

# **L'EUROCODE 1 PARTIE 2.4 «ACTIONS DU VENT» PRÉSENTATION ET ÉLÉMENTS DE COMPARAISON AVEC LES RÈGLES NV 65**

**par Jacques Biétry**

## **RÉSUMÉ**

*L'Eurocode 1-partie 2.4 «Actions du vent» et le document d'application nationale (DAN) associé, seront prochainement publiés. Ce document est destiné à être utilisé de façon optionnelle et expérimentale, en remplacement des textes nationaux en vigueur (règles NV 65, article 14 du fascicule 61 du CPCP). Les concepts qu'il met en œuvre (définition probabiliste du vent de référence, rugosité du sol...) sont déjà nécessairement utilisés dans les études en soufflerie turbulente des grands projets (ponts à câbles, grands bâtiments...).*

*Cet article présente brièvement ce code et donne des éléments de comparaison avec les règles NV 65 actuelles.*

## **SUMMARY**

*Eurocode 1 Part 2.4 on «Wind actions» and its national application document (NAD) will soon be published. They should be used in a optional and experimental way in the place of the national documents in force (NV65 rules, clause 14 of the CPCP section 61). The concepts implemented in the Eurocode (probabilistic definition of the reference wind, soil roughness...) are already necessarily used in the turbulent wind-tunnel studies of large projects (bridges with cables, high buildings...).*

*This paper briefly presents the code and gives some elements for a comparison with the present NV65 rules.*

## 1. – INTRODUCTION

La partie 2.4 «Actions du vent» de l'EUROCODE 1 : «Bases de calcul et actions sur les structures», existe maintenant en français (la version originale, en anglais, est datée de mai 1995) et un document d'application nationale (DAN) a été établi. Cet ensemble est référencé ENV 1991-2.4/DAN «l'Eurocode 1 : «Bases de calcul et actions sur les structures» Partie 2.4 «Actions sur les structures, actions du vent» et sera publié prochainement.

Cet article présente brièvement le contenu de ce code et son champ d'application, sa structure et les principes sur lesquels il est établi.

Des éléments de comparaison avec les règles NV65 actuelles y sont également proposés, en particulier :

- sur la carte du vent de référence en France et les valeurs associées de la pression dynamique,
- sur le concept de «rugosité du sol» introduit dans l'ENV et pratiquement absent des règles NV65,
- sur les coefficients de pression dans deux cas simples (éléments de façade, éléments de couverture),
- sur les actions d'ensemble (et plus particulièrement sur le coefficient dynamique) dans deux cas de bâtiments-tours et deux cas de cheminées (l'une en béton, l'autre en acier).

## 2. – CONTENU DU CODE ; CHAMP D'APPLICATION

L'ENV traite les actions suivantes du vent sur les constructions :

- a) les pressions aérodynamiques exercées par le vent à la surface, extérieure et intérieure des constructions; ces pressions sont normales aux parois;
- b) les forces de frottement tangentiels sur les surfaces de très grandes dimensions balayées par le vent;
- c) les actions d'ensemble (forces, moments) exercées par le vent turbulent sur les structures et leurs éléments. Deux approches sont proposées :
  - la plus simple s'applique à la plupart des constructions;
  - l'autre intéresse les constructions, généralement élancées et de grandes dimensions, dont les périodes propres sont grandes et dont, par conséquent, les modes propres peuvent être excités significativement par la turbulence.

Ces actions sont une fonction croissante de la vitesse du vent. Elles sont calculées pour une vitesse de référence, définie sur une base probabiliste; cette vitesse caractérise en quelque sorte la tempête la plus «sévère» que l'on accepte de considérer dans le dimensionnement des ouvrages.

