ADIVBOIS

ETUDES PREALABLES AU LANCEMENT DU PROGRAMME PUCA ADIVBOIS

PARANGONNAGE

SYNTHESE

V1 – Août 2016

PARTENAIRES

SUIVI DES VERSIONS

Version	Auteurs	Type	Date
V0		Création	06/2016
V0.1		Augmentée	07/2016
V1		Consolidée	08/2016

SOMMAIRE

1 Introduction 2
2 Règlementation 2
2.1 Généralités 2
2.2 Réglementation sismique 3
3 Outils de justification 4
3.1 Généralités 4
3.2 Avis Techniques, Appréciation Technique Expérimentale et DTA 4
3.2.1 Généralités 4
3.2.2 Les CLTs 6
3.2.3 Les planchers mixtes bois-béton 6
3.3 Documents Techniques Unifiés 7
3.4 Analyse du DTU 31.2 7
3.4.1 Domaine d'application 7
3.4.2 Matériaux 8
3.4.3 Stabilité des ouvrages 8
3.4.4 Tolérances de réalisation des ouvrages 10
3.4.5 Ouvrages de fondations et soubassement 10
3.4.6 Tolérances sur les éléments de mur 11
3.4.7 Autres spécifications sur les éléments de structure 12
3.5 Analyse du DTU 31.1 12
3.5.1 Domaine d'application 12
3.5.2 Stabilité des ouvrages 13
3.5.3 Tolérances de réalisation des ouvrages 13
3.6 Analyse du DTU 53.1 14
3.7 Les Règles Eurocodes 14
3.8 Eurocode 0 : Combinaisons d'actions et fiabilité 17
3.8.1 Domaine d'emploi 17
3.8.2 Situation de projet 17
3.8.3 États limites 17
3.8.4 Fiabilité 18
3.9 Eurocode 1 : Actions sur les structures (hors incendie) 19
3.9.1 EN 1991-1-1 : Charges d'exploitation sur les planchers 19
3.9.2 EN 1991-1-3 : Action de la neige 19
3.9.3 EN 1991-1-4 : Action du vent 19
3.9.4 Actions en cours d'exécution 21
3.9.5 Actions accidentelles (hors incendie) 22
3.10 Eurocode 5 : Justification des structures bois (hors incendie) 24
3.10.1 Coefficients 24
3.10.2 Résistance à la corrosion des assemblages 24
3.10.3 Vérification des éléments de structure 26

3.10.4 Assemblages 26
3.10.5 Vibrations des planchers 27
3.10.6 Vérification des sous-systèmes 29
3.11 Situation de séisme et Eurocode 8 30
3.11.1 Action sismique 30
3.11.2 Diaphragme horizontal 31
3.11.3 Autre information 31
3.12 Analyse de la structure 31
3.12.1 Analyse statique 31
3.12.2 Analyse dynamique 32

Structure

EXPERTS

Synerbois : Florent LYON (CSTB), Laurent LE MAGOROU (FCBA)

1 INTRODUCTION

Le présent document est destiné à présenter le recensement et l'examen des exigences techniques, normatives et réglementaires applicables aux bâtiments de grande hauteur en bois, sous un angle « structure ».

L'un des objectifs est notamment de pointer les possibles manques ou vides dans les moyens ou outils de justifications applicables en regard du domaine d'emploi visé.

Pour cela, un examen du contexte technico-réglementaire est proposé.

De plus, cette action permet, le cas échant, d'identifier les investigations techniques à mener pouvant contribuer à la mise en évidence d'éventuelles déficiences techniques, pouvant nécessiter des études complémentaires, des compléments normatifs ou adaptations de conception.

2 REGLEMENTATION

2.1 Généralités

La mise sur le marché Français d'un produit ou composant de construction est facilitée dès lors que celui-ci est « reconnu » par les différents acteurs du projet de construction (assureurs, bureaux de contrôle, maîtrise d'œuvre, maîtrise d'ouvrage, …) sur l'ensemble de la chaîne allant de la fabrication jusqu'à leur intégration dans l'ouvrage. Cette reconnaissance porte sur l'ensemble des trois axes suivants :

1. Maîtrise de fabrication du produit ou procédé de construction assurant la constance des performances déclarées
2. Maîtrise des règles et principes de conception et de dimensionnement des ouvrages intégrant ces produits ou procédés
3. Maîtrise des règles de mise en œuvre du produit ou procédé de construction dans l'ouvrage

La notion de reconnaissance peut être associée à l'existence de référentiels ou textes (normes, règles professionnelles, …) sur les trois axes précités.

Le produit ou composant de construction reconnu sur ces différents axes est alors considéré comme Traditionnel. Cette reconnaissance prend son importance d'un point de vue de la commercialisation des produits vis-à-vis des assureurs notamment (un produit ou composant traditionnel est bien souvent, s'il ne fait pas l'objet d'un retour de sinistralité important, reconnu comme une technique courante et implique une assurance facilitée).

Les documents de référence concernant les produits ou procédés de constructions sont essentiellement du domaine normatif et donc d'application volontaire mais sont bien souvent rendus obligatoires par les pièces particulières de marchés. Seules les normes européennes harmonisées font l'objet d'une obligation préalable de mise en conformité matérialisée par le marquage CE.

Par ailleurs, il existe en France des lois et règlements visant l'ouvrage et son environnement, ces loi et règlements étant recueillis dans différents codes et applicables quelque soient les procédés mis en œuvre. On peut citer :

1. Code de la Construction et de l'Habitation,
2. Code de l'Urbanisme,
3. Code du Travail,
4. Code de la Santé Publique,
5. Code de la Consommation,
6. Code Civil,
7. Code des Marchés Publics, …

2.2 Réglementation sismique

La réglementation sismique relève de l'autorité nationale. Les exigences et les outils sont référencés dans les textes suivants :

- Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 définissant les nouveaux termes et vocabulaire
- Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français
- Arrêté du 22 octobre 2010 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux bâtiments de la classe dite « à risque normal »
- Arrêté modificatif du 25 octobre 2012 reportant la date de fin de période transitoire des règles de construction parasismique applicables aux bâtiments au 1er janvier 2014
- Arrêté modificatif du 15 septembre 2014 simplifiant les exigences parasismiques applicables à certains types de bâtiments et à certaines parties d'ouvrages

Le dernier arrêté modificatif est intéressant pour les bâtiments de grande hauteur qui pourraient avoir recours à des techniques non traditionnelles ou des analyses de structures non explicitées dans les textes normatifs en vigueur comme les Eurocodes. Il permet notamment :

- L'utilisation de règles simplifiées pour le dimensionnement des éléments non structuraux du bâtiment, dont le champ réglementaire est réduit
- Le recours à des méthodes expérimentales
- La justification de dispositifs constructifs non visés par les règles Eurocodes en tenant compte de leur caractère spécifique

3 OUTILS DE JUSTIFICATION

3.1 Généralités

Afin d'éclairer les acteurs de la construction dans le choix ou l'acceptation de techniques de construction ne relevant pas d'un domaine reconnu traditionnel, le produit ou procédé de construction peut faire l'objet d'une évaluation technique. L'évaluation technique constitue alors la colonne vertébrale de l'appréciation de l'aptitude à l'emploi des procédés, matériaux, éléments ou équipements d'un ouvrage non traditionnel. Elle guide les prescripteurs dans leurs choix de produits et les éclaire dans l'exercice de leurs responsabilités. Ils disposent ainsi de véritables outils d'aide à la décision permettant de vérifier et attester de la qualité des procédés de construction, et apporter une information fiable aux acteurs de la construction.
La reconnaissance par le marché d'un produit non traditionnel peut être facilitée au moyen de l'Avis Technique (ATec), ou de l'Évaluation Technique Européenne lorsque le procédé fait l'objet d'un marquage CE, éventuellement complétée par un Document Technique d'Application (DTA).
La mise en œuvre des procédés de construction reconnus traditionnels relève des règles DTU ou règles professionnelles, règles reconnues comme l'expression écrite des règles de l'art.

