

**Critères d'états limites des constructions  
en matière de vibrations**

Programme d'appui scientifique à la normalisation et aux réglementations techniques

**Rapport final**

N° NM/G3/12  
NM/G2/13

Politique scientifique fédérale

**Pierre SPEHL**

**Christian MERTENS**

SECO - BUREAU DE CONTROLE TECHNIQUE POUR LA CONSTRUCTION  
Rue d'Arlon 53  
B-1040 BRUXELLES

CSTC - CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION  
Boulevard Poincaré 79  
B-1000 BRUXELLES

# TABLE DES MATIERES

**RESUME**

**SAMENVATTING**

**SUMMARY**

**1. INTRODUCTION**

**2. ETABLISSEMENT DE RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES METHODES DE MESURE ET LES CRITERES DE VIBRATION DES BATIMENTS**

- 2.1. Document d'enquête soumis aux membres du groupe de travail
- 2.2. Vues critiques de la normalisation existante
- 2.3. Réactions du groupe de travail à l'approche proposée
- 2.4. Résultats de l'enquête auprès des membres du groupe de travail
- 2.5. La traduction libre de la norme allemande DIN 4150

**3. ETABLISSEMENT DES CRITERES EN MATIERE DE GENE ET DE DEGATS, ET PARTICIPATION BELGE AU COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION**

- 3.1. Méthodologie
- 3.2. Résultats

**4. DIFFUSION ET VALORISATION**

**5. BILAN ET PERSPECTIVES**

**REMERCIEMENTS**

**REFERENCES**

**ANNEXES :**

- I. Norme belge NBN B03-003 (2002)
- II. Norme européenne EN 1990 – ANNEXE A1 (2002)
- III. Projet d'Annexe Nationale belge à l'EN 1990 (2004)

## **RESUME**

### **Critères d'états limites des constructions en matière de vibrations**

#### **Contexte**

Un grand nombre de normes générales existent en matière de vibrations. Peu toutefois sont spécifiques aux vibrations dans les bâtiments d'une part, et d'autre part, il n'y a pas d'uniformité en cette matière, ni en ce qui concerne les méthodes de mesure, ni en ce qui concerne les critères (lorsqu'ils existent) relatifs à la gêne vibratoire et à la sécurité vis-à-vis d'éventuels dommages.

#### **Le projet**

Les objectifs du projet sont les suivants :

1. L'établissement d'une recommandation de méthode de mesure des vibrations dans les bâtiments, pour la gêne des personnes et les dégâts structurels. En pratique, on constate que les deux sont souvent liés ; aussi préconisera-t-on de considérer le problème dans son ensemble.
2. L'établissement de critères de vibration dans les bâtiments pour les deux mêmes problématiques de gêne et de danger, en utilisant notamment les résultats du projet prénormatif des SSTC (devenus à ce jour la Politique scientifique fédérale) « Effets des vibrations : exigences et méthodes de détermination » (période du 1<sup>er</sup> avril 1996 au 31 mars 1999), en vue d'être proposés pour la normalisation belge et européenne.
3. L'établissement d'un projet de prénorme européenne sur les critères d'états limites de service, comprenant les critères de sécurité et de gêne vibratoire, ainsi que les critères de déformation admissible actuellement en discussion au sein de la Commission EUROCODES de l'Institut Belge de Normalisation. Le but est d'établir une proposition au niveau belge, de la présenter au CEN (Comité Européen de Normalisation) et de participer à ses travaux en vue de la faire aboutir à une norme européenne.

#### **Les partenaires**

##### Coordinateur et Promoteur N°1 :

Ir Pierre SPEHL, ingénieur principal à SECO (Bureau de contrôle technique pour la construction), Maître de conférence à l'ULB (Bruxelles) et à l'ENPC (Paris), Chef de la délégation de l'Institut Belge de Normalisation pour les Eurocodes.

Etablissement du projet de prénorme (objectif 3) et participation belge au Comité Européen de Normalisation (CEN/TC250) pour le faire aboutir.

##### Promoteur N°2 :

Ir Christian MERTENS, ingénieur au Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), Chef de projets de recherche.

Etablissement de recommandations concernant les méthodes de mesure (objectif 1) et les critères de vibration des bâtiments (objectif 2).

## Conclusions générales et apports réels de la recherche

La partie de la recherche relative aux méthodes de mesure et aux critères de vibration des bâtiments (objectifs 1 et 2), et notamment l'enquête par questionnaire menée auprès des membres du Comité d'accompagnement de la recherche (voir rapport final du CSTC), ont abouti aux conclusions suivantes :

- pour les critères de confort, la méthodologie de mesure de la norme allemande DIN 4150, Partie 2, et en particulier le facteur de base KB, y compris le principe de détection RMS avec caractéristique exponentielle, font l'unanimité ;
- toutefois, il est proposé d'étendre la norme existante en vue de caractériser plus complètement les vibrations, par une grandeur caractéristique propre à la source vibratoire, qui serait la dose vibratoire, déterminée sur le temps effectif d'action de la source ;
- il est proposé d'introduire des dispositions complémentaires en vue d'améliorer l'identification et la gestion des perturbations dans les mesures ;
- il est également proposé de ne pas décrire complètement a priori les moyens scientifiques permettant l'identification des sources et des perturbations, mais de spécifier que ces moyens doivent faire l'objet d'une description détaillée par l'expert concerné dans chacun de ses rapports de mesures ;
- pour ce qui concerne les critères de sécurité, en accord avec le Comité d'accompagnement, il est proposé d'adopter la norme allemande DIN 4150, Partie 3, et il est enfin recommandé d'effectuer, en parallèle avec les mesures dans la structure, des mesures sur les fondations pour évaluer la potentialité de dégâts aux structures.

Sur base de ces conclusions, la partie de la recherche relative à la prénorme et à la participation belge aux travaux européens de normalisation du CEN, au sein de son Comité technique CEN / TC 250 « Eurocodes structurels » (objectif 3) a abouti aux résultats suivants :

- la publication en 2002 de la norme belge NBN B 03-003, qui rend notamment d'application en Belgique (en son chapitre 8. VIBRATIONS) les normes DIN 4150-2 et DIN 4150-3, renvoie à la norme NBN B03-002 pour ce qui concerne les effets vibratoires dus au vent, et fixe des valeurs critiques des fréquences propres de vibration des structures, en-dessous desquels un calcul dynamique est requis, pour ce qui concerne les effets de mouvements synchronisés des personnes ;
- la publication et mise à l'enquête publique en 2004 d'un projet d'Annexe Nationale belge à la norme européenne EN 1990 « Eurocode - Bases de calcul des structures », Annexe A1 « Application pour les bâtiments », qui renvoie (en son article A1.4.2 Critères d'aptitude au service) à la norme belge NBN B03-003 pour ce qui concerne les bâtiments, et à la norme européenne EN 1991-1-4 pour ce qui concerne les effets vibratoires du vent.

## Mots-clés

Vibrations, bâtiments, critères, sécurité, confort, état-limite de service, recherche prénormative.

## Samenvatting

### Gebruiskriteria voor trillingen van constructies

#### Context

Er bestaat een groot aantal algemene normen over het onderwerp trillingen. Maar, langs de ene kant zijn er slechts enkele specifiek gericht op het onderwerp van trillingen in gebouwen en, langs de andere kant, is er geen uniformiteit over dit onderwerp, noch over de meetmethodes, noch over de te gebruiken criteria (als er als bestaan) voor het toegelaten trillingsniveau (dit naar comfort van personen toe) en voor de veiligheid (eventuele beschadigingen).

#### Het project

De doelstellingen van het project zijn:

1. Het op punt stellen van een aanbeveling voor een meetmethode van trillingen in gebouwen, dit voor zowel het deel comfort van de personen alsook voor het deel van schade aan de structuur. In de praktijk blijkt dat beide veelal met elkaar verbonden zijn; eveneens raadt men aan het probleem in zijn geheel te bekijken.
2. Het op punt stellen van criteria van trillingen in gebouwen voor dezelfde beide problematieken van comfort en schade, hierbij gebruik makende van de resultaten van het project tot voorontwerp van een norm, uitgevoerd door de DWTC (nu genoemd Federaal Wetenschapsbeleid) "Effecten van trillingen : eisen en bepalingsmethodes" (periode van 1 april 1996 tot 31 maart 1999), opgemaakt om voorgesteld te worden voor de Belgische en Europese normering.
3. Het op punt stellen van een project tot voorontwerp van een Europese norm over de maximale toegelaten gebruikscriteria, dit zowel voor schade als voor comfort, alsook het criterium van de maximaal toegelaten vervormingen momenteel ter discussie bij de commissie EUROCODES van het Belgisch Instituut voor Normalisatie. Het doel hiervan is op Belgisch niveau een voorstel op te maken, dit voor te stellen aan het CEN (Europese Normalisatie Comité) en medewerking te verlenen om er een Europese norm van te maken .

#### De partners

##### Coördinator en promotor nr 1 :

Ir Pierre SPEHL, eerstaanwezende ingenieur van SECO (Technisch controlebureau voor het bouwwezen), docent aan de ULB (Brussel) en ENPC (Parijs), Hoofd van de delegatie van het Belgische Instituut voor Normalisatie voor de Eurocodes.

Het op punt stellen van een project tot voorontwerp van norm (doelstelling 3) en Belgische deelname aan de Europese Normalisatie Comité (CEN/TC250) om het te laten goedkeuren.

##### Promotor nr.2 :

Ir Christian MERTENS, ingenieur aan het Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf (WTCB), hoofd onderzoeksprojecten.

Het op punt stellen van aanbevelingen voor wat betreft de meetmethodes (doelstelling 1) en voor wat betreft de criteria van trillingen in gebouwen (doelstelling 2).

## Algemene besluiten en werkelijke aanvoeren van het onderzoek

Het gedeelte van het onderzoek betreffende de meetmethodes en de criteria van trillingen in gebouwen (doelstellingen 1 en 2), en met name de enquête onder de leden van het begeleidingscomité van het onderzoek (zie eindrapport WTCB) heeft geleid tot volgende besluiten :

- voor wat betreft het comfort, de meetmethode van de Duitse norm DIN 4150, deel 2, en meer bepaald de basisfactor KB, met inbegrip van het principe van de RMS detectie met exponentiele karakteristiek, heerst er unanimité ;
- nochtans wordt er voorgesteld om de bestaande norm te verruimen, met het oog op een meer volledige karakterisering der trillingen, d.m.v. een karakteristieke grootheid eigen aan de bron van de trillingen, dit is de dosis trillingen bepaald over de effectieve tijd dat een bron actief is ;
- er wordt voorgesteld om bijkomende bepalingen te introduceren, dit om de identificatie en het beheer van storingen bij de meting te verbeteren ;
- er wordt ook voorgesteld om niet a-priori, de wetenschappelijke methodes gebruikt om bronnen en storingen te identificeren, volledig te beschrijven, maar specificeren dat deze methodes deel dienen uit te maken van een gedetailleerde beschrijving door de desbetreffende expert, en dit in elk meetrapport ;
- voor wat betreft de criteria voor veiligheid, in samenspraak met het begeleidingscomité, wordt er voorgesteld om de Duitse norm DIN 4150, deel 3, aan te nemen, en er wordt tenslotte aanbevolen om, in parallel met de meting uitgevoerd in de structuur, eveneens metingen uit te voeren op de fundering, dit om de mogelijkheid op beschadiging van de structuur te evalueren.

Op basis van deze besluiten, heeft het deel van het onderzoek, voor wat betreft het voorontwerp tot norm, en wat betreft de Belgische deelname aan de Europese Normalisatie Comité van het CEN, genomen door het technisch comité CEN/TC250 "Structurele Eurocodes" (doelstelling 3) tot volgende resultaten geleid :

- de publicatie in 2002 van de Belgische norm NBN B 03-003, die het gebruik van de normen DIN 4150-2 en DIN 4150-3 (hoofdstuk 8.TRILLINGEN hiervan) van toepassing in België maakt, die naar de norm NBN B03-002 verwijst, voor wat betreft het aspect van trillingen t.g.v. de wind, en die kritische waarden vastlegt voor de eigenfrequentie van structuren onder dewelke een dynamische berekening opgelegd wordt, voor wat betreft de effecten van gesynchroniseerde bewegingen van personen;
- de publicatie in 2004 van een ontwerp van Belgische Nationale Bijlage aan de Europese norm EN 1990 "Eurocode - Basis voor de berekening van structuren", Bijlage A1 "Toepassing op gebouwen", die verwijst (artikel A1.4.2 Gebruikscriteria hiervan) naar de Belgische norm NBN B03-003 voor wat betreft gebouwen en naar de Europese norm EN 1991-1-4 voor wat betreft het aspect van trillingseffecten tgv de wind.

## Sleutelwoorden

Trillingen, gebouwen, criteria , veiligheid, comfort, gebruiksgrenstoestanden, prenormatieve onderzoek

## SUMMARY

### Limit states criteria of constructions about vibrations

#### Context

A large amount of general standards exist in the field of vibrations. However, few are specific to vibrations of buildings, and, on the other hand, there is no uniformity in this field, neither in measurement methods, nor in criteria (when they exist) about discomfort and safety against eventual damages.