L'ENV traite également deux autres types d'action, qui peuvent affecter dangereusement les constructions élancées, à des vitesses de vent inférieures à la vitesse de référence. Il s'agit :

- d) de l'excitation d'un mode propre, à la résonance, par le sillage tourbillonnaire de la construction considérée (phénomène appelé aussi des «tourbillons alternés» ou des «tourbillons de Bénard-Karman»);
- e) des instabilités aéroélastiques du type «galop», liées à l'existence de forces aéroélastiques induites par le déplacement de la construction et à l'interaction de ce déplacement

avec le vent. L'action de ces forces est assimilable à un amortissement aérodynamique, négatif dans certains cas et par conséquent capable de réduire, voire d'annuler l'amortissement total (somme des amortissements structurel et aérodynamique). Par définition, ces phénomènes ne concernent que les constructions à la fois suffisamment souples pour que leurs déplacements soient significatifs, peu amorties et relativement légères.

### Champ d'application :

L'ENV s'applique en premier lieu aux bâtiments et à leurs éléments.

Il traite également des cheminées et autres constructions encastrées; mais il devra être complété en ce qui concerne les tours en treillis et l'application aux mâts haubannés.

Le cas des ponts suspendus ou à haubans est (et restera) hors du champ d'application. Le projet s'applique aux ponts routiers ou de chemin de fer jusqu'à 200 m de portée et aux passerelles pour piétons ou cyclistes jusqu'à 30 m de portée; mais des exigences particulières seront ajoutées.

Le cas des structures offshore n'est pas traité.

## 3. – PRINCIPES ET STRUCTURE DU CODE «VENT»

Le vent est par nature turbulent, c'est-à-dire fluctuant en vitesse et direction; ses effets le sont également, en termes de pressions ou de forces aérodynamiques et donc de sollicitations ou de réponse des structures.

C'est pourquoi, dans cet Eurocode comme dans tous les autres codes, l'action du vent est représentée par un ensemble de pressions ou de forces statiques<sup>1</sup> dont les effets sur la construction étudiée sont équivalents aux effets extrêmes du vent.

Le calcul de cette action comprend les étapes suivantes :

- 1 - Vitesse de vent de référence, définie sur une base probabiliste par une carte météorologique donnée en Annexe A de l'Eurocode. La carte relative à un pays est définie par les autorités nationales, en attendant la définition d'une carte européenne harmonisée;
- 2 - Coefficient d'exposition, fonction du site (topographie, rugosité) et de la hauteur au-dessus du sol. Ces deux premières étapes conduisent à la pression dynamique de «pointe», correspondant à la vitesse de pointe (ou de «rafale») susceptible d'être observée (avec la probabilité correspondant au vent de référence) à la hauteur considérée (hauteur de l'élément de construction, du tablier de pont,...).
- 3 - Choix d'une procédure, simple ou détaillée, pour le calcul des effets dynamiques du vent; la procédure détaillée est donnée à l'Annexe B de l'ENV.
- 4 - Coefficients de pression ou de force, donnés pour différents types de constructions :
  - bâtiments à base rectangulaire (murs verticaux, toitures plates ou à 1, 2 ou 4 versants, toitures multiples, toitures en voûte),
  - dômes,
  - toitures isolées,

1. Au sens de «non-fluctuantes avec le temps».

- panneaux, murs isolés, pleins ou poreux,
- constructions ou éléments prismatiques à section rectangulaire, polygonale régulière ou circulaire; profilés,
- constructions en treillis; échafaudages,
- sphères,
- ponts,
- drapeaux,
- pression à l'intérieur des bâtiments.

L'ENV n'échappe pas à la règle commune à tous les codes : seules sont traitées les formes simples de construction; les géométries complexes ne peuvent être abordées que par des études spécifiques en soufflerie ou, à défaut, par référence à des études publiées ou des compilations de telles études. Le cas courant des acrotères n'est pas abordé dans l'ENV d'origine, mais des indications sont données dans le DAN français.

Enfin, pour les constructions très élancées, l'Annexe C du projet décrit des règles de calcul des effets du sillage tourbillonnaire («tourbillons alternés»), y compris la fatigue, et aborde d'autres phénomènes aéroélastiques (galop, galop d'interférence, divergence).