3.2 Avis Techniques, Appréciation Technique Expérimentale et DTA

3.2.1 Généralités

L'Article 6 de l'arrêté 21 Mars 2012 document régissant la procédure de l'Avis Technique précise:

Les avis techniques et les documents techniques d'application s'appliquent aux produits, au sens de l'article 1er du décret du 8 juillet 1992 susvisé, et aux procédés destinés au bâtiment :

- susceptibles d'être évalués au regard des exigences mentionnées à l'article 2;
- destinés à des emplois prédéterminés et dont les conditions de mise en œuvre sont définies ;
- bien définis dans leur nature, leur composition, leur structure, leur forme et leur présentation, dont la fabrication peut être assurée dans des conditions qui garantissent la permanence de leurs caractéristiques.

Les avis techniques et les documents techniques d'application doivent rappeler les justifications qui les ont motivés : calculs, essais techniques, expériences directes. Ils peuvent comporter des réserves, notamment quant aux conditions de fabrication et de mise en œuvre.

L'Avis Technique se prononce sur le comportement de l'ouvrage réalisé avec le produit ou le procédé dans des conditions de mise en œuvre précises et pour un domaine d'emploi bien défini.

L'avis technique est une procédure volontaire permettant à un fabricant de vérifier que son produit ou procédé est conforme à la réglementation et permet de construire un ouvrage stable et pérenne.

Il « *fournit à tous les participants à l'acte de construire (maître d'ouvrage, bureau d'études, bureaux de contrôle, architectes, entrepreneurs,…) une opinion autorisée sur des procédés, matériaux, éléments ou équipements utilisés dans la construction lorsque leur nouveauté ou celle de l'emploi qui en est fait ne leur permet pas d'être normalisés. Sont donc exclus les produits ou procédés qui relèvent du domaine traditionnel ainsi que ceux destinés à la décoration ou à l'ameublement*».

La procédure de l' "Appréciation Technique d'Expérimentation" (ATEx) a pour but de contribuer au développement des innovations dans le bâtiment en leur facilitant l'accès à des applications expérimentales par l'obtention rapide d'une appréciation technique formulée, sous l'égide du CSTB, par des experts.

Cette Appréciation porte sur un produit, un matériau, un composant, un équipement, ou un procédé nouveau et innovant pour lequel il n'est pas possible ou pas encore possible d'instruire un Avis Technique.

Destinée à favoriser aussi bien la mise au point en œuvre des innovations que l'exécution de réalisations pouvant servir de références pour l'obtention d'un Avis

Technique, cette procédure d'évaluation n'a pas caractère d'obligation. Elle est ouverte à toutes les parties intéressées : promoteurs d'innovation, maîtres d'ouvrages, concepteurs, entrepreneurs, contrôleurs techniques et assureurs.

3.2.2 Les CLTs

Les avis techniques et DTA de CLT traitent principalement des points suivants :

- Fabrication et contrôle de fabrication des panneaux CLT
- Mise en œuvre
- Dispositions constructives standards
    - Fixations : ancrage, reprise du cisaillement en pied de mur
    - Connections planchers/murs

Ces documents ne ferment pas la porte aux BGH (pas de limitation de hauteur du point de vue structural) mais ils ne contiennent pas particulièrement d'indications ou de dispositions pour la grande hauteur, (continuité des murs sur plusieurs niveaux, assemblages spéciaux ? dispositifs de renforcement des appuis vis-à-vis de la compression localisée, autres ?)

3.2.3 Les planchers mixtes bois-béton

Les Planchers mixtes bois béton font aujourd'hui l'objet d'Avis Technique ou DTA ainsi que de recommandations professionnelles RAGE.
Ces documents traitent des points suivants :

- Fabrication et contrôle de fabrication des panneaux CLT
- Mise en œuvre
- Dispositions constructives standards
- Possibilité de traitement des ponts thermiques

S'agissant de procédés de planchers, les documents ne traitent pas de la problématique de grande hauteur. Ces procédés, en fort développement, constituent néanmoins une solution pertinente pour la réalisation de diaphragmes de planchers rigides et l'atteinte de performances acoustiques. Leur masse par ailleurs relativement limitée semble un atout intéressant dans l'optique d'un bâtiment de grande hauteur.

3.3 Documents Techniques Unifiés

Parmi les Documents Techniques Unifiés (DTU) à disposition de la construction bois, a priori seul le DTU 31.2 « Construction de maisons et bâtiments à ossature en bois » présente des thèmes pouvant avoir un lien avec la problématique de construction d'un bâtiment grande hauteur (BGH) en bois.

3.4 Analyse du DTU 31.2

3.4.1 Domaine d'application

Le domaine d'application du DTU 31.2 couvre les types de locaux pouvant être concernés par les BGH, à savoir les « bâtiments d'usage courants » soit :

- Les maisons unifamiliales isolées ;
- Les maisons jumelées ou en bande ;
- Les bâtiments d'habitations collectives ;
- Les bâtiments à usage de bureaux, scolaire, hospitaliers, hôteliers, et autres établissements recevant du public, etc. ;
- Les locaux industriels, commerciaux.

Il s'applique aux bâtiments contenant des locaux à faible ou moyenne hygrométrie.

Il ne vise pas les constructions à pan de bois comportant des remplissages (maçonnerie, torchis, paille, etc.).

Le DTU 31.2 ne vise pas les techniques constructives retenues pour le projet adivbois (cf. extrait ci-dessous) :

Le présent document ne vise pas non plus les ouvrages dont les éléments porteurs de structure font appel à d'autres principes :

- *Les murs en madriers ou en rondins empilés à chant ;*
- *Les murs sandwiches associant, par collage, des revêtements extérieurs et intérieurs en bois ou en panneaux dérivés du bois à un matériau isolant et qui relèvent de la procédure de l'Avis Technique 1 ou du Document Technique d'Application 1 (DTA) ;*
- *Les éléments structuraux préfabriqués porteurs à base de bois, à voile travaillant (panneaux de particules, bois panneautés, panneaux massifs contrecollés, etc.) ou les modules tridimensionnels qui relèvent de la procédure de l'Avis Technique ou du Document Technique d'Application (DTA).*

3.4.2 Matériaux

3.4.2.1 Matériaux bois

La définition des matériaux bois et à base de bois utilisables pour les ouvrages (matériaux en bois et panneaux à base de bois) relevant du DTU 31.2 peut être reprise pour les BGH. Idem pour les matériaux en plaques et complexe.

3.4.2.2 Matériaux de fixation ou d'assemblage

Le type d'organe d'assemblage et leur revêtement anticorrosion décrits dans le DTU restent valables pour les BGH. Il est cependant probable que la dimension des ouvrages nécessite le développement d'organes d'assemblages de taille inhabituelle nécessitant une évaluation à part entière comme c'est le cas aujourd'hui pour les systèmes sous ETA déjà mentionnées par le DTU 31.2.

3.4.3 Stabilité des ouvrages

Les principes généraux de justification de la stabilité d'un ouvrage, rappelés dans le DTU 31.2 peuvent s'appliquer à un BGH. Les règles de moyens données par le DTU pour des ouvrages MOB ne s'appliquent en revanche pas :

7.1.2 Justification de la solidité des ouvrages

7.1.2.1 Généralités

Les plans d'atelier et de chantier se traduisent par des plans d'exécution, ou par une épure si le maître d'ouvrage ou son représentant l'accepte.
Les documents d'exécution doivent au minimum comporter les indications suivantes :

- *Les charges agissant sur la structure et transmises aux fondations ;*
- *La nature et le classement mécanique des bois employés (NF EN 338 pour les bois massifs, NF EN 1194 pour les bois lamellés collés et NF B 52-010 pour les BMR) ; LVL (NF EN 13986 et NF EN 14374), Panneaux à base de bois (NF EN 13986) ;*
- *Dans le cas d'utilisation de bois ayant une durabilité conférée, la nature et le mode d'application du produit de préservation (NF EN 351, NF EN 350, NF EN 599), et une attestation de traitement (NF B 50-105-3) en fonction de la classe biologique d'emploi (NF EN 335 et NF B 50-100-4) ;*

- *Dans le cas d'utilisation de bois ayant une durabilité naturelle, la classe de durabilité du bois (NF EN 350 et NF EN 460) en fonction de la classe d'emploi (NF EN 335 et NF B 50-100-4) ;*
- *Le détail des assemblages et ancrages, leur nombre, etc. ;*
- *Si nécessaire, les points de prise pour la manutention, les points d'élingage pour le levage et les précisions relatives à la nature, aux modes de fixation et à la programmation de la mise en place des contreventements provisoires et du retrait de ces derniers.*

Des dispositions doivent être prises pour assurer les stabilités longitudinales et transversales de l'ouvrage ou des éléments d'ouvrage et pour éviter d'éventuels soulèvements ou renversements.