#### The project

The goals of the project are the following :

1. To establish recommendations about vibrations measurement methods in buildings, for the discomfort of people and the damages to structures. In practice, there is a link between the two ; therefore the problem will be considered as a whole.
2. To establish vibration criteria in buildings for the two same problems of discomfort and damages, by using i.a., the results of the prenormative OSTC (now called Belgian Science Policy) project "Effects of vibrations : requirements and assessment methods" (period of 1 April 1996 to 31 March 1999), in order to be proposed for Belgian and European standardization.
3. To establish a draft European standard on criteria for serviceability limit states, including the criteria for discomfort and safety against vibrations, and criteria for admissible deformations actually discussed within the EUROCODES Committee of the Belgian Standardization Institute. The goal is to establish a Belgian proposal, to present it to CEN (European Committee of Standardization) and to participate to its works in order to obtain a European standard.

#### The partners

##### Coordinator and Promotor N°1 :

Ir Pierre SPEHL, principal engineer at SECO (Bureau of technical control for the construction), Lecturer at ULB (Brussels) and ENPC (Paris), Head of delegation of the Belgian Standardization Institute for the Eurocodes.

To establish a draft standard (goal 3) and to participate to the European Standardization Committee (CEN/TC250) to convert it into a European standard.

##### Promotor N°2 :

Ir Christian MERTENS, engineer at BBRI (Belgian Building Research Institute), Head of research projects.

To establish recommendations on measurement methods (goal 1) and on criteria for vibrations of buildings (goal 2).

## General conclusions and real benefits of the research

The research part concerning de measure methods and the buildings vibration criteria (goals 1 and 2), and particularly the survey by questionnaire among the members of the users committee of the research (see BBRI final report) have come to the following conclusions :

- about de comfort criteria, the measure methodology of the German standard DIN 4150, Part 2, and particularly the basic factor KB, including the concept of RMS detection with exponential characteristic, are unanimously recognized ;
- however, it is proposed to extend the existing standard in order to characterize the vibrations more completely by a specific characteristic for the source of vibrations, which would be the vibration rate, determined over the effective time of activity of the source ;
- it is proposed to introduce additional clauses to improve the identification and the treatment of perturbations in the measurements ;
- it is also proposed not to describe completely and a priori the scientific means to be used to identify the sources and the perturbations, but to specify that these means should be described in detail by the expert concerned in each of his measurement reports ;
- as far as the safety criteria are concerned, in agreement with the users committee, it is proposed to adopt the German standard DIN 4150, Part 3, and it is recommended, in parallel with the measurements on the building structure, to perform measurements on the foundations to evaluate the potentiality of damages to the structure.

On the basis of these conclusions, the research part about the prestandard and the Belgian participation to the European standardization works within CEN Technical Committee TC 250 "Structural Eurocodes" (goal 3) has reached the following results :

- the publication in 2002 of the Belgian standard NBN B 03-003, which makes (in its chapter 8. VIBRATIONS) DIN 4150-2 and DIN 4150-3 applicable in Belgium, which sends back to the Belgian standard NBN B03-002 for the vibration effects of wind, and specifies critical values of modal vibration frequencies of structures, below which a dynamic calculation is requested, for the effects of synchronized movements of persons ;
- the publication in 2004, for public enquiry, of a project of Belgian National Annex to the European standard EN 1990 "Eurocode – Basis of structural design", Annex A1 "Application for buildings", which sends back (in its clause A1.4.2 Serviceability criteria) to the Belgian standard NBN B03-003 as far as the buildings are concerned, and to the European standard EN 1991-1-4 as far as the vibration effects of wind are concerned.

## Key-words

Vibrations, buildings, criteria, safety, comfort, serviceability limit states, prenormative research.

## 1. INTRODUCTION

En l'absence de norme belge en matière de méthodes de mesure et de critères de vibration dans les constructions, ni pour les risques de gêne des personnes, ni pour les risques de dégâts aux ouvrages, les nombreux cas pratiques n'étaient pas traités de la même manière selon les organismes qui en étaient chargés.

La première recherche de la Politique scientifique fédérale réalisée par le CSTC et SECO en 1996-1999 sur le sujet en avait conclu, en plein accord avec le Comité d'accompagnement, à la nécessité d'établir des recommandations prénormatives en la matière, et de mener une action efficace au niveau de l'Institut Belge de Normalisation (IBN) et du Comité Européen de Normalisation (CEN), en vue de les inclure dans le système de norme du domaine de la construction.

Le présent rapport donne le détail des aspects techniques de la question. Il comporte :

- un examen critique de la normalisation existante relative à la gêne due aux vibrations
- un premier document prénormatif en la matière
- une présentation des actions menées dans les cadres belge et européen pour la transposition des résultats dans les normes en vigueur

## **2. ETABLISSEMENT DE RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES METHODES DE MESURE ET LES CRITERES DE VIBRATION DES BATIMENTS**

### **2.1. Document d'enquête soumis aux membres du groupe de travail**

On donne ci-après une copie dans les deux langues du document d'enquête qui a été soumis aux membres du groupe de travail « Vibrations dans les constructions ».

Le but de ce document d'enquête est d'arriver dans le cadre du projet de recherche à **un consensus des membres du Groupe de Travail**, en vue de l'adoption future d'une méthodologie uniformisée au niveau national de l'évaluation des vibrations dans les bâtiments.

Il est en effet ressorti qu'en l'absence de norme belge sur le sujet, les différents organismes et institutions actifs dans la pratique des mesures de vibrations dans les bâtiments utilisent l'une ou l'autre norme internationale de référence, sans qu'il n'y ait uniformité quant à ce choix ou à tout le moins concertation avec d'autres praticiens de mesure.

L'uniformisation recherchée doit porter sur deux aspects :

- d'une part la méthode de mesure et tous les paramètres intervenants,
- d'autre part la méthode d'interprétation des résultats de mesure et l'adoption de critères limites jugés admissibles.

#### **2.1.1. Thèmes abordés en matière de méthode de mesure**

Nous ne rappelons pas les paramètres associés à la méthode de mesure de vibrations dans les constructions. Ils ont fait l'objet d'un rapport intermédiaire de recherche :

#### **Critères d'états limites des constructions en matière de vibrations.**

CONTRAT DE RECHERCHE N° NM/G2/13  
Période : du 1<sup>er</sup> janvier 2000 au 31 décembre 20

#### **ACTIONS MENEES PENDANT LA PREMIERE PERIODE DE 12 MOIS**

**CONCEPTION ET REALISATION PRATIQUE D'UN ENSEMBLE  
DE SYSTEMES ELECTRONIQUES DE MESURES  
DES VIBRATIONS DANS LES BATIMENTS CONFORMES  
A LA NORMALISATION RECENTE ISO 2631**

**CAS PRATIQUES SUR SITE**

**EVOLUTION DE LA NORMALISATION EN MATIERE DE GENE  
DUE AUX VIBRATIONS**

**VUES CRITIQUES DE LA NORMALISATION EXISTANTE :  
PREMIERS HISTOGRAMMES DE VIBRATION**

## 2.1.2. Thèmes abordés en matière de critères

### 2.1.2.1. Le danger d'apparition de dégâts structurels

La seule norme abordant le sujet et donnant clairement des critères est la norme DIN 4150. En effet la normalisation ISO 4866 (édition de 1990) ne donne que des classes de risques selon la nature de la structure, la nature des fondations et du sol.

### 2.1.2.2. La gêne due aux vibrations

En matière de vibrations dans les constructions, la pratique des cas rencontrés révèle une majorité de problèmes liés à des vibrations de faibles amplitudes et présentant un caractère permanent (quoiqu'éventuellement intermittent), comme essentiellement les vibrations générées par les différents trafics (routier, ferroviaire, tram, métro, TGV, ...).

Par voie de conséquence et eu égard précisément à ce caractère permanent et aux faibles amplitudes de vibrations, le thème le plus important en pratique est la gêne occasionnée par les vibrations aux personnes occupant les bâtiments ; aussi est-ce sur cette problématique que l'on se focalise dans ce qui suit.

### 2.1.3. Le document d'enquête

**Comité d'accompagnement du projet de recherche SSTC :**

**Critères d'état limite des constructions en matière de vibration.**

**Document d'enquête soumis aux Membres du Comité en date de janvier 2003 en vue de l'établissement d'un projet de norme belge en matière de vibration dans les constructions.**

#### **Avertissement**

**Le texte de référence le plus uniformément accepté par les membres du Comité est la norme DIN 4150 dans sa version de février 1999.**

**Le but de l'enquête est de faire réagir les Membres du Comité qui, en fonction de leur expérience et des cas d'études qu'ils ont été appelés à traiter, peuvent apporter des critiques de la norme de référence et proposer que l'on en rejette ou que l'on en accepte différents éléments propres soit à la méthode de mesure soit aux critères.**

① en ce qui concerne différents aspects de méthode de mesure : l'obtention d'un paramètre de base		
	oui	non
grandeur mesurée : la vitesse		
filtre physiologique amenant au KB		

② en ce qui concerne différents aspects de méthode de mesure : l'obtention d'un paramètre de base		
	oui	non
détection de valeur efficace avec constante de temps de 125 msec (exponentielle glissante)		
OU		
valeur efficace vraie (sur quel temps d'intégration ??)		
attention : choix exclusif (l'un ou l'autre)		

③ en ce qui concerne l'obtention d'un paramètre macroscopique		
	oui	non
retenue exclusive des maxima par période de 30 secondes		
OU		
évolution de la valeur efficace réelle		

④ en ce qui concerne le choix des points de mesure		
	oui	non
points de mesures laissés au choix des occupants		
OU		
points de mesure définis par la norme		
OU		
points de mesure « conseillés » par l'expert		
mesures à chaque fois en fondation pour le risque de dégâts		

⑤ en ce qui concerne l'implication plus sociale de la mesure		
	oui	non
capacité dans la procédure de mesure de rejeter des événements non significatifs ou perturbateurs		
capacité à caractériser une situation		
OU		
capacité à caractériser une source particulière		
OU		
les deux possibilités		

⑥ en cas de caractérisation d'une source		
	oui	non
vibration équivalente déterminée sur la période d'action réelle		
OU		

vibration sur 16 heures jours et sur huit heures nuit indépendamment de la durée réelle de fonctionnement de la source (en ce cas il faut convenir de critères)		
--	--	--

⑦ en ce qui concerne les critères de sécurité		
	oui	non
adoption des critères tels quels de la normalisation allemande DIN 4150 Teil 3  OU  modification de ces critères		

⑧ en ce qui concerne les critères de confort		
	oui	non
maintien des différents critères $A_u$ , $A_o$ et $A_r$  OU  critère unique du type $A_r$ (niveau équivalent)		

⑨ Identification du Membre du Comité		
nom, prénom	Fonction	Institution
La présente note constitue l'avis du Membre du Comité d'accompagnement relatif à une série de points de discussion qui concernent la méthodologie d'interprétation des vibrations dans les constructions. Elle à pour but de servir de guide à l'établissement d'un document prénormatif belge sur le sujet.		
Signature		
BRUXELLES, le 21 janvier 2003.		

### **Begeleidingscomité van het researchproject van het WTCB:**

#### **Criteria van de grenstoestand van gebouwen inzake trillingen**

**Enquêtedocument dat in januari 2003 aan de leden van het Comité wordt voorgelegd met het oog op de opstelling van een ontwerp van Belgische norm inzake trillingen in gebouwen.**

#### **Voorbericht**

**De referentietekst die door de leden van het Comité werd aangenomen, is de Duitse norm DIN 4150, versie februari 1999.**

**Deze enquête heeft tot doel reacties van de leden van het Comité in te zamelen, die volgens hun ervaring en de gevalstudies die ze zullen moeten behandelen, hun kritiek kunnen geven omtrent de referentienorm en kunnen voorstellen of de verschillende elementen van de norm met betrekking tot de meetmethode of de criteria kunnen behouden blijven of moeten worden verworpen.**

⑦ Wat betreft de criteria inzake veiligheid		
	ja	neen
aanvaarding van criteria zoals die van de Duitse norm DIN 4150 Teil 3		
OF		
aanpassing van die criteria		

⑧ Wat betreft de criteria inzake comfort		
	ja	neen
behoud van de verschillende criteria $A_u$ , $A_o$ en $A_r$		
OF		
uniek criterium van het type $A_r$ (equivalent niveau)		

⑨ Identificatie van de leden van het Comité		
Naam en voornaam	Functie	Instelling
Deze nota geeft het advies weer van het lid van het Begeleidingscomité inzake een reeks discussiepunten met betrekking tot de methodiek voor de interpretatie van trillingen in gebouwen. Ze moet als gids dienen voor de opstelling van een ontwerp van Belgische norm terzake.		
Handtekening		
BRUSSEL, 21 januari 2003.		

## **2.2. Vues critiques de la normalisation existante**

Dans la problématique de la gêne due aux vibrations dans les bâtiments, on se réfère essentiellement à la norme ISO 2631 (dernière version en cours d'approbation : début de vote 20 janvier 2000 et fin de vote 20 juin 2000) et à la norme DIN 4150 dont la dernière version date de Juin 1999.

Pour rappel le présent projet prévoyait diverses campagnes de mesures de vibrations en laboratoire et sur le site en vue d'établir la corrélation entre les paramètres que l'on retrouve dans la normalisation internationale existante, principalement la norme ISO 2631 et la norme allemande DIN 4150, les autres normes s'inspirant fortement de l'une des deux précitées.

Les paramètres ciblés sont dans une première phase **les paramètres de base** à savoir l'accélération pondérée  $a_w(t)$  selon ISO 2631 et le facteur  $KB(t)$  selon DIN 4150.

Dans une seconde phase on abordera la problématique plus ardue **des paramètres de dose vibratoire** à savoir la "vibration dose value" (VDV) selon ISO et le paramètre  $KB_{FT}$  selon la DIN.