L'Annexe D («caractéristiques dynamiques») rassemble quelques éléments utiles à l'étude des phénomènes dynamiques (fréquences propres, déformées modales, amortissement).

#### 4. – PRESSIONS AÉRODYNAMIQUES SUR LES PAROIS

L'action du vent sur les constructions est représentée tantôt par des pressions aérodynamiques s'exerçant sur les parois, tantôt par des forces aérodynamiques. Dans ce chapitre, on examinera la représentation par des pressions aérodynamiques s'exerçant sur des parois. Le cas des constructions suffisamment souples et élancées pour que l'excitation par le vent de leurs modes propres (effets dynamiques) ne soit plus négligeable est traité au chapitre «Actions d'ensemble».

Les pressions aérodynamiques  $w$  sur les surfaces d'une construction sont données par l'expression suivante :

$$w_e = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot c_{pe} \quad \text{ou} \quad w_i = q_{ref} \cdot C_e(z_i) \cdot C_{pi}$$

selon qu'il s'agit d'une surface extérieure (indice  $e$ ) ou d'une surface intérieure (indice  $i$ )

où :

$q_{ref}$  est la pression dynamique moyenne de référence;

$C_e(z_e)$ ,  $C_e(z_i)$  est un coefficient «d'exposition», fonction des caractéristiques du site de construction (rugosité, topographie) et de la hauteur au-dessus du sol;

$C_{pe}$ ,  $C_{pi}$  est un coefficient de pression extérieure ou intérieure.

La pression «nette» sur une paroi est la différence des pressions sur chacune des surfaces avec la convention de signe habituelle (pression positive lorsqu'elle est dirigée vers la surface et pression négative (dépression ou succion) dans l'autre cas).

##### 4.1. – Pression dynamique de référence $q_{ref}$

Elle est donnée par :

$$q_{ref} = \frac{1}{2} \rho V_{ref}^2$$

où :

$\rho$  est la masse volumique de l'air (1,25 kg/m<sup>3</sup>, sauf mention contraire à l'Annexe A, propre à chaque pays; pour la France, le DAN retient 1,225 kg/m<sup>3</sup>);

$V_{ref}$  est la vitesse de référence du vent.

##### Vitesse de référence $V_{ref}$

Cette vitesse de référence est une vitesse moyenne (moyenne sur 10 minutes), supposée mesurée à 10 m de hauteur, en site plat et peu rugueux (catégorie II; cf. chapitre 4.2, ci-dessous). Elle correspond à une tempête dont la probabilité annuelle d'occurrence est égale à 0,02 (tempête dite «cinquantennale», ou encore de «période de retour» égale à 50 ans). Cet événement météorologique est observé en moyenne 1 fois par demi-siècle; la tempête qui a traversé la Bretagne et la Normandie en octobre 1987 correspondait sensiblement à cette fréquence d'occurrence.

Le CSTB (Division Climatologie) a effectué il y a quelques années une nouvelle analyse statistique des vitesses maximales de vent observées sur la période 1949-1992, dans 80 stations météorologiques. Sur la base de cette étude, une nouvelle cartographie de la vitesse de référence en France, avec un découpage du territoire selon les limites administratives, a été proposée et discutée par les commissions françaises concernées (P06A, CGNBat-DTU, groupe fascicule 61 - CCTG - Titre IV - Section I). La cartographie finalement retenue, pour incorporation à l'Annexe A de l'ENV est donnée en annexe («Vitesse de référence du vent»; 01-12-1997).

Les actions du vent calculées sur la base de cette vitesse de référence, sont des actions «caractéristiques», c'est-à-dire qu'elles sont destinées à être pondérées par un coefficient  $\gamma$  supérieur à l'unité (par exemple : 1,5) dans les vérifications à l'état-limite ultime. Cette remarque est importante pour toute comparaison qui serait faite entre les actions du vent calculées selon l'ENV et les actions «normales» et «extrêmes» des Règles NV 65.