NOTE 1
La stabilité peut être assurée par :

- *Des portiques longitudinaux ou transversaux ;*
- *Des parois, verticales, horizontales ou inclinées ;*
- *La présence d'un voile travaillant ;*
- *Des contreventements en croix de Saint André, système K, poutres au vent, etc.*

Les pièces marchées prescrivent l'utilisation soit de l'Eurocode 5 (NF EN 1995-1-1) et l'amendement A1 (NF EN 1995-1-1/A1), soit des règles CB 71 (NF P 21-701 et NF P 21-102) et dans tous les cas il convient que la technique retenue se prête à la vérification par le mode de calcul choisi. L'entrepreneur doit être en mesure d'apporter les justifications correspondantes selon le cas.

La possibilité de justifier de la stabilité des composants ou des procédés par l'expérimentation est également rappelée (extrait). Cette voie devra probablement être utilisée dans le cadre du projet BGH notamment pour les assemblages.

Dans le cadre d'une approche aux états limites, la justification des composants et produits de construction s'effectue soit uniquement par le calcul, soit par dimensionnement assisté par expérimentation. Dans ce cas, les méthodes correspondantes sont définies par les normes suivantes (liste non exhaustive) :

- *NF EN 594 pour les essais de raideur et résistance au contreventement des murs à ossature en bois ;*
- *NF EN 595 pour les essais sur des fermes pour la détermination de la résistance et de la rigidité ;*

- *NF EN 596 pour les essais de choc de corps mou sur murs à ossature en bois ;*
- *NF EN 1195 pour les essais sur le comportement des planchers structuraux ;*
- *NF EN 12871 pour les essais sur les panneaux travaillants utilisés en planchers, murs et toitures.*

7.1.2.1.1 Dispositions constructives justifiant la stabilité de l'ouvrage

La justification du contreventement est basée sur :

- *La résistance des panneaux ;*
- *La résistance des ancrages rigides ;*
- *La transmission des efforts entre panneaux.*

Bien qu'il s'agisse dans ce texte d'un ouvrage d'ossature avec voile travaillant, les principes restent les mêmes pour un ouvrages CLT.

3.4.4 Tolérances de réalisation des ouvrages

Concernant les tolérances de fabrication ou d'exécution et compte tenu de l'impact que peut avoir un faux aplomb sur un BGH, il y a lieu de se questionner sur la possibilité/la nécessité de demander des tolérances plus fines que celles du DTU 31.2 pour la fabrication des différents éléments comme pour leur mise en œuvre.

3.4.5 Ouvrages de fondations et soubassement

Le DTU 31.2 définit les tolérances suivantes pour l'ouvrage de soubassement. Il n'existe à notre connaissance pas de prescriptions particulières concernant les tolérances des soubassements pour des ouvrages bois de grande hauteur. Ce point devra être particulièrement investigué lors de la revue des BGH bois existants :

- Pour les ouvrages en maçonnerie, par la norme NF DTU 20.1 ;
- Pour les ouvrages en béton, par la norme NF DTU 23.1.

L'entrepreneur doit, en outre, respecter les tolérances ci-après :

- *Longueur et largeur : ± 0,01 m ;*
- *Équerrage : ± 0,01 m mesuré sur 10 m ;*

- *Arase : sur le muret périphérique, sur la dalle de fondation ou sur les piles, l'arase doit être nivelée avec une tolérance de ± 0,01 m sur une longueur de 10 mètres linéaires alignés ou non et de ± 2 mm par mètre linéaire ;*
- *Rectitude des bords en plan : ± 5 mm*

NOTE
Il s'agit de l'emplacement des éléments de structure principaux (murs périphériques et de refends porteurs dans le cas des parois verticales porteuses continues).

3.4.6 Tolérances sur les éléments de mur

7.3.1.7 Tolérances de fabrication des éléments de structure de mur

On indique ici les tolérances de fabrication des éléments de structure de mur, y compris pour les réservations des ouvertures dans les murs, au moment de leur réception sur le chantier.

7.3.1.7.1 Tolérances dimensionnelles

- *Hauteur : ± 3 mm sur la cote nominale ;*
- *Largeur : ± 3 mm sur la cote nominale ;*
- *Épaisseur : ± 2 mm sur la cote nominale ;*
- *Différence de longueur entre les deux diagonales ≤ 5 mm si la diagonale est inférieure ou égale à 6 m et ≤ 7mm si la diagonale est supérieure à 6 m ;*
- *Faux équerrage : ≤ 1 mm/m.*

7.3.1.7.2 Tolérances de planéité

Lorsque l'on pose une règle de 2 m sur un endroit quelconque d'un élément de structure de mur, cet élément ne doit pas révéler une flèche supérieure à 5 mm
En outre, certains parements (extérieur ou intérieur) peuvent imposer une tolérance de planéité réduite.

7.4.1.3 Tolérances de mise en œuvre sur les parois verticales

Les tolérances sur les parois verticales sont à vérifier avant exécution des revêtements extérieurs et intérieurs.

Les limites suivantes sont à appliquer :

7.4.1.3.1 Tolérance de verticalité

Un faux-aplomb inférieur ou égal à 5 mm est admis sur une hauteur d'étage.

7.4.1.3.2 Tolérance de raccordement

Le désaffleurement entre éléments de structure de mur adjacents ou superposés de part et d'autre d'un plancher doit être inférieur ou égal à 3 mm
En outre, certains parements (extérieur ou intérieur) peuvent imposer une tolérance de planéité réduite.

7.4.1.3.3 Tolérance de planéité

La planéité mesurée à la règle de 2 m entre deux éléments de structure de mur superposés de part et d'autre d'un plancher ne doit pas révéler une flèche supérieure à 5 mm, sauf si ces éléments sont décalés pour former larmier.

7.4.1.3.4 Tolérances dimensionnelles

Les tolérances dimensionnelles des façades du bâtiment, mesurées sur 10 m, sont :

- *Longueur et largeur : ± 0,01 m ;*
- *Équerrage : ± 0,01 m.*

3.4.7 Autres spécifications sur les éléments de structure

Le DTU 31.2 donne des prescriptions concernant l'humidité des pièces de bois notamment celles impliquées dans des assemblages. Il y aura lieu de s'interroger sur le comportement des assemblages en fonction de l'humidité des pièces de bois afin de savoir si les humidités cibles indiquées par le DTU 31.2 sont applicables.

7.3.1.1.3 Humidité

L'humidité des éléments doit être au maximum de 18 % au moment de l'assemblage, avec un écart entre deux éléments au maximum de 4 %. Le taux d'humidité des éléments doit être déterminé selon les méthodes décrites par les normes NF EN 13183-1 à -3.

3.5 Analyse du DTU 31.1

3.5.1 Domaine d'application

Le domaine d'application du DTU 31.1 couvre les travaux de charpente, pans de bois et escaliers en bois. Ce DTU ne fait aucune mention de hauteur limite. La technique dite de colombage retenue parmi les solutions potentielles par adivbois peut être considérée comme relevant de ce DTU. Ceci n'est en revanche pas le cas pour les CLT.

3.5.1.1 Matériaux bois

La définition des matériaux bois et à base de bois utilisables pour les ouvrages (matériaux en bois et panneaux à base de bois) relevant du DTU 31.1 peut être reprise pour les BGH. Les exigences portant sur la qualité des bois y sont décrites de façon plus détaillées que dans le DTU 31.2.

3.5.1.2 Matériaux de fixation ou d'assemblage

Le type d'organe d'assemblage et leur revêtement anticorrosion décrits dans le DTU 31.1 restent valables pour les BGH. Il est cependant probable que la dimension des ouvrages nécessite le développement d'organes d'assemblages de taille inhabituelle pour lesquels une évaluation à part entière sera nécessaire (systèmes sous ETA).

Les attendus en terme de protection anti-corrosion des assembleurs métalliques sont particulièrement bien décrits dans le DTU 31.1 §4.2 qui indique notamment que :

- *Les ferrements, ferrures et éléments en acier sont protégés de la corrosion sur toutes leurs faces, avant mise en place, par une couche de peinture primaire inhibitrice de corrosion appliquée selon les spécifications du DTU n° 59.1 « Travaux de peinturage ».*
- *Les connecteurs en tôle minces doivent être protégés au minimum par une galvanisation à chaud dont la masse minimale du revêtement de zinc correspond à la classe Z 275 vérifiée selon les spécifications de la norme NF A 36-321.*

Ces dispositions s'appliquent également pour un BGH en bois.

