de mesurer l'impact du règlement utilisé sur le gain réalisé.
- Étudier des poutres de formes complexes et diverses, autre que la forme rectangulaire, pour apprécier l'effet de la géométrie sur la solution optimale.
- Reformuler le problème de dimensionnement optimal pour d'autres pièces en bois et selon d'autres modes de sollicitation statique ou dynamique.
- Porter une attention particulière à l'optimisation d'une structure complète à base de charpente en bois.
- Comparer des solutions optimales en diversifiant les outils de résolution.
- Mener des études comparatives de dimensionnement optimal, entre des pièces en bois avec d'autres pièces conçues avec différents matériaux et optimisés selon divers règlements, soumises aux mêmes conditions de chargement dans le but d'aboutir à des solutions optimales combinées.

Liste des abréviations

H : Taux d'humidité du bois.

$\varepsilon_L, \varepsilon_R, \varepsilon_T$: Déformation selon les trois directions

$\gamma_{RT}, \gamma_{LT}, \gamma_{LR}$: Glissement selon les trois plans de cisaillement

E_L, E_R, E_T : Modules d'élasticité selon les trois directions

G_{RT}, G_{LT}, G_{LR} : Modules de cisaillement selon les trois plans

$\nu_{LR}, \nu_{RL}, \nu_{TL}, \nu_{LT}, \nu_{RT}, \nu_{TR}$: Coefficients de Poisson

$\sigma_L, \sigma_R, \sigma_T$: Contraintes normales selon les trois directions

$\tau_{RT}, \tau_{LT}, \tau_{LR}$: Contraintes de cisaillement selon les trois plans

σ_d : Contrainte induite par les actions

F_k : Actions caractéristiques (G, Q, S, W, etc.)

γ_F : Coefficient partiel normal de l'action

ψ_i : Coefficient de combinaison des actions

f_d : Contrainte de résistance calculée

f_k : Résistance caractéristique du matériau

γ_M : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

k_{mod} : Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service (humidité du bois).

G : Action permanente

Q : Action variable

$f_{t,90,k}$: Contrainte (f) de traction (t), perpendiculaire au fil du bois (90°), caractéristique (k).

$E_{0,mean}$: Module d'élasticité (E), parallèle au fil du bois (0°), moyen ($mean$)

$E_{0,05}$: Module d'élasticité (E), parallèle au fil du bois (0°), au fractile 5 % ou au 5^e pourcentile.

W_{inst} : La flèche instantanée

W_{creep} : La flèche de fluage

W_c : La contre-flèche

$W_{net,fin}$: La flèche résultante finale

W_{fin} : La flèche finale.

$M_{f,y}$: moment de flexion.

$I_{G,y}$: moment quadratique.

V : distance à la fibre neutre.

$f_{m,d}$: Résistance de flexion calculée en MPa

k_{sys} : Coefficient d'effet système

k_h : Coefficient de hauteur

k_{crit} : coefficient d'instabilité provenant du déversement.

σ_{crit} : Contrainte critique de flexion

$\lambda_{rel,m}$: Elancement relatif de flexion.

k_{ls} : Coefficient induisant des redistributions d'efforts, en flexion.

E : Le module d'élasticité longitudinal du matériau

G : Le module de cisaillement du matériau

l_{ef} : La longueur libre de la poutre (longueur efficace).

τ_d : La contrainte de cisaillement.

V : Effort tranchant.

S : Moment statique de l'aire au-dessus du plan de cisaillement par rapport à l'axe neutre.

k_f : coefficient de forme de la section.

h_{ef} : hauteur réelle exposée au cisaillement.

$f_{v,d}$: résistance de cisaillement

$f_{v,k}$: contrainte caractéristique de résistance de cisaillement.

k_v : coefficient d'entaillage

b : Largeur de la poutre en bois

h : Profondeur de la poutre en bois

L : Longueur de la poutre

C : Coût total par unité de longueur de la poutre en bois.

C_w : Coût unitaire de la poutre en bois

C_t : Coût total de la poutre en bois.

ρ_w : est la densité du bois massif

W : Le poids unitaire par unité de longueur de la poutre en bois.

W_t : Le poids total de l'élément poutre en bois.