Le rapport après un an de recherche a donné les résultats des premières expériences sur le site. Cela a permis de montrer l'implémentation des paramètres de base avec les implications pratiques, ainsi que des procédures de tests et d'étalonnages. Nous ne revenons donc plus sur ces points.

Au cours de la seconde année de recherche, les expériences pratiques menées sur site et l'exploitation des expériences précédentes ont permis d'établir des points critiques de la normalisation existante qui ont été soumis au groupe de travail qui suit le projet de recherche.

Si l'on se réfère au but essentiel du projet tel qu'il a été introduit, cette action est le point clé : sur base d'expériences sur le site, il s'agissait d'appliquer par des expériences pratiques les normes existantes, les comparer entre elles, valider éventuellement ou invalider certains aspects de l'une et de l'autre, tant pour le volet « méthodologie de mesure » que pour le volet « critères des vibrations », et finalement donner les perspectives pour une approche normative belge en établissant un document prénormatif scientifiquement justifié et à soumettre au groupe de travail suiveur du projet.

Nous verrons bien par la suite l'interaction entre « méthodologie » et « critères » : il est en effet évident que si l'on opte pour des aspects méthodologiques différents de ceux existants, il faut adapter en conséquence les critères.

La norme DIN 4150 est la plus compétente car elle donne une méthodologie et les critères associés. Aussi nous nous focaliserons sur cette norme en gardant à l'esprit l'approche ISO, qui peut être qualifiée de complémentaire.

**Le présent rapport développe en détails les points critiques et donne sur cette base des choix scientifiquement justifiés pour l'établissement du document prénormatif belge en matière de gêne vibratoire dans les bâtiments.**

## 2.2.1. Le concept de dose

### 2.2.1.1. Etat de la question

Dans le domaine de l'évaluation de la gêne, la pratique des mesures de bruit et de vibrations renseigne directement qu'une mesure ponctuelle dans le temps n'a que très peu de signification.

Avant l'apparition du concept de dose dans les deux domaines, il était possible de mesurer très ponctuellement le niveau de bruit ou les vibrations et cela pouvait mener à une insatisfaction totale de plaignants, car la représentativité de la mesure était mise à juste titre en doute.

En effet l'observation d'un graphique de bruit ou de vibration sur une période de 24 heures par exemple détruit tout espoir de gérer un problème de gêne par une mesure de courte durée.

La gestion que l'on peut faire au cas par cas de plaintes de personnes n'est pas le propos ici. Notamment en pratique les personnes auront toujours la réaction de dire que les mesures ne sont pas représentatives et ce pour toutes sortes de raisons.

Indépendamment de ces aspects plus sociologiques, il est clair qu'une approche scientifique est la seule valide et là on ne peut que confirmer qu'il n'est pas possible de prétendre gérer correctement une problématique de gêne par la seule observation des vibrations pendant une période courte.

Les moyens électroniques d'acquisition ont donné des nouvelles possibilités.

En matière de vibrations, il a fallu attendre décembre 1992 avant de voir apparaître dans la norme DIN 4150 une approche en terme de dose ou de « moyenne » temporelle de ces vibrations.

Si on veut établir un parallèle avec l'acoustique le concept de niveau équivalent qui constitue également la moyenne du niveau sonore sur une période donnée existe depuis 1970.

En ce qui concerne l'interprétation finale de conformité la norme DIN propose les étapes suivantes : trois seuils sont donnés :  $A_u$ ,  $A_o$ ,  $A_r$  en fonction du jour et de la nuit et de la nature de la zone.

Par exemple pour le cas important d'un site rural et pour la période de jour, on a  $A_u = 0.15$ ,  $A_o = 3$  et  $A_r = 0.07$ .

L'interprétation des résultats de mesure est simple :

- ① si l'amplitude du paramètre de base sur l'ensemble de la période n'a pas dépassé la première valeur  $A_u$ , on conclut directement au respect de la norme ;
- ② si l'amplitude sur l'ensemble de la période a dépassé la valeur  $A_o$ , on conclut directement au non-respect de la norme ;
- ③ si sur l'ensemble de la période l'amplitude est restée comprise entre  $A_u$  et  $A_o$ , il faut évaluer la vibration moyenne sur l'ensemble des périodes de 30 secondes (valeur moyenne au sens énergétique) ; cette valeur moyenne doit être comparée au troisième seuil et on conclut au respect ou au non-respect de la norme selon le résultat de cette comparaison.

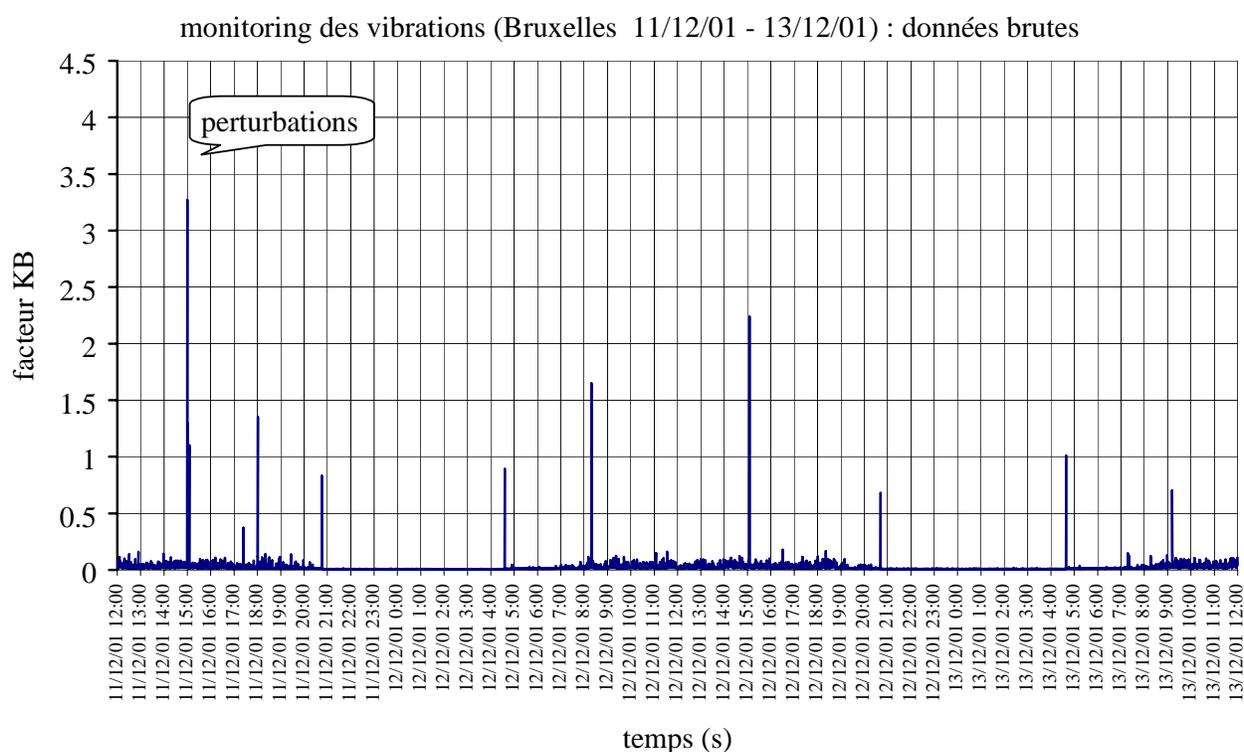
### 2.2.1.2. Proposition soumise à l'approbation du groupe de travail dans le cadre de ce projet

Le graphique qui suit donne un exemple de mesures réelles sur site. Il s'agit de mesures réalisées dans un immeuble de bureaux en site urbain et les vibrations sont celles du trafic routier. Ce monitoring couvre quarante-huit heures.

On voit apparaître quelques événements de fortes amplitudes.

Ces événements présentent un caractère exceptionnel, parce que leur amplitude est très forte comparée à l'ensemble du monitoring.

Ils se greffent sur une réalité de vibrations que l'on peut qualifier de plus « normale » ou d'attendue par rapport à la nature de la source.



Aussi ces événements sont qualifiés de perturbations, parce qu'ils ne présentent pas un caractère « naturel » par rapport à la nature de la source qui dans ce cas-ci est le trafic.

On soupçonne sans trop de fondement scientifique que ces événements ne sont pas à mettre sur le compte de la source de vibration que l'on veut caractériser.

Le concept « perturbations » pourrait signifier qu'il ne s'agit plus de réalité de vibration, mais plutôt d'influence temporaire du type électromagnétique sur l'électronique de mesure ; cela est possible.

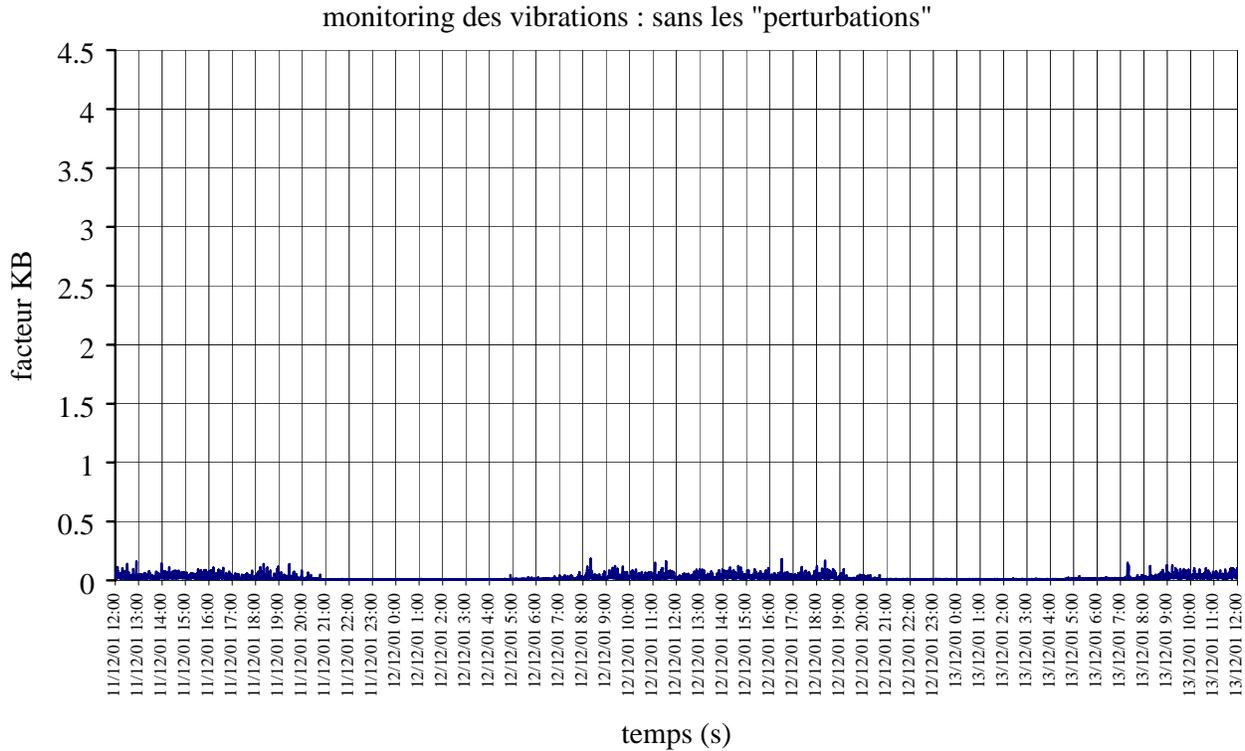
Mais il peut s'agir également d'une « perturbation » réellement vibratoire, par exemple la marche d'utilisateurs du bâtiment trop près des capteurs, le service d'entretien des bureaux qui malencontreusement vient en contact avec le capteur,...

On ne peut qu'« imaginer » plusieurs causes, sans qu'il n'y ait de fondement scientifique : il aurait fallu être présent, mais lors de mesure de monitoring, cela n'est pas réaliste. Imposer aux usagers des règles minimales est possible, par exemple de ne pas marcher à proximité des capteurs pendant le temps du monitoring.