3.5.2 Stabilité des ouvrages

Le DTU 31.1 définit dans son §6.3 des règles concernant la réalisation des assemblages dont la plupart peuvent s'appliquer au BHG bois. Le paragraphe 6.3.2.1 concernant les assemblages boulonnés contient notamment la note suivante :

Pour certains types d'ouvrages (par exemple soumis à des sollicitations dynamiques) il peut être nécessaire de procéder exceptionnellement à un resserrage des boulons.

Dans le cas d'un BGH bois soumis à des efforts dynamiques et cycliques sous effets du vent, ce principe peut s'avérer utile voire indispensable tant la notion de raideur des assemblages apparait importante.

3.5.3 Tolérances de réalisation des ouvrages

Le DTU 31.1 définit des tolérances d'implantation:

Les tolérances sur les cotes d'implantation et celles sur les grandes dimensions de l'ouvrage sont égales à :

- *± 0,5 cm jusqu'à 7,5 mètres*
- *± 1,5 cm à 10 mètres*
- *± 5 cm à 100 mètres*

Les valeurs intermédiaires sont obtenues par interpolation linéaire entre 7,5 m et 10 m et entre 10 m et 100 m.
Les niveaux doivent être respectés avec une tolérance de ± 1 cm sur une longueur de 10 mètres et les aplombs sont réglés avec une tolérance de ± 2,5 mm/m sans excéder ± 2,5 cm.

De la même façon que pour les tolérances données par le DTU 31.2, il y a lieu de s'interroger pour savoir si un ouvrage de grande hauteur nécessite des tolérances classiques ou si celles-ci doivent être resserrées pour faire face aux risques de faux aplomb plus préjudiciables sur ces ouvrages.

3.6 Analyse du DTU 53.1

Ce DTU s'applique aux ouvrages de planchers réalisés à partir de solives et de panneaux. Hormis les paragraphes de définition des matériaux bois tels que qu'ils sont également présentés dans les DTU 31.1 et 31.2, il ne présente aucun point particulier méritant d'être relevé dans le cadre d'une construction bois de grande hauteur.

3.7 Les Règles Eurocodes

Les documents de référence pour ce qui concerne les règles de conception sont à la fois du domaine normatif et du domaine réglementaire (d'application obligatoire comme par exemple la situation de séisme). Les règles de calcul pour justifier la conception d'un point de vue mécanique (stabilité, solidité) sont la série des Eurocodes.
Concernant les bâtiments à structure bois, on citera en particulier :

Pour les combinaisons d'actions et règles générales :

- NF EN 1990 : Eurocodes structuraux - Bases de calcul des structures

Pour la détermination des actions sur les structures :

- NF EN 1991-1-1 : Actions sur les structures - Partie 1-1 : Actions générales - Poids volumiques, poids propres, charges d'exploitation des bâtiments
- NF EN 1991-1-3 : Actions sur les structures - Partie 1-3 : Actions générales - Charges de neige
- NF EN 1991-1-4 : Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales - Actions du vent

Pour la vérification des structures bois :

- NF EN 1995-1-1 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments
- NF EN 1995-1-2 : Conception et calcul des structures en bois - Partie 1-2 : Généralités – Calcul des structures au feu

Ainsi que leurs amendements et annexes nationales respectifs.

En complément, en fonction des technologies constructives retenues et/ou pour le cas des bâtiments de grande hauteur, on citera également :

Pour les actions sur la structure :

- NF EN 1991-1-6 : Actions sur les structures - Partie 1-6 : Actions générales - Actions en cours d'exécution
- NF EN 1991-1-7 : Actions sur les structures - Partie 1-7 : Actions générales – Actions accidentelles

Pour les structures béton (noyau par exemple) :

- NF EN 1992-1-1 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1992-1-2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu

Pour les éléments métalliques :

- NF EN 1993-1-1 : Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
- NF EN 1993-1-2 : Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu

- NF EN 1993-1-8 : Calcul des structures en acier - Partie 1-8 : Calcul des assemblages

Pour les fondations :

- NF EN 1997-1 : Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales
- NF EN 1997-2 : Calcul géotechnique - Partie 2 : Reconnaissance des terrains et essais

Ainsi que leurs amendements et annexes nationales respectifs.

Enfin, dans le cas particulier des ouvrages en zone sismique :

Pour les effets du séisme et la justification de l'ouvrage :

- NF EN 1998-1 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments

Pour les fondations et l'interaction sol/structure :

- NF EN 1998-5 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques

Pour les spécificités du comportement des ouvrages élancés :

- NF EN 1998-6 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes - Partie 6 : Tours, mâts et cheminées

Ainsi que leurs amendements et annexes nationales respectifs.

Il est rappelé également que les Eurocodes établissent une distinction entre Principes et Règles d'Application.
Les Principes (clauses identifiées par la lettre P) comprennent des énoncés d'ordre général, des définitions, des prescriptions et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée, sauf indication contraire.
Les Règles d'Application sont des règles généralement reconnues qui sont conformes aux Principes et satisfont leurs exigences. Il est admissible d'utiliser des règles de dimensionnement différentes des Règles d'Application données dans les Eurocodes pour les ouvrages, à condition que leur conformité aux Principes concernés soit démontrée et qu'elles donnent au moins le même niveau de sécurité structurale, d'aptitude au service et de durabilité, que celui qui serait escompté par l'utilisation des Eurocodes.
Ceci permet notamment l'approche « design by testing » qui s'appuie sur l'introduction de techniques expérimentales. Dans ce cas, il conviendra de suivre notamment la procédure de l'annexe D de l'EN 1990.

3.8 Eurocode 0 : Combinaisons d'actions et fiabilité

3.8.1 Domaine d'emploi

Comme stipulé par l'EN 1990, celui-ci est applicable pour le calcul de structures non traitées par les EN 1991 à EN 1999, dans lesquelles interviennent des matériaux ou des actions non couverts par celles-ci. En d'autres termes, les combinaisons d'actions énoncées dans l'EN 1990 sont applicables sans restriction aux bâtiments de grandes hauteurs même si certains éléments en termes de justification et/ou d'actions doivent faire l'objet d'hypothèses non données par les Eurocodes 1 à 9.

3.8.2 Situation de projet

Les situations de projet sélectionnées doivent être suffisamment sévères et variées pour englober toutes les conditions dont on peut raisonnablement envisager qu'elles se présentent au cours de l'exécution et de l'utilisation du bâtiment. L'EN 1990 les classe de la manière suivante :

- Situations de projet durables, qui se réfèrent aux conditions d'utilisation normale
- Situations de projet transitoires, qui se réfèrent à des conditions temporaires applicables à la structure, par exemple en cours d'exécution ou de réparation
- Situations de projet accidentelles, qui se réfèrent à des conditions exceptionnelles applicables à la structure ou à son exposition, par exemple à un incendie, à un choc, ou aux conséquences d'une défaillance localisée
- Situations de projet sismiques, qui se réfèrent à des conditions applicables à la structure lorsqu'elle est soumise à des tremblements de terre

D'une manière générale, pour les ouvrages courants en bois, seules les situations durables et, le cas échéant, sismiques et/ou accidentelles (neige) sont envisagées. Cependant, pour les ouvrages de grande hauteur, compte tenu des durées d'exécution plus importantes et des systèmes constructifs retenus, il conviendra de ne pas négliger les situations transitoires (phase exécution) et accidentelles (choc, défaillance locale).

3.8.3 États limites

L'EN 1990 distingue les états limites ultimes pour la vérification de la sécurité (stabilité, résistances, …) et les états limites de service pour la vérification de l'aptitude au service des structures (déformations, vibrations, …).

Les états limites ultimes doivent être l'objet de vérifications chaque fois qu'il y a lieu :

- La perte d'équilibre de tout ou partie de la structure considérée comme un corps rigide
- Une défaillance due à une déformation excessive, à la transformation en mécanisme de tout ou partie de la structure, à une rupture, à une perte de stabilité de tout ou partie de la structure, y compris ses appuis et fondations
- Une défaillance provoquée par la fatigue ou d'autres effets dépendant du temps.