Liste des tableaux

Tableau (1-1) : Les superficies par décennie des principales essences forestières en Algérie.....	15
Tableau (1.2) : Constantes élastiques du chêne et de l'épicéa.....	31
Tableau (1.3) : Résistance à la rupture moyenne (MPa) de l'épicéa et du chêne à 12% d'humidité.....	32
Tableau (1-4) : Approche écologique.....	38
Tableau (1-5) : Nomenclature pour les résineux européens.....	39
Tableau (1-6) : Correspondance entre le classement visuel et le classement mécanique.....	42
Tableau (1-6) : Caractéristiques mécaniques.....	42
Tableau (1-7) : Utilisation en fonction des classes du bois.....	43
Tableau (2-1) : valeurs des charges d'exploitation en fonction de l'usage du bâtiment.....	46
Tableau (2-2) : valeurs caractéristiques des bois massifs résineux.....	50
Tableau (2-3) : valeurs caractéristiques des bois massifs feuillus.....	51
Tableau (2-4) : valeurs caractéristiques des bois lamellés.....	51
Tableau (2-5) : valeur du k_{mod} du bois massif, du lamellé-collé, du lamibois (LVL) et du contreplaqué.....	52
Tableau (2-6) : valeur du γ_M en fonction de la dispersion du matériau.....	53
Tableau (2-7) : valeurs limites pour les flèches verticales et horizontales.....	54
Tableau (2-8) : valeur de k_{def} (fluage).....	55
Tableau (3-1) : Exemples des variables du problème d'optimisation.....	70
Tableau (4-1) : Définition des variables de conception.....	85
Tableau (4-2) : Comparaison de la solution classique et de la solution optimale.....	92
Tableau (4-3) : Comparaison de la solution classique avec la solution optimale.....	93
Tableau (4-4) : Comparaison de la solution classique et des solutions optimales.....	93
Tableau (4-5) : Comparaison de la solution classique et de la solution optimale.....	95

Listes des figures et des schémas

Figure (1-1) : Anatomie du bois.....	19
Figure (1-2) : Anatomie du bois.....	19
Figure (1-3) : La structure anisotrope du bois.....	23
Figure (1-4) : Comportement du bois en traction / compression dans la direction longitudinale.....	33
Figure (1-5) : Cycle de vie des matériaux de construction.....	34
Figure (1-6) : fixation du carbone.....	35
Figure (1-7) : Consommation énergétique des matériaux de construction.....	36
Figure (1-8) : Démarche pour le choix d'une essence (EN 350).....	40
Figure (1-9) : Classes de résistance.....	41
Schéma : (2-1) :.....	54
Schéma : (2-2) : Diagramme des contraintes de flexion.....	56
Schéma (2-3) : axes y et z de la section.....	57
Schéma (2-4) : la contrainte de cisaillement d'une poutre à section symétrique.....	63
Figure (3-1) : Les 3 classes de problèmes d'optimisation des structures. (a) Dimensionnement. (b) Forme avec topologie fixée. (c) Topologie variable.....	71
Figure (3-2). Mise en œuvre de l'optimisation des structures.....	73
Figure (3-3) : Processus d'optimisation selon Asimow.....	74
Figure (3-4) : Une classification possible des différents types de méthodes d'optimisation.....	79
Figure (3-5) : Exemple d'optimums local et global.....	81
Figure (3-6) : Algorithme d'optimisation.....	82
Figure (4-1) : Partie rectangulaire typique de la poutre en bois simple.....	84
Figure (4-2) : Poutre isostatique chargée uniformément.....	90
Figure (4-3) : Espace de conception admissible de la poutre en bois rectangulaire.....	94