L'ENV donne aux autorités nationales, la possibilité de moduler la vitesse de référence, par l'intermédiaire de paramètres fixés à l'Annexe A en même temps que la carte :

$$V_{ref} = C_{DIR} \cdot C_{TEM} \cdot C_{ALT} \cdot V_{ref,0}$$

où

$V_{ref,0}$  est la vitesse de référence définie précédemment;

$C_{DIR}$  permettrait de moduler la vitesse de référence en fonction de la direction du vent. Les vents très forts ne sont pas également probables dans toutes les directions. En France, par exemple, les vents forts viennent en général du secteur Ouest et très peu du Sud-Est; dans la vallée du Rhône, ils viennent du secteur Nord (mistral); etc. En Grande-Bretagne, le coefficient  $C_{DIR}$  est pris égal à 0,76 pour les vents de secteur Est et 1,05 pour les vents de Sud-Ouest. L'existence en France de vents locaux très forts (mistral, tramontane) et la diversité des sites (relief) rendent très difficile cette modulation en fonction de la direction; de sorte que  $C_{DIR}$  est pris égal à 1 dans l'attente d'une étude détaillée;

$C_{TEM}$  permet une réduction de la vitesse de référence pour les constructions «temporaires» ou celles dont les conditions d'exposition au vent sont temporaires (chantier). En Grande-Bretagne, par exemple,  $C_{TEM}$  est pris égal à 0,62 si la période d'exposition au vent n'excède pas le mois de juin; mais égal à 1 si cette période est de 4 mois s'étalant de novembre à février. Des propositions sont faites dans le DAN français, donnant à  $C_{TEM}$  la valeur de 0,9 sous certaines conditions;

$C_{ALT}$  est utilisé, en Grande-Bretagne par exemple, pour corriger en fonction de l'altitude une carte du vent de réf-

rence définie au niveau de la mer. Pour la France, l'étude déjà citée des données de 80 stations météorologiques n'a pas permis de déceler une influence statistiquement significative de l'altitude; de sorte que  $C_{ALT} = 1$ .

La vitesse de référence correspond à un événement «cinquantenal» (probabilité annuelle égale à 0,02). L'ENV donne une relation permettant d'estimer la vitesse correspondant à d'autres probabilités (de 0,005 à 0,5) (cf. figure 6.7.1 de l'ENV).

**Note :** cette relation est donnée pour certaines vérifications aux états-limites de service telles que celles concernant les accélérations et l'inconfort pouvant en résulter.

Pour la France, l'étude statistique du CSTB montre que les paramètres à utiliser dans cette relation sont  $K1 = 0,33$  (au lieu de  $K1 = 0,2$ ) et  $n = 0,5$ ; ces valeurs numériques traduisent une dispersion statistique plus grande en France des vitesses maximales annuelles observées.

### Comparaison avec NV 65

Actuellement, dans les vérifications aux E.L.U. (selon BAEI 91 par exemple), les actions «normales» des NV 65 sont d'abord multipliées par 1,2 pour les transformer en actions «nominales», puis pondérées par le coefficient 1,5, soit au total un coefficient multiplicateur de  $1,2 \times 1,5 = 1,8$ , valeur très proche du rapport 1,75 entre les actions «extrêmes» des NV 65 et les actions «normales». En d'autres termes, les vérifications aux E.L.U. sont faites avec le vent «extrême» des NV 65 sans pondération.

Les pressions dynamiques de référence de l'ENV et de «base» des Règles NV 65 diffèrent également profondément par leur définition : la référence des Règles NV 65 correspond à une vitesse de **pointe** alors que  $V_{ref}$  de l'ENV correspond à une vitesse **moyenne** sur 10 minutes. Comme on le verra au chapitre 4.2., il y a un rapport de l'ordre de 2,35, dans les conditions normales de mesures météorologiques, entre les pressions dynamiques correspondant, pour la même tempête, à la vitesse de pointe d'une part et à la vitesse moyenne d'autre part.