Les bâtiments de grande hauteur seront notamment fortement concernés par la perte d'équilibre (vent, séisme). Il conviendra donc de ne pas négliger les combinaisons de type ELU-EQU.

Concernant les états limites de service, une distinction doit être faite entre les états limites de service réversibles et les états limites de service irréversibles. La vérification des états-limites de service repose sur des critères concernant les aspects suivants :

- Les déformations qui affectent l'aspect, le confort des utilisateurs, la fonction de la structure ou qui endommagent des finitions ou des éléments non structuraux
- Les vibrations qui nuisent au confort des personnes ou qui limitent l'efficacité fonctionnelle de la structure
- Les dommages susceptibles de nuire à l'aspect, à la durabilité ou à la fonction de la structure

Dans le cas des bâtiments de grande hauteur, les aspects « vibrations » devront être pris en compte, notamment à cause de leur réponse dynamique vis-à-vis du vent.

3.8.4 Fiabilité

Aux fins de la différenciation de la fiabilité, des classes de conséquences (CC) peuvent être établies en tenant compte des conséquences de la défaillance ou du mauvais fonctionnement de la structure, telles que données dans le Tableau B.1 de l'EN 1990. Dans le cas des bâtiments de grande hauteur, il pourrait être envisagé de considérer la classe CC3 (conséquences élevées) au lieu de la classe usuelle CC2 (conséquences moyennes).
Dans ce cas, on y associerait la classe de fiabilité RC3 (et le coefficient de fiabilité β de 4,3 au lieu de 3,8 pour la RC2). La prise en compte de cette différentiation de la fiabilité peut être envisagée de différentes manières. Elle peut se faire soit par un renforcement du contrôle (IL3) et du niveau de supervision (DSL3), soit par la correction des différents coefficients partiels permettant la construction des combinaisons d'actions (par un coefficient K_{FI} = 1,1 pour passer de RC2 à RC3). On

préfère en général la première approche. L'approche consistant à corriger les coefficients partiels sur les matériaux (γ_M) n'est pas recommandée, surtout pour des bâtiments de grande hauteur pour lesquels une analyse multi-matériaux sera nécessaire.

À noter qu'en fonction de la forme structurale et des décisions prises au cours du projet, des éléments particuliers de la structure peuvent être rangés dans la classe de conséquences inférieure ou supérieure à celle de la structure entière.

3.9 Eurocode 1 : Actions sur les structures (hors incendie)

3.9.1 EN 1991-1-1 : Charges d'exploitation sur les planchers

Lors de l'analyse de l'EN 1991-1-1, il n'a pas été relevé d'éléments pouvant conduire à des spécificités ou hypothèses particulières à retenir dans le cas des bâtiments de grande hauteur.

3.9.2 EN 1991-1-3 : Action de la neige

Lors de l'analyse de l'EN 1991-1-3, il n'a pas été relevé d'éléments pouvant conduire à des spécificités ou hypothèses particulières à retenir dans le cas des bâtiments de grande hauteur.

On notera cependant que l'EN 1991-1-3 ne traite pas d'aspects particuliers du chargement de neige, tels que les chocs dus aux charges de neige glissant ou tombant d'une autre toiture. Cette situation accidentelle (choc) serait a priori à envisager sur certains projets architecturaux.

3.9.3 EN 1991-1-4 : Action du vent

Le domaine d'application de l'EN 1991-1-4 permet de couvrir les bâtiments de grande hauteur jusqu'à 200 m de hauteur. Il n'y a donc pas de frein normatif.

À noter que l'EN 1991-1-4 offre également la possibilité, en complément des calculs, de recourir à des essais en soufflerie et/ou à des méthodes numériques afin d'obtenir des informations concernant les charges dues au vent naturel et la réponse de la structure. L'annexe nationale rappelle quelques règles de bonne pratique pour l'application correcte de telles approches.

Pour la détermination de l'effort de vent global (notamment pour la vérification ELU-EQU), le coefficient de structure $C_s.C_d$ ne pourra pas être pris égal à 1 mais devra être

calculé, soit selon la procédure détaillée en § 6.3 et la procédure 1 de l'annexe B (l'annexe C n'est pas applicable en France), soit par l'approche simplifiée (valeurs enveloppes conservatrices) de l'annexe D.
À noter que le domaine de validité de la procédure détaillée est assez limité en termes de géométrie de bâtiment.

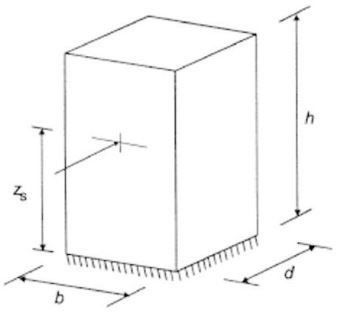

FIGURE 1 : GEOMETRIE POUR LE CALCUL DU C_sC_D

Pour le calcul de la pression dynamique de pointe, l'EN 1991-1-4 offre la possibilité de « découper » les bâtiments de grande hauteur en plusieurs éléments (hauteurs de référence) afin d'optimiser la répartition des efforts dus au vent sur les façades.

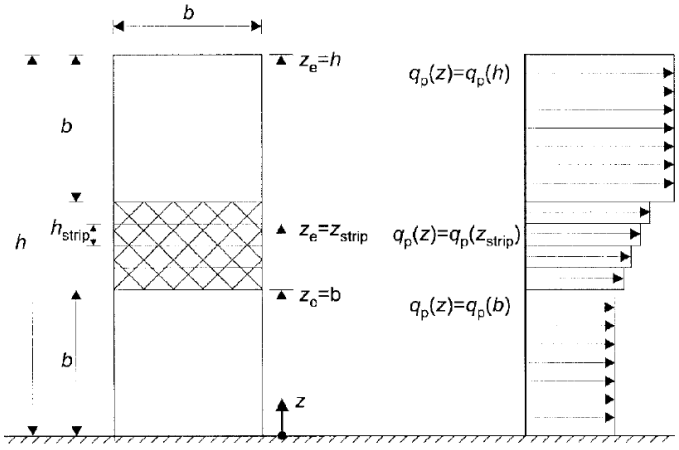

FIGURE 2 : PROFIL DE LA PRESSION DYNAMIQUE AVEC PLUSIEURS HAUTEURS DE REFERENCE

Ceci est bien sûr fortement recommandé.

Dans le cas des bâtiments de grande hauteur, si le rapport hauteur/largeur de la face perpendiculaire au vent est supérieur à 6, il est recommandé d'examiner l'effet de détachement tourbillonnaire. Le détachement tourbillonnaire survient lorsque des tourbillons se détachent alternativement à partir des côtés opposés de la construction, produisant une force fluctuante perpendiculaire à la direction du vent. La mise en vibration de la construction peut se produire si la fréquence du détachement tourbillonnaire est identique à la fréquence propre du bâtiment.

Lorsque les bâtiments de grande hauteur seront entièrement en bois, y compris le système de stabilité latérale, cela conduira à des structures relativement souples sujettes au phénomène de galop. Il s'agit d'une vibration auto-entretenue selon un mode de flexion perpendiculaire au vent. Les sections transversales non circulaires, notamment les sections en L, en I, en U et en T sont prédisposées au phénomène de galop. Cette oscillation apparaît pour une vitesse de vent particulière, appelée v_{CG} et son amplitude croît en général rapidement avec la vitesse du vent.
De plus, des effets d'interaction entre le détachement tourbillonnaire et le phénomène de galop sont susceptibles de se produire.

On trouve dans l'annexe E les règles relatives à la réponse au détachement tourbillonnaire, le phénomène de galop, ainsi que certaines recommandations concernant les effets aéro-élastiques.

Par contre, il faut rappeler que l'EN 1991-1-4 ne fournit pas de recommandations concernant les aspects suivants :

- Les vibrations de torsion, par exemple de bâtiments avec noyau central
- Les vibrations lorsque d'autres modes autres que le mode fondamental doivent être pris en considération

De fait, une conception régulière en plan et en élévation est fortement recommandée (permettant de limiter ces effets induits).
Les « Recommandations pour le calcul des effets du vent sur les constructions » de la CECM donnent une méthode de calcul des vibrations de torsion des ouvrages dues à la turbulence longitudinale du vent naturel.