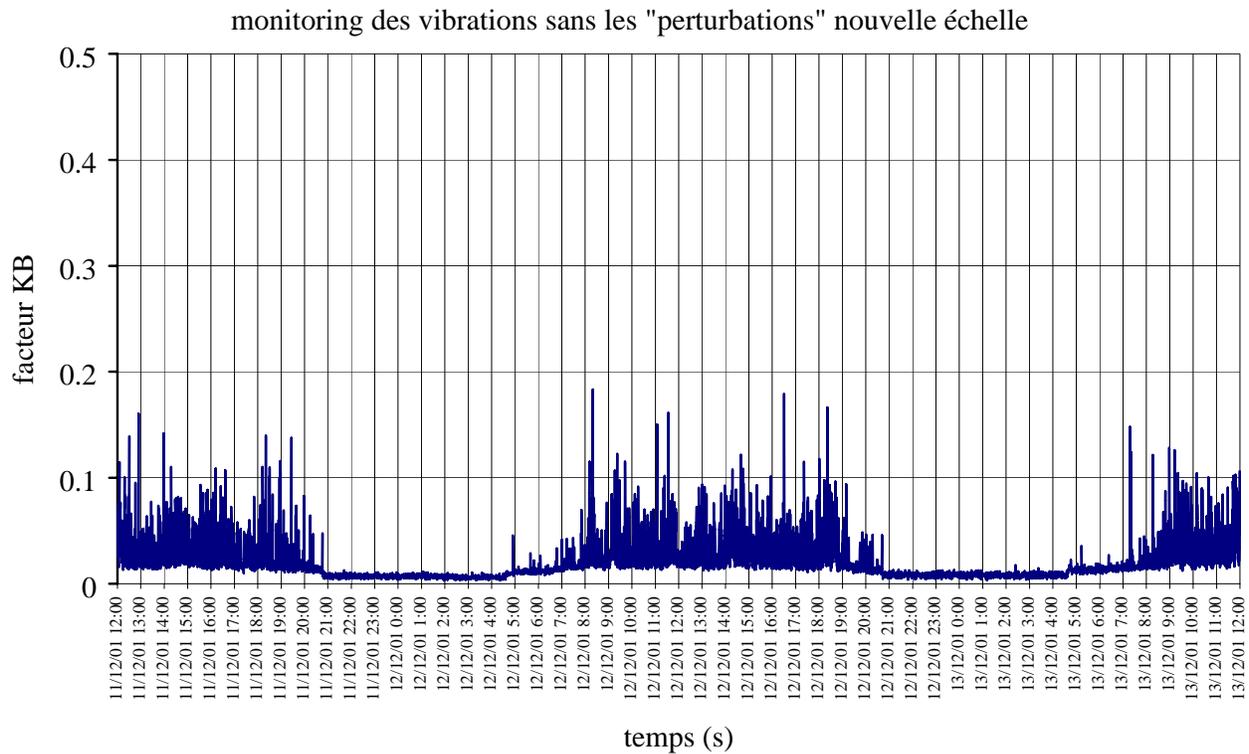
Dans certains cas pratiques on peut disposer d'un outil plus scientifique qui permet de décider qu'il s'agit d'un événement non corrélé à la source que l'on veut caractériser : si l'on dispose de plusieurs capteurs dans un même bâtiment et que la source est externe au bâtiment (par exemple le trafic), on peut décider qu'il y a une perturbation lorsqu'un seul capteur présente une amplitude forte sans qu'au même moment il n'y ait accroissement d'amplitude sur les autres capteurs.

C'est par exemple le cas fréquent de mesure dans les habitations privées : selon les moments de la journée et les occupations des locaux il peut y avoir des maxima de vibrations non corrélés entre eux provenant par exemple de la marche des personnes.

Lorsqu'on supprime **ce que l'on a estimé être une perturbation** et que l'on rétablit une échelle plus pertinente par rapport aux vibrations du trafic, on obtient successivement les deux graphiques qui suivent.



Dans ce cas une dizaine de perturbations ont été extraites de l'enregistrement original avec comme critère unique d'élimination l'amplitude « anormalement » élevée. Attention nous insistons ici sur le fait qu'il s'agit toujours du même cas pratique.



Même si cette action n'est pas scientifique et relève du libre arbitre, on est obligé de considérer que ce dernier graphique présente l'allure à laquelle on pouvait raisonnablement s'attendre par rapport à une source telle que le trafic et que de ce nouveau graphique ressortent des informations qui n'apparaissaient pas initialement :

- ① on identifie beaucoup mieux les périodes de jour et de nuit ;
- ② un niveau permanent de vibration est toujours dépassé pendant la période de 4H30 du matin à 20H30 du soir ;
- ③ il est possible de compter les véhicules générant une amplitude qui dépasse le seuil de perception de  $KB=0.1$ .

L'étape ② dans le processus d'interprétation de la norme se fonde sur la ou les valeurs maximales relevées et peut être déterminante quant à la conclusion.

Exprimé autrement, il peut arriver que l'on conclut au non-respect de la norme uniquement parce qu'un événement très ponctuel a dépassé une valeur prescrite par la norme.

Sur base de l'ensemble du développement précédent, nous proposons de ne pas adopter l'étape ② dans le processus d'interprétation des vibrations et de recourir automatiquement à l'évaluation de la dose, sauf si l'étape ① est respectée.

Pour rappel, l'étape ① consiste à conclure que la norme est automatiquement respectée si une certaine amplitude n'est jamais dépassée et cela nous semble tout à fait acceptable.

## 2.2.2. Les valeurs maximales par périodes de 30 sec

### 2.2.2.1. Etat de la question

Cette approche normalisée selon la norme DIN 4150 consiste à remplacer l'évolution temporelle complète du paramètre de base en un ensemble de plateaux (« takt ») représentant la valeur maximale par période de 30 secondes.

Le paramètre de base est, rappelons-le, la valeur efficace avec une constante de temps de 125 msec de la vitesse pondérée.

En considérant un échantillonnage valide pour ce paramètre de base, on en arrive à 8 échantillons par secondes.

En considérant l'approche proposée par la norme DIN, on remplace la totalité d'un extrait de mesure de vibrations sur une période de 30 secondes par une valeur unique qui est la valeur maximale encourue sur cette période de 30 secondes.

On peut donc considérer que pour une telle période 240 données représentant l'évolution du paramètre de base sont remplacées par une seule donnée. Cette réduction de données présente donc un rapport de 1 à 240.

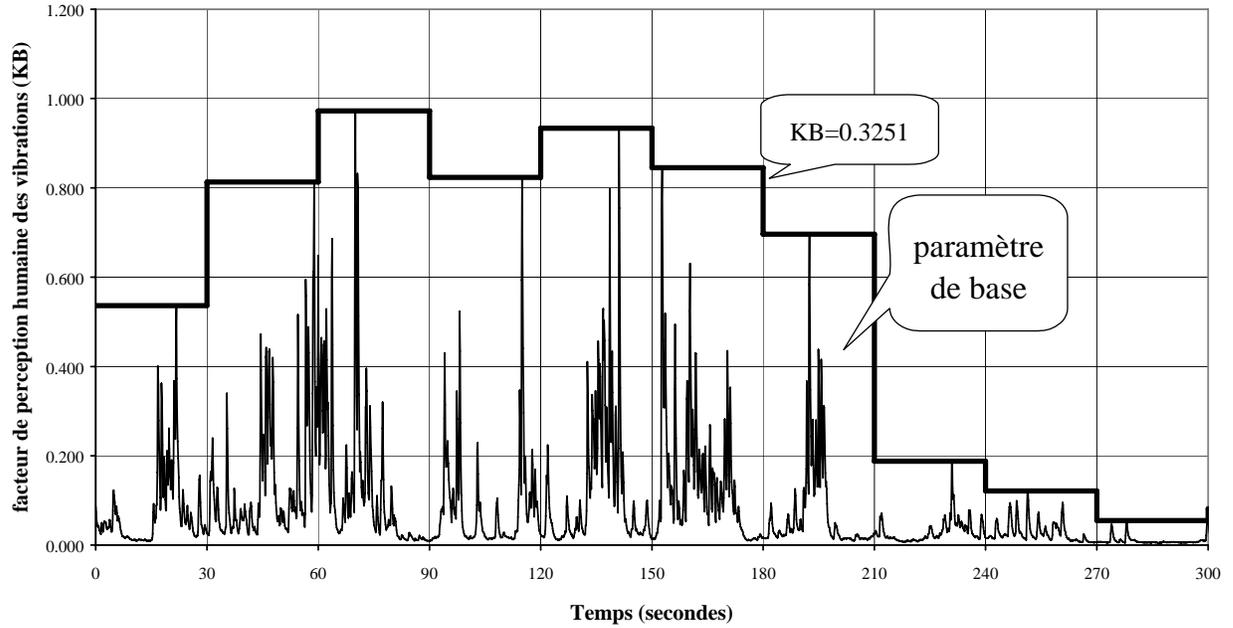
Pour l'exemple graphique qui suit (extrait concret de mesure sur site pendant 300 secondes, soient 5 minutes), il y a 2400 données pour le paramètre de base.

Après le processus de réduction proposé par la norme DIN, il reste pour cette même période totale seulement 10 données correspondant aux 10 plateaux.

Il y a forcément perte d'information lorsque l'on remplace une évolution temporelle détaillée d'une vibration par une valeur unique, même si cette dernière est la valeur maximale.

Nous allons tenter de montrer par un exemple que cette approche peut s'avérer inadéquate, ou amener à une même interprétation de la norme pour deux situations cependant différentes.

**VIBRATIONS DE TRAFIC : EXEMPLE DE MONITORING SUR UNE PERIODE DE 300 SECONDES  
DETERMINATION DES VALEURS "TAKT" SELON LA NORME DIN 4150**



En effet, cette approche met sur un pied d'égalité deux périodes de 30 secondes donnant lieu au même maximum de vibration mais pour lesquelles, pendant la période, se produisent des événements contrastés. On en donne un exemple ci-après.

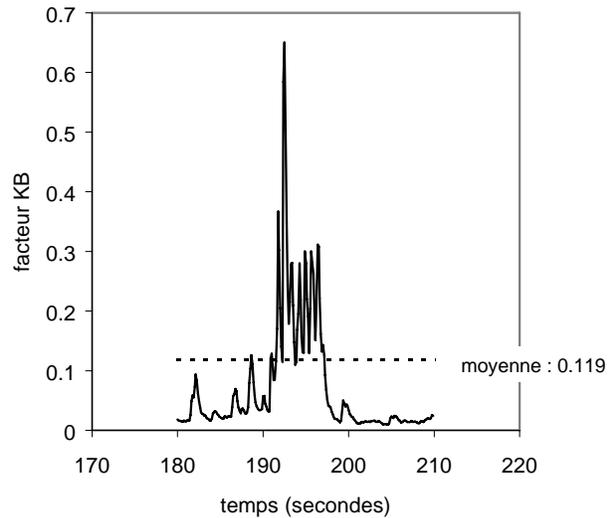
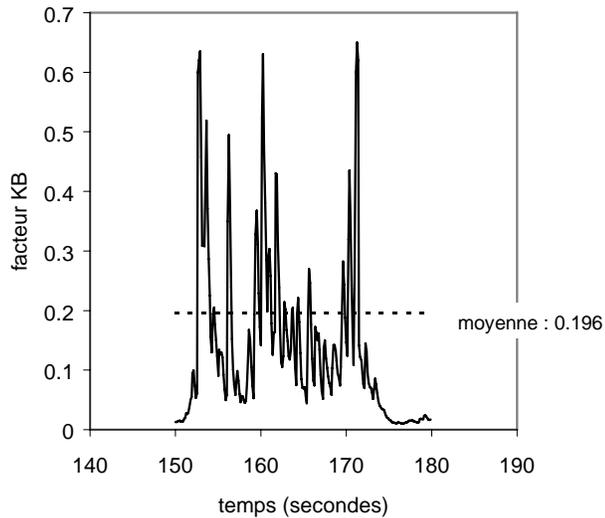
**Deux périodes de 30 secondes avec même maximum de vibration**

Donc même conclusion selon la norme DIN

mais néanmoins contraste entre les deux réalités vibratoires

Situation ①

Situation ②



Malgré une différence physique en terme d'énergie vibratoire dans un rapport de 1 à 1.65 entre les deux périodes, la norme DIN donnerait un même chiffre final d'interprétation à savoir dans ce cas  $KB TAKT = 0.64$  pour les deux situations.

Si l'on chiffrait la « vibration dose value » (VDV selon la norme ISO 2631) associée à chacune des deux périodes le contraste serait marqué, car c'est en terme de puissance 4 que procède ce calcul.

Ce processus des « TAKTMAXIMALWERTE » a dû être proposé par la normalisation allemande à une époque où les moyens électroniques et informatiques d'acquisition de données et de stockage n'étaient pas ceux que l'on connaît au jour d'aujourd'hui.

Trente secondes représentent une période au rythme de laquelle raisonnablement une personne peut suivre une réalité vibratoire, activer sur l'instrument de mesure le système de retenue de valeur maximale, le laisser actif 30 secondes, noter la valeur maximale encourue, rafraîchir le système électronique pour une nouvelle période.

En outre le nombre de données à traiter reste limité : on a établi ci-avant que le rapport de réduction de données est de 1 à 240.

On peut conclure qu'il n'y a donc pas de fondement scientifique à cette approche réductrice de la norme.

Par contre ce qui se situe en aval de l'approche, à savoir que l'interprétation finale se fera sur la moyenne énergétique des valeurs maximales, est conforme en terme de dose énergétique vibratoire pour l'être humain.

#### 2.2.2.2. Proposition soumise à l'approbation du groupe de travail dans ce cadre de ce projet

A notre sens, il est réaliste d'en revenir à la mesure physique de base et à partir de là évaluer la moyenne quadratique pour chiffrer la dose, sans passer par les valeurs maximales toutes les trente secondes, approche que l'on vient d'invalider ci-avant.

Cela ne va toutefois pas être sans conséquences sur l'établissement des critères de vibration. En effet la norme allemande a établi ses critères pour la moyenne quadratique des valeurs maximales toutes les trente secondes.

Cette moyenne ne peut être que supérieure à la moyenne établie à partir des vibrations réelles mesurées sans utiliser le processus de réduction de données, puisque ce processus de réduction est une enveloppe entourant les valeurs maximales des vibrations (voir exemple ci-avant).

La moyenne quadratique des vibrations pendant une période de 30 secondes ne peut être qu'inférieure à la valeur maximale de la valeur efficace ; il y a tout au plus égalité si l'on a affaire à des vibrations à caractère parfaitement stationnaire (cas rare en pratique).

A titre d'exemple, le tableau ci-après donne les résultats numériques correspondant à l'enregistrement précédent des vibrations.