L'ENV et les Règles NV 65 diffèrent également par la définition même de l'événement météorologique considéré. Comme cela a été dit, l'ENV considère la tempête «cinquantennale». Les Règles NV 65 définissent le vent «normal» à partir d'une statistique des vitesses maximales journalières; mais, du fait de l'existence d'une autocorrélation importante de cette série des vitesses journalières<sup>2</sup>, il n'est pas possible de relier simplement le vent «normal» des NV 65 et le vent de référence de l'ENV. Quant au vent «extrême» des Règles NV 65, bien qu'il paraisse défini dans le commentaire C 1,231 de ces règles, il ne l'est pas en réalité car personne n'est capable de donner une valeur numérique à une vitesse définie comme... «la plus grande vitesse instantanée à laquelle la construction peut être soumise durant sa vie normale».

2. L'échelle de temps des tempêtes génératrices de vents forts, dépasse nettement la journée; elle est de l'ordre de plusieurs jours.

Si l'on compare la carte du vent «cinquantenal» établie pour l'ENV et la carte des vents forts des Règles NV 65 on peut établir, sur la base de l'analyse statistique du CSTB, que, en moyenne géographique sur l'ensemble de la France :

- le vent «normal» des Règles NV 65 correspond à une «période de retour» de l'ordre de 5 ans (probabilité annuelle de l'ordre de 0,20),
- le vent «extrême» correspond à une «période de retour» de l'ordre de 100 ans (probabilité annuelle de l'ordre de 0,01).

**Note :** En France, la différence entre vent «cinquantenal» (ENV) et vent «centenal» (NV 65) est d'environ 5 % en termes de vitesse, soit 10 % en termes de pression.

Autrement dit, le vent «extrême» des Règles NV 65 correspond à une tempête d'une sévérité à peine supérieure à celle de la tempête «cinquantennale» de l'ENV. Mais les actions de ce vent «extrême» entrent dans les vérifications aux E.L.U. sans majoration, alors que celles de l'ENV y sont pondérées par le coefficient 1,5. A priori, par conséquent, l'ENV est plus sévère que les Règles NV 65 et dans une proportion importante.

On peut aussi comparer la moyenne, sur l'ensemble des départements métropolitains, de la «pression dynamique de base normale» (NV 65) d'une part et de la «pression de référence  $q_{ref}$ » (ENV) d'autre part. Le tableau ci-dessous résume cette comparaison.

D'où le rapport moyen, pour la France métropolitaine :

$$\frac{\text{pression dynamique de base «normale» (NV 65)}}{\text{pression dynamique de référence (EC1)}} = 1,53$$

Cependant ces deux pressions dynamiques n'ont pas la même signification : l'une correspond à une vitesse de pointe (NV 65), l'autre à une vitesse moyenne (ENV). En outre, dans les vérifications aux E.L.U. (par exemple selon le fascicule des Directives Communes, le BAEI 91 et l'EC3/DAN chap. 2), les actions «normales» des NV 65 sont transformées en actions «nominales» par multiplication par un facteur 1,2 (cf. ci-dessus). Pour avoir un sens, la comparaison des «niveaux» de référence des NV 65 et de l'ENV doit porter sur :

- $1,2 \times$  pression dynamique de base «normale» (NV 65) d'une part,
- $2,35 \times$  pression dynamique de référence (ENV) d'autre part (cf. ci-dessus).

Le rapport moyen de ces deux termes, pour la France métropolitaine, devient :

$$\frac{\text{niveau de référence NV 65}}{\text{niveau de référence ENV}} = 1,53 \cdot \frac{1,2}{2,35} = 0,78$$

En d'autres termes, l'ENV est a priori plus sévère que les Règles NV 65 d'environ 30 %, si on limite la comparaison au vent de référence (ou vent de «base») et aux cartographies associées. On verra cependant, dans le chapitre suivant, que la prise en compte dans l'ENV, de la rugosité réelle des sites de construction, corrige cet effet majorateur.