3.9.4 Actions en cours d'exécution

L'EN 1991-1-6 décrit les principes et les règles d'application pour la détermination des actions à prendre en compte au cours de l'exécution des bâtiments et des ouvrages de génie civil, incluant entre autres les aspects suivants :

- Actions sur les éléments structuraux et non structuraux lors de la manutention
- Pré-déformations
- Retrait
- Actions dues au vent
- Charges de neige
- Actions dues à l'eau

- Charges de construction
- Actions accidentelles
- Actions sismiques

A priori, pour un bâtiment de grande hauteur en bois, seules les actions sollicitant la stabilité latérale de l'ouvrage en phase exécution devraient être prises en compte. En effet, l'effet de la faible masse de l'ouvrage sur sa stabilité est accentué en phase d'exécution.

Pour les effets du vent, la durée prévue de la phase d'exécution peut être prise en compte via :

- Le coefficient de saison (NF EN 1991-1-4/NA §4.2 (2))
- Le coefficient de probabilité C_{prob} sur 1 an (EN 1991-1-4 §4.2 (2) Note 4)

De plus, on pourra considérer les actions de la neige et des charges de construction comme des actions de court terme.

3.9.5 Actions accidentelles (hors incendie)

L'EN 1991-1-7 ne donne pas explicitement des valeurs de charges mais fournit des stratégies et des règles pour préserver l'ouvrage contre les actions accidentelles identifiables ou non. Il est ainsi destiné à être utilisé par :

- Les clients (par exemple pour la formulation de leurs exigences spécifiques relatives aux niveaux de sécurité)
- Les concepteurs
- Les constructeurs
- Les autorités compétentes

Ces principes et règles d'application permettent l'évaluation des actions accidentelles telles que :

- Les forces d'impact causées par les véhicules
- Les actions causées par des explosions intérieures
- Les actions dues à une défaillance locale due à une cause non spécifiée

Ces principes et règles d'application permettent également de définir des stratégies pour des actions accidentelles identifiées ou des stratégies de limitation de l'étendue d'une défaillance locale.

À noter que l'EN 1991-1-7 ne traite spécifiquement ni des actions accidentelles résultant d'explosions extérieures, d'activités liées à la guerre ou d'activités terroristes, ni de la stabilité résiduelle des bâtiments endommagés par un séisme ou par un incendie, etc.

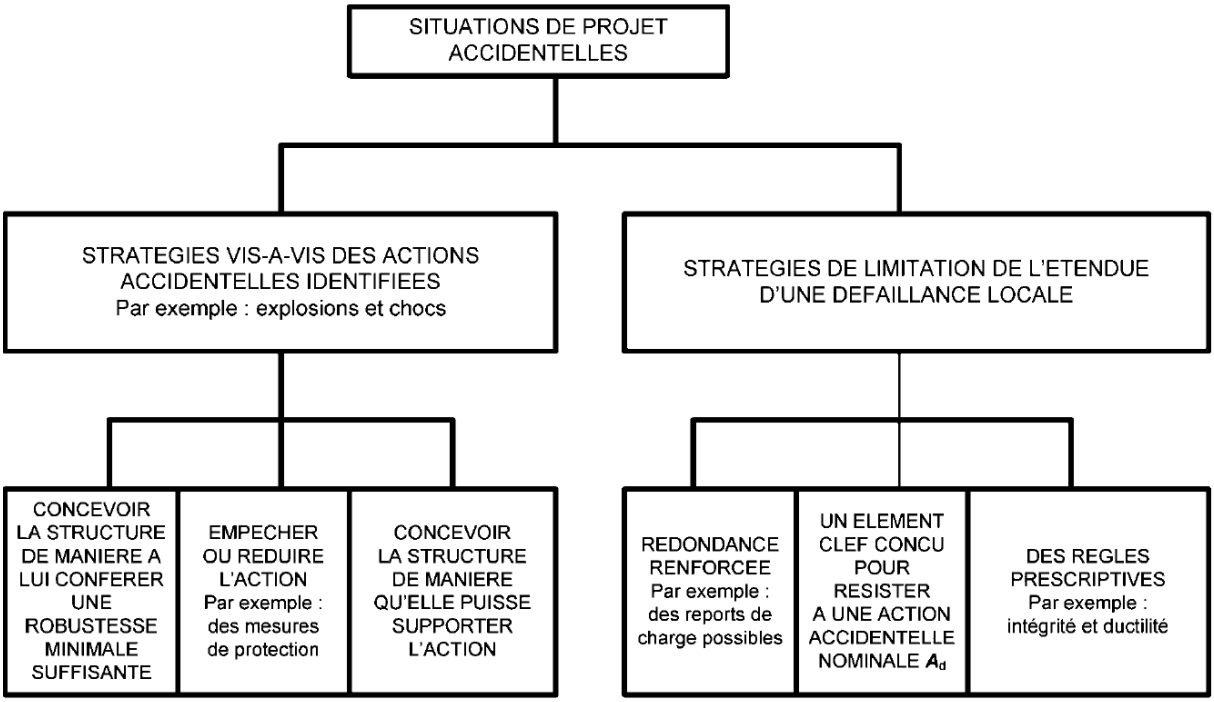

FIGURE 3 : STRATEGIES PRESENTEES POUR LA SITUATION ACCIDENTELLE

Les stratégies pour les situations de projet accidentelles peuvent être basées sur les classes de conséquences définies dans l'EN 1990, à savoir :

- CC1 Faibles conséquences de la défaillance
- CC2 Conséquences moyennes de la défaillance
- CC3 Conséquences élevées de la défaillance

En général, les bâtiments de grande hauteur jusqu'à 15 niveaux sont affectés à la classe de conséquence CC2 (voir recommandations de l'annexe A de l'EN 1991-1-7).

Le choix de la classe de conséquence n'est pas sans incidence sur l'analyse. En effet, l'EN 1991-1-7 recommande les approches suivantes :

- Pour la CC1 : aucune considération spécifique n'est nécessaire pour les actions accidentelles à condition d'apporter l'assurance que les règles de robustesse et de stabilité indiquées dans les EN 1990 à EN 1999, selon le cas, sont satisfaites
- Pour la CC2 : en fonction des circonstances spécifiques de la structure, une analyse simplifiée au moyen d'actions équivalentes statiques modélisées peut être adoptée ou bien des règles de calcul et des dispositions constructives peuvent être appliquées
- Pour la CC3 : il convient d'examiner spécifiquement chaque projet afin de déterminer les niveaux de fiabilité et d'analyse de structure requis. Cela peut nécessiter une analyse de risque et l'utilisation de méthodes perfectionnées pour étudier l'interaction entre la charge et la structure

3.10 Eurocode 5 : Justification des structures bois (hors incendie)

3.10.1 Coefficients

Les coefficients partiels sur les matériaux γ_M donnés par l'Eurocode 5 (et conservés par l'annexe nationale) peuvent être utilisés sans majoration si l'on affecte l'ouvrage en classe de conséquence CC2 associée à un renforcement du contrôle.

De même, les coefficients de modification k_{mod} et les coefficients de déformation k_{def} peuvent être appliqués.
À noter que des travaux récents semblent indiquer que pour les assembleurs surfaciques de type anneaux ou crampons, les valeurs de k_{mod} de l'Eurocode 5 devraient être minorées (sensibilité accrue à la rupture de type fragile).

3.10.2 Résistance à la corrosion des assemblages

L'Eurocode 5 donne quelques exemples de dispositions concernant le choix des matériaux ou de la protection vis-à-vis de la corrosion pour les assemblages. Cependant, ces exemples sont limités à un seul « paramètre d'entrée » qui est la classe de service. D'autres facteurs doivent être pris en compte comme la corrosivité ambiante et les compatibilités des matériaux ou protection avec les essences de bois retenues.