Méthode	Situation ①	Situation ②	Commentaire
Interprétation TAKT selon DIN 4150	KB = 0.64	KB = 0.64	Pas de différenciation
Interprétation à partir du paramètre de base	KB = 0.196	KB = 0.119	Différenciation possible

Si l'on caractérise les vibrations de trafic, ce qui est un cas fréquent de gêne en pratique, on doit s'attendre à ce que les événements se succèdent plus rapidement que 30 secondes ; donc on peut très bien avoir en pratique plusieurs événements dans une même période de trente secondes.

D'ailleurs l'exemple ci-avant est un cas réel de vibrations de trafic, duquel on a extrait les deux périodes contrastées.

On pourrait définir « **un facteur de crête macroscopique** », comme le rapport entre la vibration maximale sur une période de 30 secondes et la vibration efficace encourue sur la même période. Dans l'exemple précédent, cela donnerait 3.26 pour la situation 1 et 5.38 pour la situation 2.

Facteur de crête habituel	Facteur de crête macroscopique
Durée variable et à spécifier mais en tout cas typiquement courte	Durée longue (30 secondes)
Rapport entre une valeur crête (« peak ») et une valeur efficace	Vision plus « macroscopique » Rapport entre deux valeurs efficaces ; l'une étant un maximum de valeur efficace (« takt ») et l'autre une moyenne efficace de valeurs efficaces (analyse préconisée du paramètre de base)

Ces valeurs de facteurs de crête peuvent être qualifiées d'élevées.

Attention, ce facteur de crête comme défini ci-avant est différent du facteur de crête au sens habituel : le tableau différencie les deux définitions :

On ne peut chiffrer à priori et pour toute nature de source « le facteur de crête macroscopique » comme défini ci-avant.

Il n'est d'ailleurs pas attribuable uniquement à la source. En effet un plancher résonant avec faibles pertes internes sollicité par les vibrations de trafic donnera des événements vibratoires présentant une durée plus longue, qu'un plancher qui serait mécaniquement amorti (même si la totalité de l'événement reste dans le fenêtre des trente secondes et indépendamment de celle-ci).

Encore dans ce cas, le calcul de la vibration moyenne sur le paramètre de base permet la différenciation, alors que sur les « takt » la différenciation n'est pas possible. Or il est clair qu'il faille différencier ces deux situations, car elles sont différentes pour la perception subjective des vibrations.

Le facteur de crête comme défini, même si l'on pouvait l'associer à une source particulière, ne serait quand même pas non plus constant au cours du temps.

Par exemple en matière de vibrations de trafic il faut s'attendre :

→ à le voir diminuer lorsqu'on considère les heures de pointes, c'est-à-dire les moments pendant lesquels on doit s'attendre à des suites ininterrompues d'événements de vibration (forte densité de trafic, passages fréquents de véhicules) ;

→ et à le voir augmenter pendant les heures plus creuses de trafic, où l'on doit s'attendre à plus d'événements isolés dans le temps (densité moindre, passage moins fréquents).

En cas de sources stationnaires de vibrations, ce facteur de crête tend vers l'unité. La pratique enseigne que les vibrations stationnaires n'existent pas ou sont très rares. Seuls quelques cas d'ouvriers au poste de leur machine ressentent des vibrations stationnaires ou quasi stationnaires. Dans les logements les vibrations proviennent principalement de sources à caractère variable dans le temps, avec variation à la fois macro- et microscopique.

*Résumé de notre proposition pour ce point :*

1. *Suppression des valeurs maximales toutes les 30 secondes.*
2. *Adaptation des valeurs des critères proposés par la norme DIN pour la dose (critères  $A_r$ ), en les réduisant par application d'un facteur de crête encore à déterminer (les critères  $A_v$  sont maintenus).*

*Avantages*

1. *Si l'on opte pour cette méthode d'évaluation et que l'on décide même par la suite d'effectuer une interprétation selon la norme DIN, cette dernière reste parfaitement possible.*
2. *On garde toute l'expérience et la qualité de l'approche cohérente de la norme DIN ; on ne fait qu'en supprimer ses points faibles ou contestables.*

### 2.2.3. Les critères de vibration : quels paramètres sont influents ?

#### 2.2.3.1. Approche de la norme allemande

Dans le paragraphe qui suit on rappelle les critères de la norme allemande et on établit des propositions de valeurs à adopter pour la normalisation belge.

Les critères de la norme allemande sont repris dans le tableau ci-après.

CLASSE	ZONE	JOUR			NUIT		
		$A_u$	$A_o$	$A_r$	$A_u$	$A_o$	$A_r$
1	Zone exclusivement industrielle	0.40	6	0.20	0.30	0.60	0.15
2	Zone principalement industrielle	0.30	6	0.15	0.20	0.40	0.10
3	Zone mixte	0.20	5	0.10	0.15	0.30	0.07
4	Zone d'habitats	0.15	3	0.07	0.10	0.20	0.05
5	Zone protégée	0.10	3	0.05	0.10	0.15	0.05

*Tableau : Valeurs limites selon la norme DIN 4150 partie 2*

#### 2.2.3.2. Propositions pour la normalisation belge

Nous pensons que rendre compliquée une norme n'est pas une bonne stratégie. Aussi allez dans le sens d'une simplification, si cela se justifie, est toujours préférable.

##### 2.2.3.2.a. *Suppression du critère $A_o$*

Comme première étape et conformément au paragraphe 2.2.1.b., on se propose de reprendre au départ comme tels les critères de la norme allemande DIN 4150 en supprimant le critère  $A_o$ . Cela amène au tableau suivant :

CLASSE	ZONE	JOUR		NUIT	
		$A_u$	$A_r$	$A_u$	$A_r$
1	Zone exclusivement industrielle	0.40	0.20	0.30	0.15
2	Zone principalement industrielle	0.30	0.15	0.20	0.10
3	Zone mixte	0.20	0.10	0.15	0.07
4	Zone d'habitats	0.15	0.07	0.10	0.05
5	Zone protégée	0.10	0.05	0.10	0.05

*Tableau : adaptation et première proposition pour la normalisation belge.*

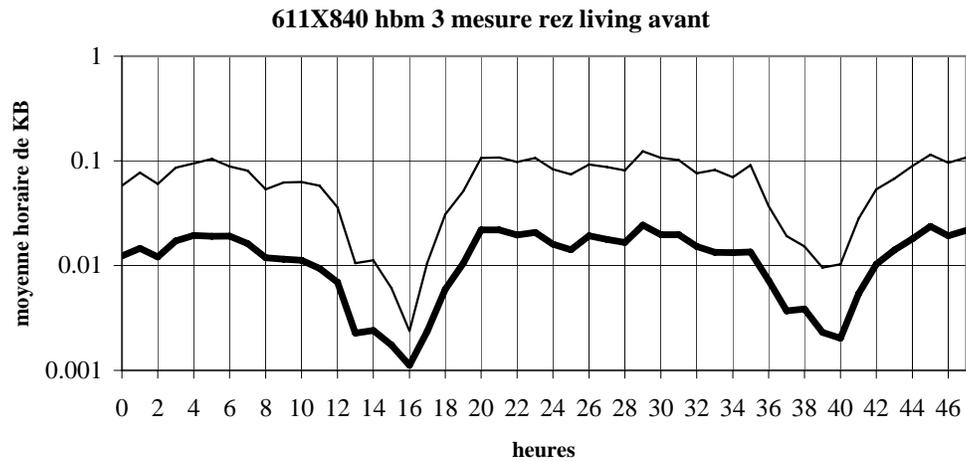
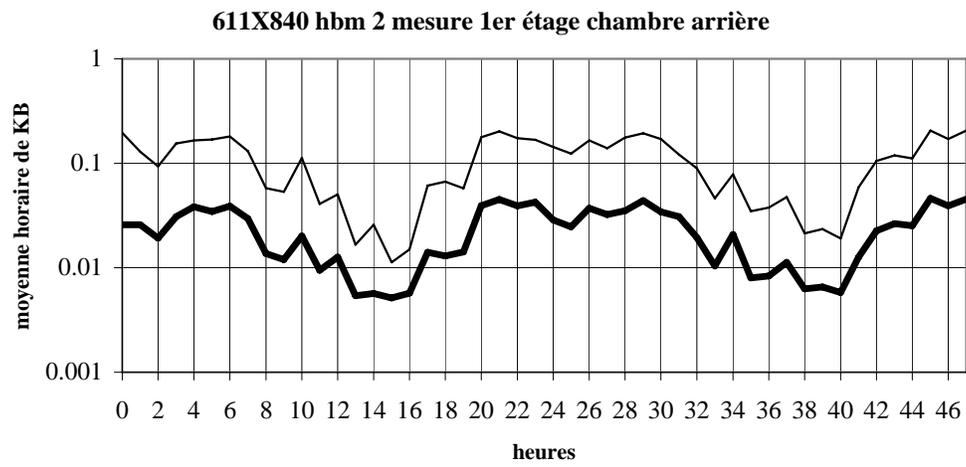
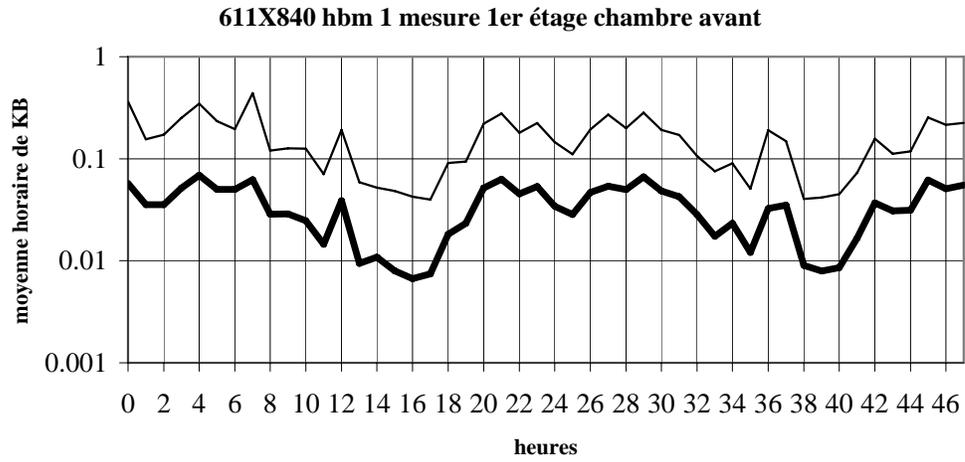
#### *2.2.3.2.b. Adaptation des valeurs du critère $A_r$*

La première étape est d'estimer la valeur que peut prendre le facteur de crête macroscopique.

Si les vibrations sont parfaitement stationnaires ce dernier vaut 1. On a bien insisté que des vibrations stationnaires étaient rarement observées.

Les exemples qui suivent donnent des valeurs concrètes de ce facteur en cas de vibrations de trafic.

En vue de simplifier et d'avoir une vue plus macroscopique on donne une confrontation par période d'une heure du facteur de crête.



Les évolutions temporelles de ces paramètres moyens des vibrations sont bien corrélées et un facteur constant les séparent.

Les trois graphes qui suivent donnent la corrélation entre ces résultats et pour les trois points de mesure. Un facteur systématique valant 5 apparaît entre les deux paramètres : en effet ils sont portés l'un en fonction de l'autre en regard de la droite

$$y = x/5$$

et l'ajustement peut être qualifié de bon.