	Zone carte 1997				Région NV 65		
	1	2	3	4	I	II	III
Nombre de départements concernés	10	71,8	9,75	4,45	33,1	57	5,9
Pression dynamique (daN/m <sup>2</sup> )							
- de référence (ENV)	35,3	41,4	48	55,1			
- de base «normale» (NV 65)					50	70	90
Moyenne sur l'ensemble des départements (daN/m <sup>2</sup> )	42,07				64,33		

#### 4.2. – Coefficient d'exposition ( $C_e$ )

Le coefficient d'exposition  $C_e(z)$ , appliqué à  $q_{ref}$ , permet de passer de la pression dynamique **moyenne de référence**, correspondant aux conditions normales de mesures météorologiques<sup>3</sup>, à la pression dynamique de **pointe**, dans le site de construction et à la hauteur  $z$  au-dessus du sol. Il tient compte de la topographie du site de construction et de sa rugosité.

Il est donné par :

$$C_e(z) = C_r^2 C_t^2 + 7K C_r C_t$$

En site plat (ou de pente inférieure à 5 %), c'est-à-dire dans les cas courants,  $C_t = 1$ . Les cas de topographie marquée ne sont pas examinés ici.

Les paramètres  $K$  et  $C_r(z)$  dépendent de la rugosité du site. Dans les sites de très faible rugosité (bords de mer, de grands lacs, ...), le vent est plus fort, à tempête égale, que dans le site météorologique de référence. Les Règles NV 65 traduisent cet effet, sous l'appellation de « coefficient de site exposé ».

Dans les sites de forte rugosité (zones urbaines, industrielles, forestières), le vent est freiné par les obstacles au sol. Les Règles NV 65 ignorent cet effet réducteur des actions du vent.

Quatre types de rugosité sont considérés, dans l'ENV. Un site de construction est caractérisé par le type de rugosité régnant, dans la direction d'où vient le vent, sur au moins 1 km (2 km dans le cas d'un vent de mer). Ces types sont les suivants :

- I Mer ; lac ; terrains lisses sans obstacles ;
- II Campagne avec quelques haies, bâtiments agricoles ou arbres ;
- III Zones suburbaines ou industrielles ; forêts ;
- IV Zones urbaines (15 % au moins de la surface couverts de bâtiments de plus de 15 m de haut).

La figure 1 illustre le coefficient d'exposition  $C_e(z)$  en fonction du type de rugosité et de la hauteur considérée. Les courbes en tireté correspondent à la formulation de l'influence de la hauteur dans les Règles NV 65 et, dans le cas des sites en bord de mer, à cette formulation majorée du coefficient de site exposé de 1,3.

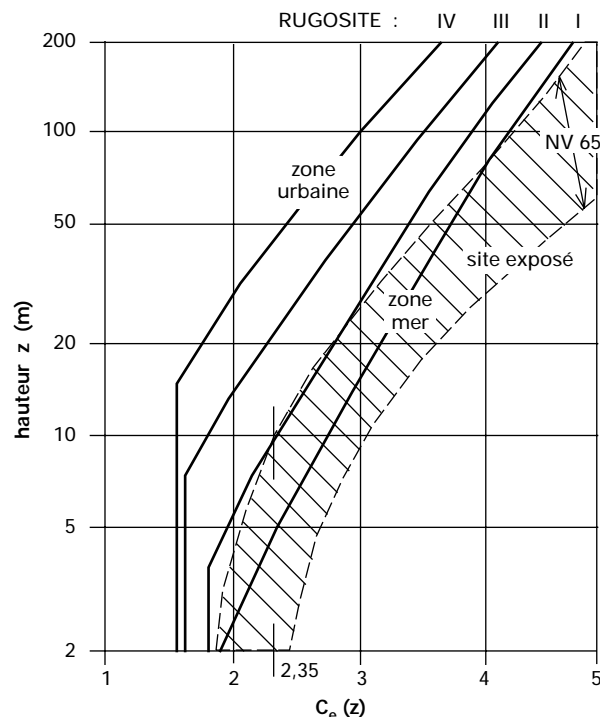


Fig. 1 – Coefficient d'exposition en fonction de la rugosité et de la hauteur au-dessus du sol

3. À 10 m du sol, en site plat et de faible rugosité (type « rase campagne », « aéroport »).