Pour cela, on peut se référer au projet de classes de corrosivité qui est actuellement en cours d'introduction dans la révision de la norme EN 14592 sur les assembleurs de type tige (boulons, broches, vis, pointes, …)

	Humidité attendue (HR) et acidité des bois (pH)					
	HR < 10%	10% ≤ HR ≤ 16%	16 < HR ≤ 20% et jusqu'à 30% ponctuellement		HR > 30%	
	-	-	Non traité ou pH > 4	Traité ou pH ≤ 4	Non traité ou pH > 4	Traité ou pH ≤ 4
Acier galvanisé	5 µm	25 µm	50 µm	-	-	-
Acier inox	K2	K2	K2	K2 / K3	K2	K3

	Classes d'atmosphère selon ISO 9223					
	C1	C2	C3	C4		C5/CX
	-	-	-	Exposé à l'eau	Non exposé à l'eau	-
Acier galvanisé	5 µm	Milieu sec 20 µm Milieu humide 40 µm	Milieu sec 35 µm Milieu humide 75 µm	100 µm	200 µm	-
Acier inox	K2	K2	K2	K2/K3	K3/K4	K4/K5

Les correspondances des classes K pour les aciers inox sont :

Classe d'acier inox	EN 10088-1	EN ISO 3506-1
K2	1.4301	A2

	1.4307	A2
	1.4567	A2
	1.4541	A3
	1.4318	-
K3	1.4401	A4
	1.4404	A4
	1.4578	A4
	1.4571	A5
	1.4362	-
	1.4062	-
	1.4162	-
	1.4662	-
K4	1.4439	-
	1.4462	-
	1.4539	-
K5	1.4565	-
	1.4529	-
	1.4547	-

3.10.3 Vérification des éléments de structure

La section 6 de l'Eurocode 5 « États Limites Ultimes » n'appelle pas de commentaires particuliers dans le cas de son application aux bâtiments de grande hauteur.

3.10.4 Assemblages

L'Eurocode 5 donne en section 7 les modules de glissement K_{ser} pour des organes d'assemblage unitaire et sans jeu. Il faut retenir que les formules proposées ne sont pas homogènes, ne s'appuient pas sur une approche théorique (RdM) mais sont issues d'un calage moyen sur des valeurs expérimentales.
De fait, la variation induite par l'angle entre l'effort sur l'organe et le fil du bois n'est pas prise en compte. Cet effet est d'autant plus grand que le diamètre de l'organe d'assemblage augmente.
Cela a pour conséquence d'introduire des erreurs importantes de redistribution d'efforts dans les organes d'assemblage pour les assemblages de grande dimension. En particulier, dans les assemblages de type encastrement, la reprise de moments induit des efforts d'orientation différentes par rapport au sens du fil du bois pour chaque organe. La redistribution réelle des efforts devrait tenir compte du K_{ser} de chaque organe.
À noter également que dans les assemblages de type encastrement, la reprise d'un moment induit un cisaillement supplémentaire dans la zone d'assemblage qu'il convient de ne pas négliger.

Enfin, dans le cas des assemblages pouvant comporter un jeu, il est préférable de l'introduire spécifiquement dans le modèle plutôt que d'utiliser l'approche de la raideur sécante. L'introduction du jeu dans le modèle est en effet plus « propre » avec une analyse linéaire élastique au second ordre préconisée.

3.10.5 Vibrations des planchers

L'Eurocode 5 demande la vérification du confort vibratoire des planchers. Pour cela, une méthode simplifiée est proposée. Cependant, elles présentent trois limitations majeures :

- Critères pour les planchers résidentiels
- Planchers à fréquence fondamentale supérieure à 8 Hz
- Formules adaptées aux planchers simples sur 2 appuis

Cette approche ne prend donc pas en compte la géométrie du plancher, ni les conditions limites du plancher.

Dans tous les autres cas, l'Eurocode 5 ne propose pas d'outil.

On pourra alors s'appuyer sur des critères en accélération et/ou vitesse « acceptable » en fonction de la fréquence fondamentale du plancher. Les contours de ces critères sont donnés dans la norme ISO 10137 pour différents usages du plancher et pour des gammes de fréquences de 1 à 13 Hz.

Au-delà de 12/13 Hz, il n'est d'ailleurs pas nécessaire de mener une vérification des critères.

Il conviendra cependant de garder en tête que ces critères proposés dans la norme ISO 10137 sont des critères dits de « confort acceptable » pour des anglo-saxons et que, d'une manière générale, les français ont un seuil d'acceptation plus faible (plus exigeants).
Il est donc recommandé de relever les critères proposés dans l'ISO 10137.

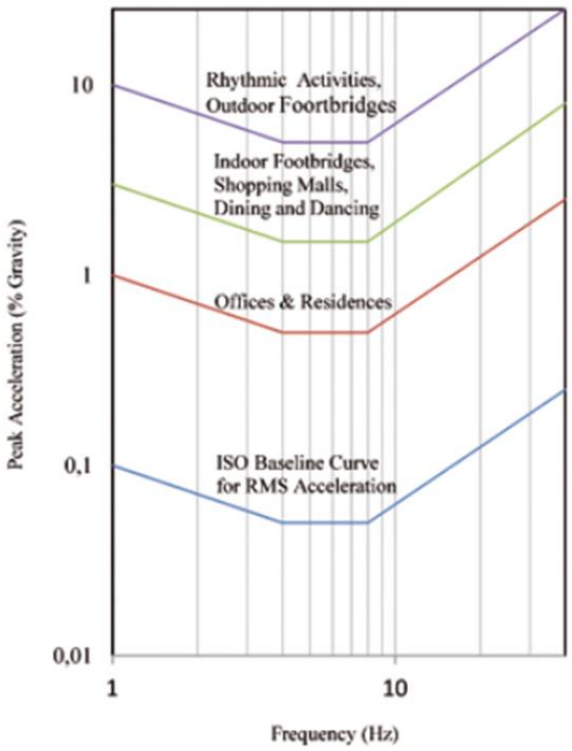

FIGURE 4 : CRITERES DE « CONFORT ACCEPTABLE » DE L'ISO 10137

Plutôt que de travailler dans l'espace Fréquence/Accélération, il est proposé de travailler plutôt dans l'espace Fréquence/Masse modale. Dans ce cas, pour une hypothèse d'amortissement donnée, la précédente figure devient par exemple :

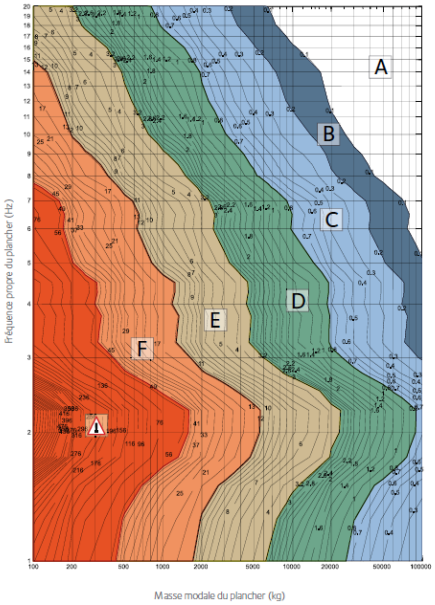

FIGURE 5 : CRITERES DANS L'ESPACE FREQUENCE/MASSE MODALE

En effet, ces deux paramètres sont beaucoup plus faciles à obtenir avec les outils de calcul dynamique linéaire (comme les calculs des modes de vibration pour une analyse sismique spectrale).

Une approche proposée est :

- Calcul des caractéristiques du plancher :
    - Hypothèse d'amortissement
    - Fréquence fondamentale
    - Masse modale
- Détermination de l'accélération maxi (si critères dans l'espace Fréquence/accélération)
- Vérification du critère de confort sur les graphes

Une hypothèse importante est le choix de l'amortissement. Bien que l'Eurocode 5 recommande (à titre conservateur) une valeur de 1%, la littérature indique plutôt des valeurs de 2 à 3%.

Enfin, l'EN 1990/NA indique les règles pour déterminer la masse surfacique du plancher à retenir pour le calcul de la fréquence propre. En plus des charges permanentes, il faut retenir une masse relative aux charges d'exploitation qui doit correspondre à 20 % des charges d'exploitation prises en compte dans la combinaison caractéristique. Lorsqu'une part des charges d'exploitation correspond à des éléments non structuraux rigidement fixés à la structure, la masse correspondante à retenir est de 100 % pour cette part et 20 % pour le reste.

3.10.6 Vérification des sous-systèmes

La section 9 de l'Eurocode 5 « Composants et sous-systèmes » n'appelle pas de commentaires particuliers dans le cas de son application aux bâtiments de grande hauteur.

Concernant la justification des diaphragmes de plancher, les règles Eurocode 5 introduisent une approche simplifiée pour la justification des planchers traditionnels en bois formant diaphragme horizontal. Cette approche simplifiée est associée à quelques exigences de mise en œuvre données dans le chapitre 10 et n'est, d'une manière générale, pas adaptée aux types de planchers que l'on est susceptible de retrouver dans les bâtiments de grande hauteur.