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A.Assadi-Haghi, Contribution au développement de méthodes d'optimisation structurelle pour la conception assistée par ordinateur de composants et de circuits hyperfréquences, thèse doctorat, Université de Limoges, 2007.
- [2] A.Boudjaoui, Dimensionnement optimal des poutres en béton précontraint aux états limites de service selon BPEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger,2013.
- [3] A.Kaveh, V.Kalatjari,Topology optimization of trusses using genetic algorithm, force method and graph theory, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 58, 771-791,2003.
- [4] A.T.Dinh, Comportement élastique linéaire et non-linéaire du bois en relation avec sa structure, thèse doctorat, ParisTech, 2011.
- [5] A.Zouak, Dimensionnement optimal des poteaux en béton armé aux états limites de service selon BAEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics -Alger,2013.
- [6] B.Bensalem, Dimensionnement optimal des dalles en béton armé aux états limites de service selon BAEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics -Alger,2013.
- [7] B.Dahmane, Dimensionnement optimal des poteaux en béton armé aux états limites ultimes selon BAEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics -Alger,2013.
- [8] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Economic design of reinforced high strength concrete T-sections in flexure, Journal of Modeling and Optimization, 2013.
- [9] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Cost optimization of reinforced high strength concrete T-sections in flexure, International Journal of Structural Engineering and Mechanics, 2014.
- [10] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Optimal design of reinforced concrete T - beams under ultimate loads, the Second International Conference on Engineering Optimization, Lisbon, Portugal, 2010.
- [11] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Economic design of reinforced high strength concrete T-sections in flexure, International Conference on System Modeling and Optimization (ICMO2013), Rome, Italy, 2013.
- [12] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Cost optimization of singly and doubly reinforced concrete T-beams, The Fifth International Conference on Computer Modeling and Simulation, Barcelone, Spain, 2014.
- [13] B.Tiliouine, F.Fedghouche, Optimisation des poutres en béton armé aux états limites ultimes, Bulletin du Contrôleur Technique de la Construction, Edition GECOTEC, n°24, 2001.
- [14]Cecobois, Guide technique sur la conception de poutres et colonnes en gros bois,2015.
- [15] C.Hazard,Formulaire pratique pour les techniciens des métiers du bois-Selon Eurocode 5, Casteilla, France.
- [16] C.Lee, J.Ahn, Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm, ASCE Journal of Structural Engineering, 129(6), 762-774, 2003.
- [17] Communiqués de presse, Commission Européenne, IP/04/67, 2004.
- [18]CNDB, Guide d'utilisation du bois, Paris.
- [19] Construction de maison à ossature de bois – Canada, Société canadienne d'hypothèques et de logement.
- [20] CTBA, Bois massifs structuraux, France, 2007.

- [21] CTBA, Bois massifs structuraux, France, 2012.
- [22] FCBA, Bois massifs structuraux, France, 2015.
- [23] C.V.Camp, S.Pezeshk, H.Hansson, Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 129(1), 105-115, 2003.
- [24] D.Breyer, K.Fridley, K.Cobeen, D.Pollock, *Design of Wood Structures—ASD/LRFD*, Sixth Edition, McGraw-Hill, Washington, 2007.
- [25] D.Bru, F.J.Baeza, F.B.Varona, S.Ivorra, Numerical and experimental evaluation of FRP reinforcement on the mechanical behaviour of timber beams, *Proc of the 16th European Conference on Composite Materials*, Sevilla, Spain, 2014.
- [26] D.Louni, *Les forêts algériennes, forêt méditerranéenne t. XV, n°1*, janvier 1994.
- [27] D.Malenfant, *Atelier sur les propriétés physiques et mécaniques du bois*, CSMOIB, Québec, Octobre 2010.
- [28] D.N.Kaziolasa, G.Bekasb, I.Zygomalasc, G.E.Stavroulakisd, Life cycle analysis and optimization of a timber building, 7th international conference on sustainability in energy and buildings, *Energy Procedia*, 83, 41 – 49, 2015.
- [29] D.Smets, *Programmation linéaire et Optimisation*, Laboratoire Jacques-Louis Lions, France.
- [30] D.T.Pham, D.Karaboga, *Intelligent Optimization Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks*. 1st Edn., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, 2000.
- [31] DTR C 2.4.6, *Règles de conception et de calcul des structures en bois*, CNERIB, Algérie, 2009.
- [32] E.C.Ozelton, J.A.Baird, *Timber Designers' Manual*, 3rd edition, Wiley-Blackwell Science, New York, 2006.
- [33] Eurocode 5, *Design of Timber Structures – Part 1-1: General – Common Rules and Rules for Buildings*, EN 1995-1-1:2004, European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 2004.
- [34] F.Choual, *Dimensionnement optimal des poutres en charpente métallique aux états limites ultimes selon l'Eurocode 3-EC3*, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2013.
- [35] F.Duprat, *Construction Bois 1*, Département de Génie Civil, INSA Toulouse.
- [36] F.Fedghouche, *Optimisation des éléments de structure en béton armé aux états limites*, thèse magister, Ecole Nationale des travaux publics-Alger, 2001.
- [37] F.Fedghouche, *Modèle de calcul de moindre coût des poutres en T en béton armé par optimisation non-linéaire*, thèse doctorat, ENP-Alger, 2012.
- [38] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Cost optimization of singly and doubly reinforced concrete T-beams, *ALGERIE EQUIPEMENT*, n°05, 2015.
- [39] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Minimum cost design of reinforced concrete T-beams, at ultimate loads using Eurocode2, *Engineering Structures*, 42, 43-50, 2012.
- [40] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Minimum cost design of reinforced concrete T-beams at ultimate loads using Eurocode2, *Engineering Structures*, 2012.
- [41] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Cost optimization of singly and doubly reinforced concrete beams, *Ciência e Técnica Vitivinícola*, 30(2), 225-233, 2015.
- [42] F.Fedghouche, Cost optimum design of doubly reinforced high strength concrete T-beams, *Scientia Iranica-Transaction on Civil Engineering Journal*, 2016.
- [43] F.Fedghouche, B.Tiliouine, *Optimisation des poutres rectangulaires en béton armé aux états limites*, The First International Conference on Risk, Vulnerability and Reliability in Construction, Algiers, Algeria, 2003.