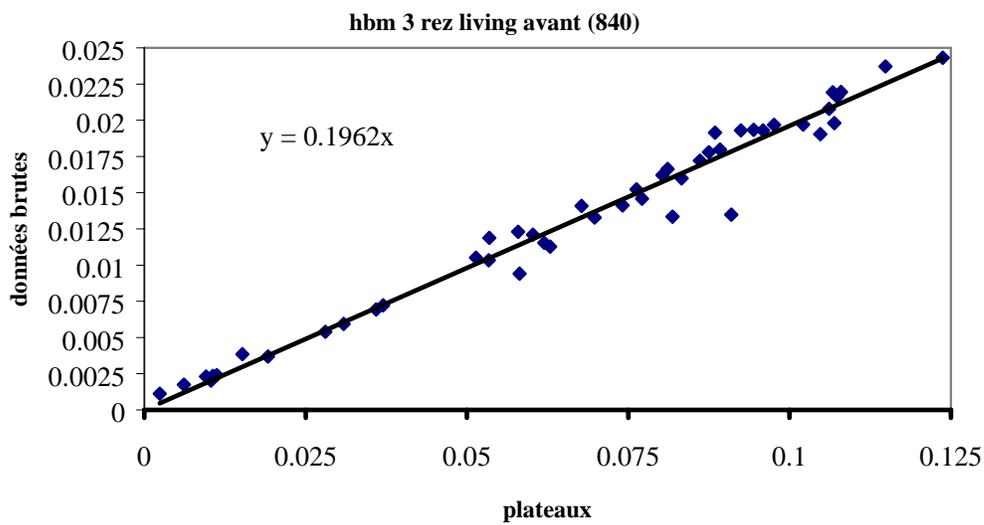
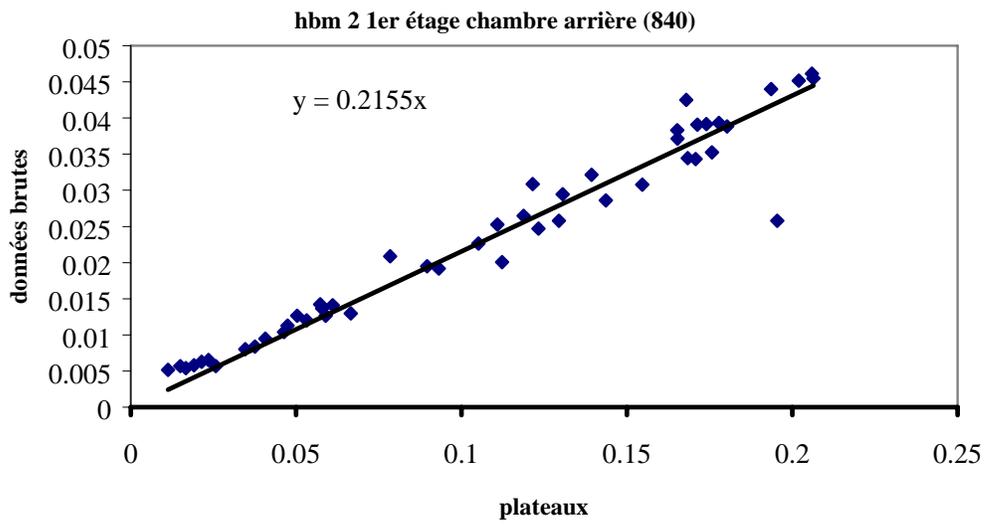
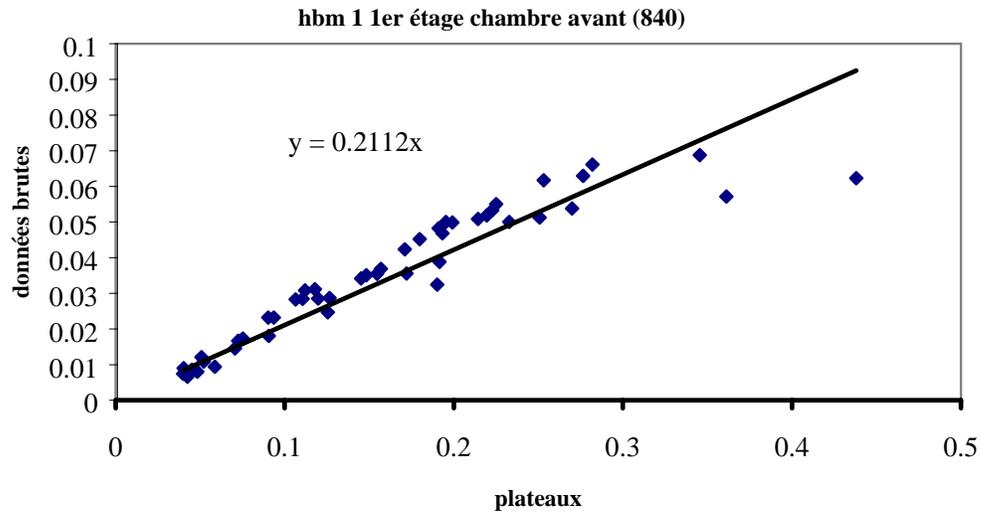
Que ce facteur soit commun aux trois points de mesure était prévisible : en effet ce facteur dépend fortement de la durée d'un transitoire de vibration comparé à la période de 30 secondes. L'ensemble du bâtiment est soumis à une même historique de vibration temporelle avec un même rapport entre durée de vibrations fortes et moment calme ou plus calme.

Toutefois plusieurs passages de véhicules peuvent avoir lieu dans la même période de 30 secondes ; c'est ce qui explique la corrélation vis-à-vis d'un facteur 5 constant n'est pas parfaite.

En observant le premier graphique de ce paragraphe, on se rend compte qu'il y a la plupart du temps un seul transitoire par période de 30 secondes. Aussi le facteur 5 peut s'expliquer par le fait qu'un passage de véhicule génère des vibrations appréciables pendant une période nettement plus courte que 30 secondes.

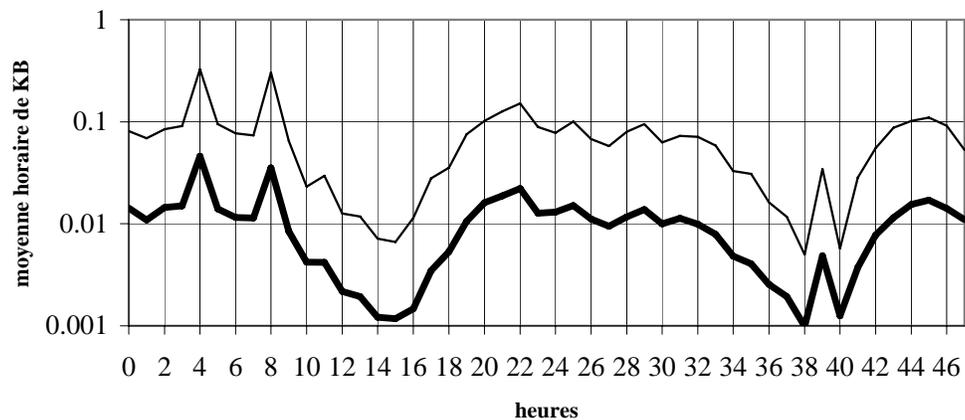
Pour expliquer le facteur 5, il faut considérer que la période d'action équivalente des vibrations est le 25<sup>ème</sup> de la période de 30 secondes ; à cette condition, on trouve un résultat cinq fois supérieur selon que l'on évalue le niveau moyen sur les données de base ou sur les plateaux.

Les régressions linéaires entre les deux paramètres sont donnée sur les graphes : on trouve les facteurs de 0.2122, 0.2155 et 0.1962, facteur influencé par la signature temporelle des vibrations sur ce site et par le caractère aigu des résonances de dalles de sol (effet d'amplification plus ou moins accentué).

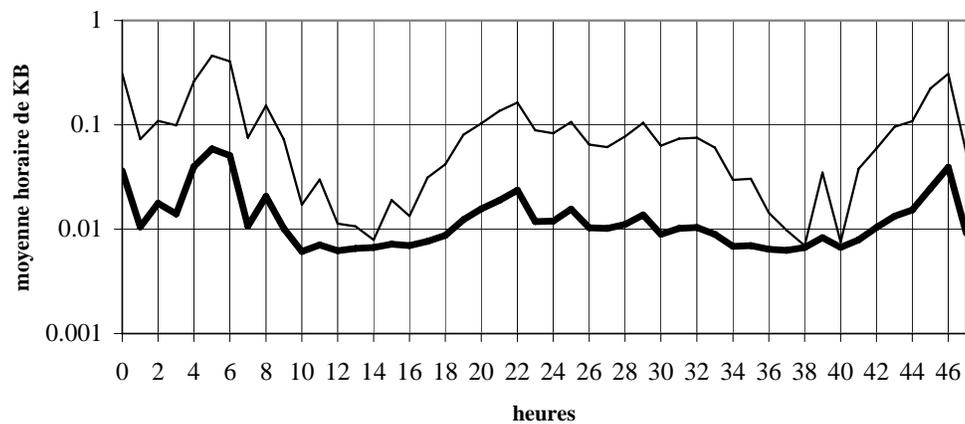


L'analyse d'un second site par la même approche est présentée ci-après.  
**Il s'agit de la même nature de vibrations, à savoir des vibrations de trafic.**

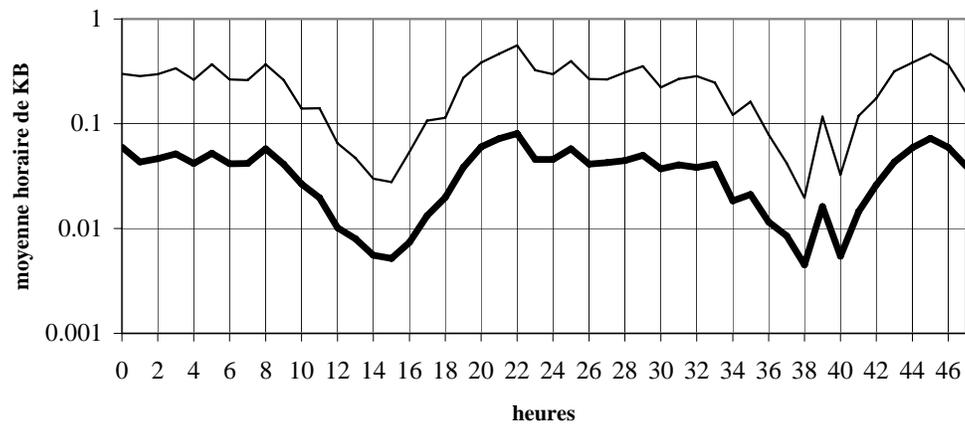
**611X845 hbm 1 1er étage 28 living avant**

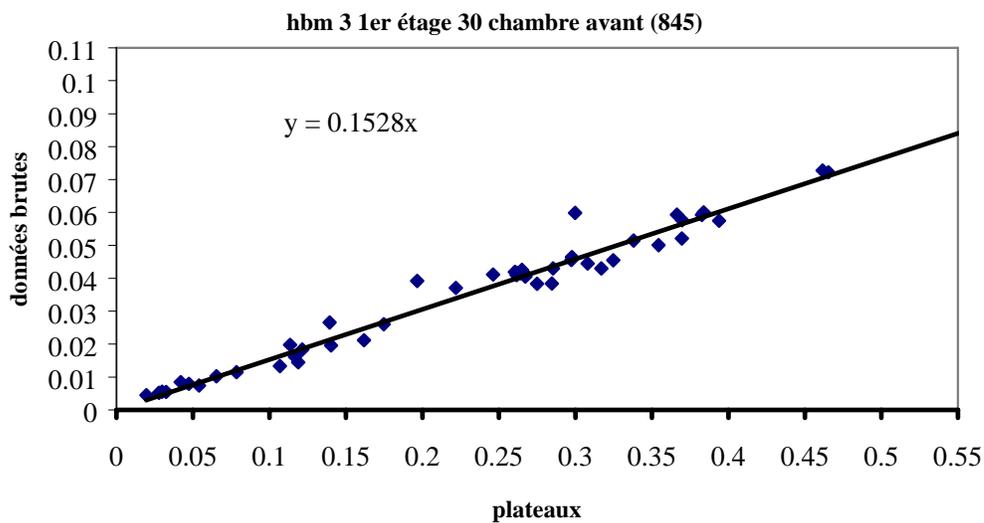
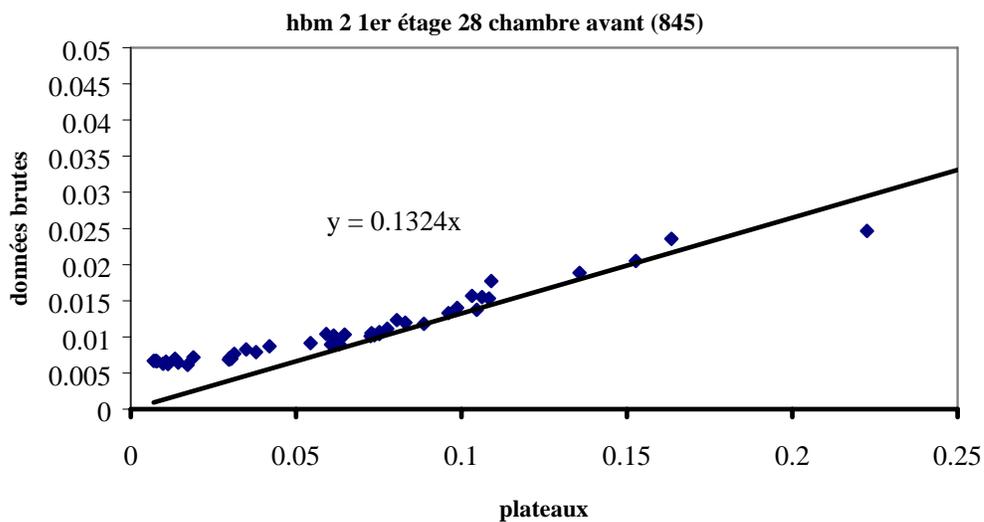
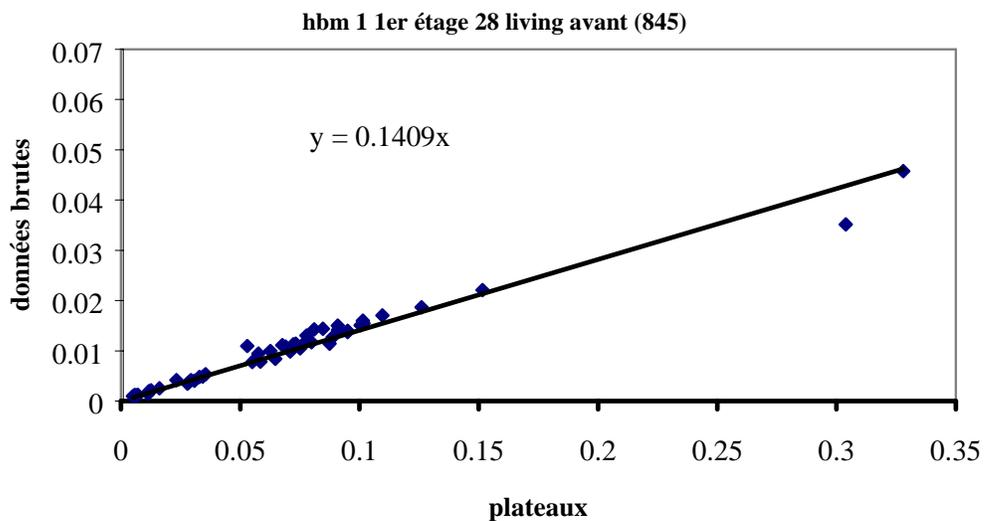


**611X845 hbm 2 1er étage 28 chambre avant**



**611X845 hbm 3 1er étage 30 chambre avant**





Les graphes de corrélation sont toujours présentés avec la droite de régression propre à la signature temporelle des vibrations du site et on trouve les facteurs 0.1409, 0.1324 et 0.1528.