L'influence de la rugosité est importante : par exemple, à 20 m de hauteur, le coefficient d'exposition varie de 1,6 en zone urbaine à 3,2 en bord de mer, c'est-à-dire du simple au double. La figure permet également de comparer, sur ce point, l'ENV et les Règles NV 65. Ces dernières sont sensiblement supérieures à l'ENV, en ce qui concerne les constructions en bord de mer (comparer la courbe « NV 65 - site exposé » et la courbe relative à la rugosité de type I). Les Règles NV 65 conduisent à peu près aux mêmes valeurs que l'ENV pour les constructions en rase campagne ; mais, pour les constructions réalisées dans des zones urbaines, suburbaines ou industrielles, la prise en compte de la rugosité du terrain par l'ENV conduira à une réduction importante.

Une étude statistique de la rugosité des sites de construction (CETE, 1986), portant sur les bâtiments réalisés en 1984 et 1985 dans 7 départements, permet de préciser un peu la comparaison. Cette étude, antérieure à l'ENV portait sur une classification un peu différente de la rugosité, en 5 catégories au lieu de 4 pour l'ENV. On peut en tirer néanmoins les fréquences observées suivantes, pour chacune des 4 catégories de l'ENV (échantillon étudié : 1 454 bâtiments) :

- I (mer...) : 2 % des cas, pour les départements ayant une façade maritime ;
- II (campagne,...) : 66 % des cas ;
- III (zones suburbaines,...) : 27 % des cas ;
- IV (zones urbaines,...) : 7 % des cas.

Dans 1 cas sur 3 (catégories III et IV), la prise en compte de la rugosité du sol dans l'ENV conduit à une réduction de l'ordre de 30 % des charges dues au vent, par rapport aux NV 65 qui ignorent ce phénomène.

Dans 2 cas sur 3 (catégorie II), l'ENV et les NV 65 sont à peu près équivalents pour les constructions de hauteur courante. Une classification plus fine de la rugosité, en 5 catégories, serait préférable, au détriment cependant de la simplicité d'utilisation. Elle consisterait à subdiviser la catégorie II (campagne) en deux classes :

- la rase campagne, qui correspond habituellement aux sites des stations météorologiques (ex. : aéroports). Dans l'étude citée précédemment, ce cas représente 22 % des cas observés,
- une campagne plus rugueuse (avec des haies, vergers, petits bois, bocage, habitat dispersé) qui représente 44 % des cas observés.

Cette classification plus fine a été introduite dans le « Document d'application national » (DAN) français. Le DAN présente :

- une classification de la rugosité en 5 catégories,
- une définition plus précise de la classe de rugosité à considérer, en fonction de la hauteur de la construction,
- des illustrations par photographies aériennes des diverses classes de rugosité,
- une modélisation un peu plus favorable de la turbulence.

#### 4.3. – Coefficient de pression $C_p$

Les Règles NV 65 rassemblent un grand nombre de coefficients de pression, tous mesurés dans des souffleries de type aéronautique, en écoulement non turbulent. La simulation correcte du vent naturel, notamment du profil de vitesse moyenne

et des caractéristiques de la turbulence, adaptés aux divers types de rugosité, s'est beaucoup développée au cours des 30 dernières années avec l'apparition des souffleries dites « à couche limite turbulente » ou « atmosphérique ». Les coefficients de pression donnés dans l'ENV sont issus, pour la plupart, des mesures faites dans ces conditions.

Pour les bâtiments, l'ENV indique deux valeurs du coefficient de pression extérieure. L'une correspond aux actions locales, s'exerçant sur des éléments de paroi de moins de  $1 \text{ m}^2$ . L'autre est utilisée pour le calcul des actions sur des parois de plus de  $10 \text{ m}^2$ ; elle intègre un « effet de dimensions », traduit dans les règles NV 65 par le coefficient  $\delta$ .