- [44] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Minimum cost design of reinforced concrete rectangular sections in bending under ultimate loads, the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Mechanics, ICAMEM2010, Hammamet, Tunisie, 2010.
- [45] F.Fedghouche, Cost optimum design of doubly reinforced high strength concrete T-beams with EC-2, 27th European Conference on Operational Research EURO, Glasgow, UK, 2015.
- [46] F.Fedghouche, Minimum weight plastic design of steel beams using Eurocode-3(EC-3), La 1ère Conférence Internationale de la Construction Métallique et Mixte, Tlemcen, Algérie, 2015.
- [47] F.Fedghouche, Cost and Weight minimization for flexural reinforced high strength concrete beams with Eurocode 2-EC2, 3ème Congrès International sur la Technologie et la Durabilité du Béton CITEDUB-3, USTHB, Alger, Algérie, 2016.
- [48] F.Fedghouche, Optimal design of wood beams for bending using Eurocode 5-EC5, The 2016 International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures And Materials, Siena, Italy, 2016.
- [49] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Cost optimization of singly and doubly reinforced concrete T-beams, Conférence Nationale sur les Matériaux et Structures: CNMS'2013, Laboratoire LGSDS, ENP-El Harrach, Alger, Algérie, 2013.
- [50] F.Fedghouche, B.Tiliouine, Optimisation des poutres en béton armé aux états limites de service, Bulletin du Contrôleur Technique de la Construction, Edition GECOTEC, n°26, 2002.
- [51] F.Ntolla, Comparaison structurelle bois-béton : application aux bâtiments d'habitation, mémoire d'ingénieur en génie-civil, CNAM-Paris, 2014.
- [52] G.Allaire, Conception optimale de structures, École polytechnique-France, 2010.
- [53] H.Khalil, Développement des techniques d'optimisation de forme pour la conception de composants hyperfréquences, thèse doctorat, Université de Limoges, 2009.
- [54] H.G.Kwak, J.Kim, An integrated genetic algorithm complemented with direct search for optimum design of rc frames, Computer Aided Design, 41(7), 490-500, 2009.
- [55] H.T.Öztürk, A.Durmuş, Optimum design of a reinforced concrete beam using artificial bee colony algorithm, Computers and Concrete, 10(3), 295-306, 2012.
- [56] I.E.Boudellioua, Dimensionnement optimal des poteaux en béton armé aux états limites ultimes selon BAEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2013.
- [57] IRABOIS, Manuel Simplifié de l'Eurocode 5 – Bois, France.
- [58] J.M.Dinwoodie, Timber: Its nature and behaviour, E & FN Spon, New Fetter Lane, London, 2000.
- [59] J.Natterer, J.L.Sandoz, M.Rey, Construction en bois Matériau, technologie et dimensionnement.V.13, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [60] J.Ochshorn, Structural Elements for Architects and Builders: Design of Columns, Beams and Tension Elements in Wood, Steel and Reinforced Concrete, 1st Edition, Butterworth - Heinemann, Burlington, 2010.
- [61] J.Olsson, E.Oscarsson, B.Serrano, M.Källsner, Johansson, B.Enquist, Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on basis of local wood fiber orientation, European Journal of Wood and Wood Products, 71, 319–333, 2013.
- [62] K.Kadour, Calcul optimal d'une poutre en béton armé à section rectangulaire simplement et doublement armées selon le code BAEL 91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2015.
- [63] M.Bendahmouche, Calcul optimal d'une poutre en béton à haute performance selon l'Eurocode 2- EC2, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2015.