Comme annoncé cette différence provient d'effets de source (les forces dynamiques générant les vibrations à la source ont une durée plus importante que dans le cas précédents) et d'effets de résonance de planchers sur lesquels les mesures ont lieu.

Malgré la similitude des natures de sources envisagées, il y a donc des différences qui se marquent d'un site à l'autre mais à ce stade, il n'est pas possible de différencier les deux natures d'influence et de dégager ce qui joue le plus sur le facteur macroscopique des vibrations.

### **2.3. Réactions du groupe de travail à l'approche proposée**

#### **2.3.1. En ce qui concerne les perturbations et le recours automatique à l'évaluation de la dose**

On s'accorde sur le fait qu'il est valide de ne plus reprendre le critère  $A_0$  dans la démarche : on ne devrait donc plus conclure au non-respect de la norme, si la valeur  $A_0$  est dépassée, ne fût-ce que par un événement très ponctuel.

Cela va dans le sens d'une stabilité accrue des conclusions que pourraient tirer par exemple deux institutions différentes qui évaluent les vibrations sur un même site. On élimine donc toute possibilité de conclusion sur base d'événement à caractère exceptionnel ou trop hasardeux.

Il a en outre été évoqué que des événements ponctuels même de forte amplitude n'ont que peu d'influence sur la dose. En effet, la dose est une valeur moyenne : c'est donc un paramètre stable peu influencé par des événements ponctuels, même de forte amplitude. On a montré ci-avant un exemple d'élimination de perturbations ou d'événements jugés comme tels.

Ne pas reprendre le critère  $A_0$  offre donc comme avantage supplémentaire que l'élimination de perturbations n'a de toute manière que peu d'influence sur le paramètre de dose et que donc qu'elle se fasse ou non par l'expert en charge des mesures de vibrations ne présente pas ou très peu d'influence sur le résultat ultime de l'interprétation des vibrations.

#### **2.3.2. En ce qui concerne le critère $A_u$ et le recours ou non en fonction de ce résultat à l'évaluation de la dose**

Il est également confirmé par le groupe qu'il n'est pas nécessaire de recourir à l'évaluation de la dose due aux vibrations et de sa comparaison avec le critère  $A_r$ , si le critère  $A_u$  n'est jamais dépassé, c'est-à-dire si un seuil relativement strict de vibrations n'est jamais dépassé.

Ce critère prend en effet comme valeur en zone normale d'habitats  $KB=0.1$  pour la période de jour et  $KB=0.15$  pour la période de nuit, valeurs dont on sait qu'elles se situent aux environs du seuil de perception.

On se retrouve ici avec un processus d'évaluation complètement inversé par rapport au critère  $A_0$ , en ce sens qu'il s'agit d'un cadrage vers les faibles amplitudes d'une réalité permanente des vibrations. Cela est jugé stable par les membres du groupe et il est évoqué que cette approche peut être maintenue.

#### **2.3.3. En ce qui concerne le critère $A_r$ , c'est-à-dire le recours à l'évaluation de la dose**

Si les événements ponctuels à caractère douteux quant à leur origine sont à éliminer ou en tout cas si l'on prône une méthodologie d'évaluation non sensible à de tels événements et que donc l'orientation en terme de dose est intéressante, le groupe évoque toutefois qu'une moyenne journalière diurne sur 16 heures (de 06H00 à 22H00) ou une moyenne journalière nocturne sur les 8 heures restantes (de 22H00 à 06H00) sont deux paramètres d'évaluation trop macroscopiques.

Ce qui est évoqué par le groupe est qu'une journée est composée de différentes périodes entre lesquelles un contraste sur le plan des vibrations existe.

Le trafic par exemple est le fait d'une nocivité accrue au moment des heures de pointes. Les heures plus calmes en journée ont évidemment pour effet de réduire la valeur moyenne des vibrations.

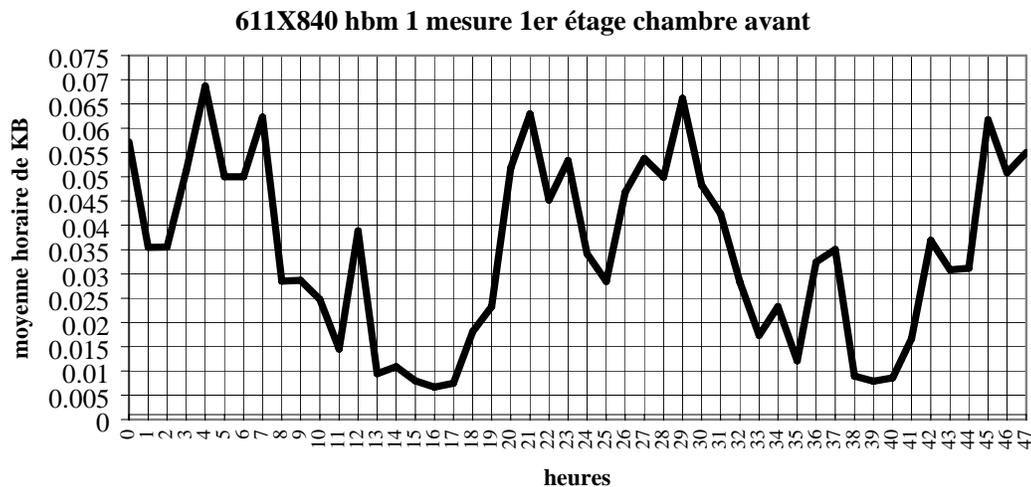
Si le critère porte uniquement sur cette valeur moyenne des vibrations, les périodes calmes interviennent dans le résultat de mesure et ces périodes peuvent dans beaucoup de cas pratiques être des périodes d'inoccupation des logements.

Le groupe suggère qu'il est bien plus pertinent de s'orienter vers un critère portant sur une moyenne des vibrations évaluée sur une durée plus courte que toute une journée, en maintenant toutefois une approche de valeur moyenne.

Cela amène à penser à une valeur moyenne par heure par exemple : on maintiendrait ainsi la stabilité de la méthode d'évaluation donnée par une approche en terme de valeur moyenne, mais en redonnant une certaine « dynamique » moins masquante qu'une valeur moyenne globale.

Le graphique qui suit en donne un exemple sur une période totale de 48 heures. Les deux périodes plus calmes sont des périodes de nuit. Les heures de pointes attendues en matinée ou en début de soirée n'apparaissent pas clairement.

Ce qui est par contre très stable d'un jour à l'autre, c'est la valeur moyenne horaire la plus élevée, qui dans ce cas vaut  $KB_{moyen} = 0.07$ . Cela plaide en faveur du choix proposé.



#### 2.3.4. En ce qui concerne la dépendance des critères en fonction de la nature de la source.

Vu le peu de clarté dans les modes de classification des sources de vibration, on convient de ne pas faire dépendre les critères mais de confier plutôt implicitement à la grandeur mesurée le caractère permanent, intermittent ou peu fréquent du fonctionnement de la source, les frontières entre ces classes étant trop peu clairement établies et même si ces frontières

étaient claires, il n'y aurait pas de fondement scientifique à une différenciation au niveau des critères.

Si on confie la différenciation des natures de sources au résultat de la grandeur mesurée, il y a différenciation objective et scientifique.

On préconise donc le maintien de critère unique ou indépendant de la nature de la source, car c'est vis-à-vis de ce critère que l'on doit comparer la réalité vibratoire subie par le riverain.

Cette approche a en outre le mérite de ramener sur une même échelle et de manière comparative toute nature de source et permet en terme de dose une comparaison entre ces natures : par exemple les vibrations intermittentes de trafic peuvent être jugée équivalentes à une source de vibration à caractère réellement permanent, mais de moindre amplitude.

## 2.4. Résultats de l'enquête auprès des membres du groupe de travail

① en ce qui concerne différents aspects de méthode de mesure : l'obtention d'un paramètre de base		
	oui	non
grandeur mesurée : la vitesse	8	2
filtre physiologique amenant au KB	9	1

② en ce qui concerne différents aspects de méthode de mesure : l'obtention d'un paramètre de base		
	oui	non
détection de valeur efficace avec constante de temps de 125 msec (exponentielle glissante)	9	1
OU		
valeur efficace vraie (sur quel temps d'intégration ??)	1 (125 sec)	9
attention : choix exclusif (l'un ou l'autre)		

③ en ce qui concerne l'obtention d'un paramètre macroscopique		
	oui	non
retenue exclusive des maxima par période de 30 secondes	2	9
OU		
évolution de la valeur efficace réelle	9	2

④ en ce qui concerne le choix des points de mesure		
	oui	non
points de mesures laissés au choix des occupants	0	
OU		
points de mesure définis par la norme	6	
OU		
points de mesure « conseillés » par l'expert	5	
mesures à chaque fois en fondation pour le risque de dégâts	6	2

⑤ en ce qui concerne l'implication plus sociale de la mesure		
	oui	non
capacité dans la procédure de mesure de rejeter des événements non significatifs ou perturbateurs	9	1
capacité à caractériser une situation		
OU		
capacité à caractériser une source particulière		
OU		
les deux possibilités	10	

⑥ en cas de caractérisation d'une source		
	oui	non
vibration équivalente déterminée sur la période d'action réelle	7	
OU		
vibration sur 16 heures jours et sur huit heures nuit indépendamment de la durée réelle de fonctionnement de la source (en ce cas il faut convenir de critères)	3	

⑦ en ce qui concerne les critères de sécurité		
	oui	non
adoption des critères tels quels de la normalisation allemande DIN 4150 Teil 3	7	
OU		
modification de ces critères	3	

⑧ en ce qui concerne les critères de confort		
	oui	non
maintien des différents critères $A_u$ , $A_o$ et $A_r$	5	
OU		
critère unique du type $A_r$ (niveau équivalent)	5	

Les conclusions que l'on peut tirer de l'enquête sont :

- la méthodologie de mesure fait l'unanimité : le paramètre de base est bien le facteur KB, y compris le principe de détection RMS avec caractéristique exponentielle ;
- majoritairement, les membres sont en faveur de l'adoption des critères tels quels ;
- les points d'amendement concernent plutôt l'extension de la norme existante dans le sens de l'obtention d'informations plus complètes visant à caractériser non seulement une situation, mais à la capacité de différencier les composantes contributives ;
- dans le même esprit, le groupe est majoritairement favorable à l'obtention de grandeur caractéristique propres aux sources avec détermination de la dose vibratoire déterminée sur le temps de l'action effectif de la source ;
- toujours dans le même esprit, l'expert responsable des mesures doit également gérer l'identification des perturbations ;
- une certaine liberté est toutefois laissée à l'expert de mettre en œuvre les moyens scientifiques permettant l'identification des sources et des perturbations ; on a toutefois convenu que ces moyens feraient l'objet d'une description détaillée lors de l'écriture de son rapport ;
- des mesures en parallèle en fondations pour l'évaluation de la potentialité de dégâts aux structures sont majoritairement préconisées.

On peut donc conclure à l'adoption raisonnable de la normalisation existante avec plutôt des suppléments vis-à-vis de celle-ci, amenant non pas à plus de complexité de l'application de la norme mais plutôt à une procédure expérimentale sur le site plus complète.

## **2.5. La traduction libre de la norme allemande DIN 4150**

Une traduction libre de la norme allemande DIN 4150 dans sa version de 1992 est proposée ici comme base de discussion pour le groupe de travail.

Un avertissement important doit être fait ici : il ne s'agit que d'une traduction libre n'engageant en rien le ou les traducteurs.

**Pour rappel, le rôle du groupe de travail (et le but du projet de recherche par ailleurs) était de finaliser un document pré-normatif en matière de vibrations dans les bâtiments.**

Le but de ce document de base est d'être introduit auprès de l'Institut Belge de Normalisation en vue d'être adopté comme norme belge.

### 3. ETABLISSEMENT DES CRITERES EN MATIERE DE GENE ET DE DEGATS, ET PARTICIPATION BELGE AU COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION

#### 3.1. Méthodologie

Dans un premier temps, il a été décidé, vu l'absence de groupe de travail belge ou européen en matière de vibration dans les constructions, et compte tenu du fait que les vibrations constituent une des actions mécaniques à considérer dans les constructions, et que les critères de limitation de la gêne et des dégâts constituent deux des états-limites à vérifier, tant dans les constructions existantes que dans celles en projet, il a paru préférable, dans un but d'efficacité du passage dans la pratique, de s'insérer dans les chapitres correspondants des normes générales de conception et de calcul en vigueur ou en préparation en la matière, plutôt que d'en faire des sujets de normes séparées.

Au niveau belge, l'occasion s'est présentée d'introduire un chapitre « vibrations » dans une nouvelle norme belge en préparation, la NBN B03-003 « Déformations des structures – Valeurs limites de déformation – Bâtiments », qui a été publiée en 2002.

Au niveau européen de même, il a été décidé de travailler dans le cadre du vaste programme de normalisation en cours visant à l'établissement des EUROCODES :

- Dès 1975, la Commission des Communautés Européennes (actuellement l'Union européenne – UE) a décidé d'entreprendre un programme d'action – les Eurocodes - visant à éliminer les obstacles techniques à l'harmonisation des spécifications pour la conception des structures de construction.
- En 1989, la Commission a confié au CEN (Comité Européen de Normalisation) le mandat d'établir les normes européennes à ce sujet.
- A présent, on peut mesurer l'ampleur du travail accompli par le Comité Technique 250 « Eurocodes » du CEN et ses nombreux sous-comités. Une soixantaine de normes vont atteindre le stade EN (normes européennes définitives), sur la base de leurs versions ENV (prénormes européennes). Les Etats membres de l'UE vont remplacer leurs normes ou règles nationales par ces Eurocodes dans un avenir proche.