Il est plus probable que les planchers feront appel à des techniques du type CLT, poutres mixtes bois/béton, …

Dans ce cas, on se reportera par exemple aux ATec Ad-Hoc. À défaut, et notamment lors de la présence d'ouvertures importantes, on pourra s'appuyer sur la méthode dite de la superposition des cisaillements qui consistent à « découper » le plancher en plaques sans ouverture et à procéder au calcul des flux de cisaillement cumulés de proche en proche.

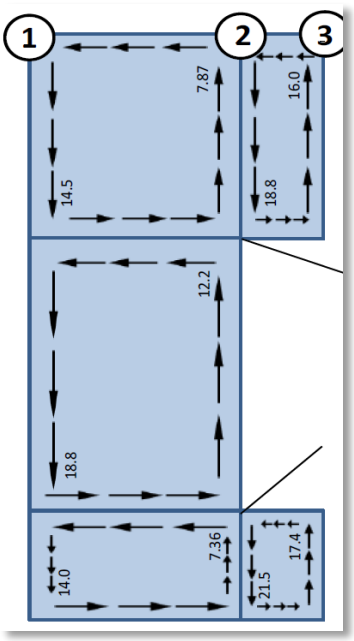

FIGURE 6 : ILLUSTRATION DE LA METHODE DE SUPERPOSITION DES CISAILLEMENTS

3.11 Situation de séisme et Eurocode 8

3.11.1 Action sismique

Concernant la détermination de l'action sismique, pour les bâtiments parfaitement réguliers, il serait tentant d'utiliser la formule forfaire pour le calcul de la période fondamentale T_1. Cependant, le coefficient C_t n'est pas calibré pour ce type d'ouvrage.

Pour une analyse statique linéaire par les forces latérales équivalentes, il est recommandé d'utiliser plutôt la méthode de Rayleigh.

Mais d'une manière générale, l'analyse spectrale sur le modèle 3D est à privilégier.

Dans les deux cas, cette analyse linéaire s'appuie sur le coefficient de comportement q pour introduire forfaitairement le comportement non linéaire de l'ouvrage. En fonction

du système constructif retenu, l'Eurocode 8 partie Bois donne des valeurs pour le coefficient de comportement à l'exception du CLT. On retrouve cette information dans certains ATec de CLT (en général q=2,5 pour le CLT).

En ce qui concerne l'amortissement, il est rappelé que si l'on utilise le spectre de réponse de calcul (coefficient q), il ne faut pas corriger le spectre en fonction de l'amortissement. Celui-ci est déjà intégré dans le coefficient de comportement.

Par contre, si une analyse non linéaire est envisagée (poussée progressive par exemple), il est recommandé de conserver le coefficient d'amortissement visqueux équivalent à 5 % pour le spectre de réponse élastique.

3.11.2 Diaphragme horizontal

Lors de l'analyse en situation de séisme, la quasi-totalité des approches s'appuie sur l'hypothèse de diaphragmes de plancher rigides pour la redistribution des efforts dans les systèmes de contreventement. Cette hypothèse peut être vérifiée selon les critères donnés dans l'Eurocode 8. À défaut, la rigidité estimée du plancher devra être introduite dans le modèle.

3.11.3 Autre information

Il a été prouvé que les critères de classes de ductilité de la partie bois de l'Eurocode 8 conduisent à une très nette sous-estimation lorsque l'on passe de l'échelle locale (Assemblage) à l'échelle globale (Ouvrage). Ceci a été largement pris en compte dans la révision en cours du chapitre bois de l'Eurocode 8. Le cas échéant (estimation de la ductilité d'assemblages par essais), il sera intéressant de se reporter à ces nouveaux éléments portés par le CEN TC250/SC8/WG3. Y figure notamment un projet de tableau de correspondance entre la classe de ductilité déterminée à l'échelle de l'assemblage et la classe de ductilité attendue de l'ouvrage, et ceci pour différents types d'assemblages.

3.12 Analyse de la structure

3.12.1 Analyse statique

L'un des avantages de l'utilisation d'une structure bois est la réduction de la masse, qui peut se traduire par la réduction du coût des fondations. Cependant, dans les zones à risque sismique élevé ou à forts vents, cette masse plus faible peut induire une résistance inférieure aux forces de renversement. Pour les bâtiments de grande hauteur, les états limites ultimes d'équilibre peuvent devenir les cas dimensionnant.

Le recours à des modèles 3D est nécessaire pour ce type d'études afin de notamment introduire les effets système et hyperstatique. Ceci nécessite en contrepartie une modélisation fine des raideurs et de la structure en général.

Pour l'analyse élastique linéaire de la structure aux ELU, il est recommandé d'utiliser une analyse du second ordre permettant, conformément à l'Eurocode 5 (§2.2.2), d'utiliser les valeurs de calcul des rigidités sans prise en compte de la durée de chargement.
À noter qu'il n'est pas nécessaire d'introduire explicitement dans le modèle des écarts de rectitude. Ces derniers sont déjà pris en compte dans les méthodes de vérification données dans l'Eurocode 5.

Dans la mesure où les valeurs caractéristiques des matériaux bois sont déterminées selon l'hypothèse d'une relation linéaire entre contrainte et déformation jusqu'à la rupture, la vérification en résistance des éléments individuels doit être également basée sur une telle relation. À défaut, l'approche « design by testing » autorisée par les règles Eurocodes peut être utilisée.

Par contre, pour les assemblages de grandes dimensions, il pourra être nécessaire de tenir compte de la redistribution des efforts dans les différents organes constituant l'assemblage en se basant sur :

- Une évaluation correcte des raideurs K_{ser} des organes en fonction de l'orientation de l'effort vis-à-vis du fil du bois
- Des méthodes élastoplastiques

De plus, avec des assemblages offrant une ductilité suffisante, des méthodes élastoplastiques peuvent être utilisées pour le calcul des efforts internes dans les éléments de structures. Le modèle servant au calcul des efforts internes dans la structure ou dans une partie de celle-ci doit prendre en compte les effets des déformations des assemblages au travers de leur rigidité.

Pour l'analyse élastique linéaire de la structure aux ELS, afin de limiter les effets de second ordre, il semble raisonnable d'imposer comme critères :

- Pour les déplacements inter-étages : h / 500 (h = hauteur du niveau)
- Pour le déplacement total en tête : H / 500 (H = hauteur totale du bâtiment)

3.12.2 Analyse dynamique

Les méthodes de calcul présupposent que les structures présentent un comportement élastique linéaire. Les propriétés dynamiques structurales se caractérisent alors par :

- Les fréquences propres
- Les déformées modales
- Les masses modales
- L'amortissement

Les propriétés dynamiques fondamentales peuvent être évaluées de manière approximative, au moyen d'équations simplifiées analytiques, semi empiriques ou empiriques. Certaines de ces caractéristiques dynamiques de structures ayant un comportement linéaire sont données dans l'annexe F de l'EN 1991-1-4.
Enfin, l'annexe nationale renvoie également à l'annexe 4 des règles NV 65 et l'annexe 2 des Recommandations CECM pour le calcul de la fréquence propre du mode fondamental, complétant celles données en annexe F.2 (1) à F.2 (7) de l'EN 1991-1-4.
On notera cependant que la totalité des tableaux donnant des valeurs de coefficient recommandées (comme par exemple le décrément logarithmique en tableau F2) ne couvre pas les bâtiments bois !
Sur la base des données d'amortissement mesurées jusqu'ici (mais en nombre très limité), il semble raisonnable d'utiliser 3 % pour l'amortissement visqueux critique pour la conception contre les effets du vent.

Comme pour les planchers, on pourra se reporter à l'EN 1990/NA concernant les règles pour déterminer la masse surfacique à retenir sur les planchers pour le calcul de la fréquence propre du bâtiment. En plus des charges permanentes, il faut retenir une masse relative aux charges d'exploitation qui doit correspondre à 20 % des charges d'exploitation prises en compte dans la combinaison caractéristique. Lorsqu'une part des charges d'exploitation correspond à des éléments non structuraux rigidement fixés à la structure, la masse correspondante à retenir est de 100 % pour cette part et 20 % pour le reste.