- [64] M.Bruyneel, J.C.Craveur, P.Gourmelen, Optimisation des structures mécaniques-méthodes numériques et éléments finis, Dunod, Paris, 2014.
- [65] M.CERF, Techniques d'optimisation, Université Pierre et Marie Curie, France, 2016.
- [66] M.Goussanem, L'Etude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA). Algérie, FAO.
- [67] M.Khalfi, Optimisation des structures mécaniques-Forme optimale d'un composant, thèse magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [68] M.Khedraoui, Dimensionnement optimal d'un poteau en béton armé selon le code BAEL 91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2015.
- [69] M.S.A. Kechebar, Economie du bois en Algérie : Etat actuel et perspectives, thèse de Magister, Université Mentouri, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Constantine, 2008.
- [70] P.Duysinx, Optimisation topologique : du milieu continu a la structure élastique, thèse doctorat, Université de Liège, 1996.
- [71] Ph.Crubilé, J.Ehlbeck, H.Bruninghoff, H.J.Larsen, J.Sunley, EUROCODE N° 5 Règles unifiées communes pour les structures en bois, Office des publications officielles des Communautés européennes, 1988.
- [72] P.Jiang, M.Zhu, L.J.Xu, An optimization algorithm for minimizing weight of the composite beam, Adv. in Intelligent and Soft Comput, 135, 769-775, 2012.
- [73] P.Racher, J.P.Biger, F.Rouger, G.Sagot, G.Vidon, Structure en bois aux états limite – introduction à l'eurocode 5 – STEP 1- Matériaux et base de calcul, Eyrolles, Paris, 2000.
- [74] P.Y.Meyer, Introduction à l'optimisation de structures via un code de calcul éléments-finis.
- [75] R.Perera, F.B.Varona, Flexural and shear design of FRP plated RC structures using a genetic algorithm, ASCE Journal of Structural Engineering, 135(11), 1418-1429, 2009.
- [76] S.A.Decker, Développement d'une méthode d'optimisation multiobjectif pour la construction bois : prise en compte du confort des usagers, de l'impact environnemental et de la sécurité de l'ouvrage, thèse doctorat, Université de bordeaux, 2015.
- [77] S.M.K.El Hassar, S.Sakhraoui, M.Souici, Adaptation des Eurocodes structuraux en Algérie – Etude d'impact, Construction Métallique, n° 4-2000.
- [78] S.Silih, M.Premrov, S.Kravanja, Optimum design of plane timber trusses considering joint flexibility, Engineering structures, 27,145-154, 2005.
- [79] S.Silih, S.Kravanja, M.Premrov, Shape and discrete sizing optimization of timber trusses by considering of joint flexibility, Advances Engineering Software, 41(2), 286-294, 2010.
- [80] T.Vincent, Optimisation de structures-Implémentation d'outils d'aide à la conception basés sur les méthodes d'optimisation topologique d'homogénéisation, ENSAM-Lille, Université de Sherbrooke, 2007.
- [81] V.Brun, Conception et principes de dimensionnement des ouvrages en bois selon les Eurocodes ; CETE de l'Est, 2011.
- [82] W.Tang1, L.Tong1, Y.Gu, Improved genetic algorithm for design optimization of truss structures with sizing, shape and topology variables, Int. J. Numer. Meth. Eng.,62, 1737–1762, 2005.
- [83] Y.Benoit, B.Legrand, V.Tastet, Calcul des structures en bois, AFNOR et Groupe Eyrolles, 2008.
- [84] Y.Benoit, Le guide des essences de bois, Groupe Eyrolles, 2008.
- [85] Y.Boumahraz, Dimensionnement optimal d'une poutre en béton précontraint aux états limites de service selon le code BPEL91/99, Mémoire master, Ecole Nationale supérieure des travaux publics-Alger, 2015.
- [86] Y.Collette, P.Siarry, Optimisation multiobjectif, Eyrolles, Paris, 2002.

[87] Y.Yang, J.Liu, G.Xiong, Flexural behaviour of wood beams strengthened with HFRP, *Construction and Building Materials*, 43, 118-124, 2013.