Les EUROCODES sont au nombre de 10 :

<b>Norme</b>	<b>Eurocodes</b>	<b>Titre</b>	<b>Prénorme</b>
EN 1990	Eurocode 0	Bases du calcul	ENV 1991-1
EN 1991	Eurocode 1	Actions sur les constructions	ENV 1991-2 à 5
EN 1992	Eurocode 2	Calcul des structures en béton	ENV 1992
EN 1993	Eurocode 3	Calcul des structures en acier	ENV 1993
EN 1994	Eurocode 4	Calcul des structures mixtes acier-béton	ENV 1994
EN 1995	Eurocode 5	Calcul des structures en bois	ENV 1995
EN 1996	Eurocode 6	Calcul des ouvrages en maçonnerie	ENV 1996
EN 1997	Eurocode 7	Calcul géotechnique	ENV 1997
EN 1998	Eurocode 8	Calcul des ouvrages parasismiques	ENV 1998
EN 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en aluminium	ENV 1999

La Belgique – comme il se doit – est un bon élève européen et met tout en œuvre pour réaliser ce passage des normes nationales, déjà fort inspirées par les projets d'Eurocodes passés, aux Eurocodes eux-mêmes.

En Belgique, à l'IBN, l'élaboration des Eurocodes est suivie par des commissions-miroirs, sous la houlette de la « Commission de coordination des Eurocodes structurels » (le pendant du CEN-TC 250), qui rassemble les délégués belges associés à chaque sous-comité miroir des Eurocodes du CEN (CEN/TC250/SC 1 à 9), ainsi que quelques autres experts.

La composition de cette commission, également compétente pour l'Eurocode 1 « Actions sur les structures », est donnée au tableau ci-après. La présidence de cette commission est assurée par ir. Henri Motteu et le rapporteur en est Pierre SPEHL, coordinateur et promoteur N°1 de la recherche.

L'action a été menée par P. SPEHL,

- au niveau européen
  - participation aux réunions du CEN/TC 250 et à celles du CEN/TC250/SC1, en tant que Chef de la délégation belge,
  - participation (sous contrat distinct CEN-BSI-SECO) en tant que membre des équipes de projet (Project Team) chargées d'établir les normes européennes EN 1990 « Bases du calcul » et EN 1991-1-4 « Actions du vent »,
- au niveau belge :
  - rapporteur général de la commission-miroir « EUROCODES » de l'IBN,
  - et plus particulièrement rapporteur du projet de norme NBN B03-003.

Il est à noter que les deux programmes de recherche NO/D6/014 et NM/G3/12 ont permis une présence assidue de P. SPEHL aux réunions des CEN/TC250 et CEN/TC250/SC1.

**Commission plénière CEN/TC 250 et Sous-Comité Miroir de l'Eurocode 1 « Actions »**

<b>GROUPE</b>	<b>NOMS</b>	<b>ORGANISMES</b>
<b>AUTORITES PUBLIQUES</b>		
	BAERT Dirk	FOD Vervoer en Infrastructuur
	BROECKX Eduard	FOD Economie
	CABY Victor	MET
	COLLARD Christian	MET
	DEMEY Guy	Min. Vlaamse Gem.
European National Contact	LABEEUW Gilles	SPF Mob. & Transp.
	LEDENT Henri	MET
	MESOTTEN D.	Min. Vlaamse Gem.
	POLEN Jan	Min. Vlaamse Gem.
	PORTUGAELS D.	MET
	ROCHTUS Frans	Min. Vlaamse Gem.
<b>CONSTRUCTEURS ET INDUSTRIE</b>		
	DE WITTE F.	NAVVB
	DENOEL Jean-François	FEBELCEM
	DUBRU Michel	GLAVERBEL
	HOECKMAN W.	VICTOR BUYCK
	LENS Michel	AGORIA (GANTRY)
	VAN DEN BOSSCHE Patrick	TCHN
	VELDEKENS Mathieu	FEBE
<b>UTILISATEURS</b>		
	BEURMS Daniel	SECO
	BRULS Aloïs	DELTA
	DEBRUYCKERE Rik	SECO
	DEKEYSER Jacques	SECO
	FOUARGE Bernadette	PROBETON
	PFEFFERMAN Oscar	Ingénieur-conseil
	PIRAPREZ Eugène	Ingénieur-conseil
chef de délégation TC 250 et SC1	SPEHL Pierre	SECO
<b>ENSEIGNEMENT ET RECHERCHE</b>		
	ARESU	expert
	BROUCKE Armand	VUB (hon.)
	CADORIN	ULg
	LAGAE G.	UGent
	LEGRAND Christian	CSTC
	MAQUOI René	ULg
	MARTIN Yves	CSTC
président de la commission miroir	MOTTEU Henri	CSTC (hon.)
	PARMENTIER Benoît	CSTC
	PLUMIER André	ULg
	SCHLEICH	ULg
	TAERWE Luc	UGent
	VAN GEMERT D./J.	KUL
	VAN GINDERACHTER C.	CSTC
	WINAND André	ULB (hon.)
	WINNEPENNINCKX Eric	CSTC

### **3.2. Résultats**

La partie de la recherche relative à la prénormalisation et à la participation belge aux travaux européens de normalisation du CEN (objectif 3) a abouti aux résultats suivants :

- la publication en 2002 de la norme belge NBN B 03-003 (voir Annexe 1 au présent rapport), qui rend notamment d'application en Belgique (en son chapitre 8. VIBRATIONS) les normes DIN 4150-2 et DIN 4150-3, renvoie à la norme NBN B03-002 pour ce qui concerne les effets vibratoires dus au vent, et fixe des valeurs critiques des fréquences propres de vibration des structures, en-dessous desquels un calcul dynamique est requis, pour ce qui concerne les effets de mouvements synchronisés des personnes ;
- la publication et mise à l'enquête publique en 2004, en complément à la norme européenne EN 1990 « Eurocode - Bases de calcul des structures », Annexe A1 « Application pour les bâtiments » (voir Annexe 2 au présent rapport), d'un projet d'Annexe Nationale belge (voir Annexe 3 au présent rapport) qui renvoie (en son article A1.4.2 Critères d'aptitude au service) à la norme belge NBN B03-003 pour ce qui concerne les bâtiments, et à la norme européenne EN 1991-1-4 pour ce qui concerne les effets vibratoires du vent.

#### **4. DIFFUSION ET VALORISATION**

La première diffusion des résultats a lieu évidemment en permanence, par l'achat des normes à l'IBN, et par leurs applications dans les vérifications de bâtiments existants et de projets de constructions.

Les promoteurs de la recherche ont également présentés les résultats de leurs travaux lors de demi-journées d'études sur les EUROCODES :

- un premier cycle de conférences a été organisé en 2002-2003, conjointement par la SRBII, le TI-KVIV et COBOMEDIA, en collaboration avec l'IBN, SECO, le CSTC et le SPF Mobilité et Transports ;
- un second cycle de conférences sera organisé en 2004-2005, conjointement par la FABI, le TI-KVIV et COBOMEDIA, en collaboration avec les mêmes organismes.

## **5. BILAN ET PERSPECTIVES**

Les actions menées dans le cadre de la recherche ont permis d'introduire dans les normes belges et européennes en matière de déformations un chapitre vibrations qui n'y figurait pas.

Les enseignements tirés de l'application de leurs dispositions devront conduire dans l'avenir à préciser et compléter les prescriptions, afin d'optimiser l'outil, notamment en faisant en sorte que pour les mêmes vibrations dans le même ouvrage, les mesures et leur interprétation conduisent aux mêmes conclusions, quels que soient les experts qui les réalisent et les intérêts éventuels qu'ils seraient chargés de défendre.

Les prescriptions actuellement introduites contribuent déjà largement à améliorer la situation, mais un suivi sera néanmoins nécessaire pour ajuster les textes aux constats sur le terrain.

La Commission européenne et le CEN ont prévu que les EUROCODES soient révisés tous les 5 ans. Comme l'élaboration de l'ensemble des 60 normes européennes qui forment les EUROCODES prend également 5 ans, c'est un processus continu de révision qui devra avoir lieu. En ce qui concerne l'EN 1990 et son Annexe Nationale, la prochaine révision devrait avoir lieu à partir de 2008.

## REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement tous les membres du Comité d'Accompagnement pour leurs avis et conseils, sans lesquels cette recherche n'aurait pu aboutir à un consensus représentatif de tous les intéressés :

Société Nationale des Chemins de fer Belges (SNCB)  
Département Infrastructure  
**Monsieur Alexandre**  
rue de France 85  
B – 1060 BRUXELLES

Ministerie van Verkeer en Infrastructuur  
**De Heer Broeckx**  
Wetstraat 155  
B – 1040 BRUSSEL

*PRONOUVO*  
**De Heer P. Carels, ir.**  
Managing Director  
Reutenbeek 76  
B - 3090 OVERIJSE

Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles (STIB)  
**Monsieur Daniel Decauwers**  
avenue d'Orjo de Marchovelette, 13  
B – 1160 BRUXELLES

Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement (IBGE)  
**Monsieur G. Dellisse**  
Gulledelle 100  
B – 1200 BRUXELLES

AKRON  
**De Heer Geert Desanghere**  
Mechelsevest 13-3  
B – 3000 LEUVEN

Ministerie Vlaamse Gemeenschap  
Departement Leefmilieu en Infrastructuur  
Administratie AMINAL  
**De Heer F. Florquin**  
Emile Jacqmainlaan 156 Bus 8  
B – 1040 BRUSSEL

REGIE DER GEBOUWEN  
SAPC  
**De Heer Herman Fabri**  
Guldenvlieslaan, 87  
B – 1060 BRUSSEL

Katholieke Universiteit Leuven (K.U.L.)  
Departement Bouwkunde  
**Prof. G. De Roeck en Prof. G. Degrande**  
De Croylaan 2  
B – 3001 HEVERLEE

ULg – Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur  
**Monsieur D. Jongmans, Dr. ir.**  
Sart Tilman – Bât. B19  
B - 4000 LIEGE 1

Ministère des Communications et de l'Infrastructure  
**Monsieur G. Labeeuw**  
*Résidence Palace*  
rue de la Loi 155  
B - 1040 BRUXELLES

Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap  
Departement Leefmilieu en Infrastructuur  
Afdeling Wegenbouwkunde  
**De Heer Lieven Lanoye**  
Olympiadenlaan 10  
B – 1140 BRUSSEL

Ministère de la Région Wallonne  
Division de la Prévention et des Autorisations  
**Madame Fabienne Marchal**  
place du Béguinage 16  
B – 7000 MONS

Ministère Wallon de l'Équipement et des Transport - Direction générale des Services  
Techniques (DG4)  
Division du Contrôle Technique (IG 42)  
Direction de l'expertise des structures (D424)  
**Monsieur Claude Sauvage**  
rue Côte d'Or, 253  
B - 4000 LIEGE

TECHNUM N.V.  
**De Heer L. Schillemans**  
Grensstraat 1B  
B – 3010 LEUVEN

Institut Bruxellois de Gestion de l'Environnement (IBGE)  
**Monsieur Ismail Sefiani**  
Gulledelle 100  
B – 1200 BRUXELLES

## REFERENCES

DIN 4150 Erschütterungen im Bauwesen (1999)

- Teil 1 : Vorermittlung von Schwingungsgrößen
- Teil 2 : Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden
- Teil 3 : Einwirkungen auf bauliche Anlagen (1999)

NBN B03-002 : Actions du vent sur les constructions (1988)

- Partie 1 : Généralités, pression du vent sur une paroi et effets d'ensemble du vent sur une construction
- Partie 2 : Effets dynamiques du vent sur les constructions flexibles

NBN B03-003 : Déformations des structures – Valeurs limites de déformation – Bâtiments (2002)

EN 1990 : Eurocodes structuraux – Eurocodes : Bases de calcul des structures (2002)

NBN EN 1990 – ANB : Eurocode 0 : Bases de calcul des structures –  
Annexe A1 : Application pour les Bâtiments – ANNEXE NATIONALE (2004)

NBN EN 1991-1-4 : Eurocode 1 – Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales–  
Actions du vent (2004)

Politique scientifique fédérale – Contrat de recherche N° NM/G2/13 : Participation du CSTC au projet « Critères d'états limites des constructions en matière de vibrations » - Rapport final (II) (2003)

SSTC – Contrat de recherche N° NO/D6/014 : Participation de SECO au projet « Effets des vibrations des constructions : Exigences et méthodes de détermination » – Rapport final (2002)

## **ANNEXES**

- 1. norme belge NBN B03-003 (2002)**
- 2. norme européenne EN 1990 – ANNEXE A1 (2002)**
- 3. projet d'Annexe Nationale belge à l'EN 1990 (2004)**

Publié en 2005 par la Politique scientifique fédérale

La responsabilité scientifique de ce rapport est assumée par les auteurs.

---

**POLITIQUE  
SCIENTIFIQUE FEDERALE**

rue de la Science 8 ■ B-1000 BRUXELLES  
Tél. 02 238 34 11 ■ Fax 02 230 59 12  
[www.belspo.be](http://www.belspo.be)