### Pression intérieure

La pression aérodynamique à l'intérieur des constructions dépend de la perméabilité des parois. Le principe d'un calcul utilise la conservation du débit d'air traversant la construction : l'air peut être considéré comme incompressible et la somme des débits entrant est égale à la somme des débits sortant.

Pour les bâtiments courants, normalement fermés, la perméabilité à l'air des parois est faible et l'application du principe précédent permet de conclure à une pression intérieure faiblement négative ( $C_{pi} \approx -0,25$ ). En effet, si la façade « au vent » est en surpression ( $C_{pe} \approx -0,8$ ), les trois autres et la couverture sont plutôt en dépression ( $C_{pe} \approx -0,5$ ).

Cependant la répartition des perméabilités n'étant pas nécessairement homogène, les Règles NV 65 proposent d'examiner pour les constructions fermées deux cas de pression intérieure :

- une dépression ( $C_{pi} \approx -0,3$ ),
- une surpression ( $C_{pi} \approx +0,3$ ).

L'ENV est plus exigeant dans la mesure où il demande de considérer tous les cas d'ouvertures possibles, notamment le cas de fenêtres pouvant être ouvertes. Il est clair qu'une fenêtre laissée ouverte (ou brisée sous le choc de débris entraînés par le vent) impose à l'intérieur du local concerné une pression sensiblement égale à la pression extérieure c'est-à-dire :

$C_{pi} \approx +0,8$  si la fenêtre est située sur une façade « au vent »,

$C_{pi} \approx -0,5$  si elle est située sur une façade « sous le vent ».

Sur ce point, l'ENV peut paraître exagérément sévère. L'hypothèse est sans doute justifiée dans quelques cas, par exemple de halls industriels dont les portes peuvent être ouvertes, au moins momentanément, les jours de tempête. Mais dans la plupart des cas (habitations, bureaux...) toutes les ouvertures sont normalement fermées, par vent fort. Le risque de rupture des fenêtres, directement ou sous l'impact de débris, est certainement plus grand à l'occasion des tempêtes. C'est même un risque important pour les constructions basses, dans les régions sujettes aux cyclones tropicaux (DOM-TOM); et il est conseillé de s'en protéger par des fermetures provisoires appropriées (panneaux de bois, par exemple). Mais la règle générale est que les bâtiments fermés... le restent, même par vent fort.

Il a été proposé en France, il y a quelques années, de traiter cette question dans le cadre des vérifications sous charges accidentelles, c'est-à-dire avec un coefficient de pondération  $\gamma = 1$ ; autrement dit, de vérifier, sans « marge » de sécurité, que la construction conserve normalement sa stabilité, même dans l'hypothèse peu probable d'ouvertures accidentelles. Cette question est traitée de cette façon dans le DAN français.

### Pression extérieure

Quel que soit le code considéré, NV 65 ou ENV, les coefficients de pression  $C_{pe}$  dépendent beaucoup de la forme du bâtiment considéré et de l'emplacement du point considéré sur ce bâtiment. En outre, l'aire de l'élément considéré intervient :

- dans l'ENV, par la valeur du coefficient de pression à retenir,
- dans les NV 65, par l'application du coefficient de « dimension »  $\delta$ .

### Comparaison avec NV 65

Une comparaison exhaustive des deux codes, NV 65 et ENV, n'est pas possible. Nous considérons seulement deux cas d'actions du vent sur les enveloppes, sans tenir compte de la pression interne évoquée précédemment :

- 1 - un élément de façade,
- 2 - un élément de couverture.

#### 1 - Élément de façade

Le bâtiment étudié (fig. 2) est de section rectangulaire (dimensions :  $a$  (perpendiculairement au vent)  $\times b$ ), de hauteur  $h$  comprise entre  $0,5a$  et  $2,5a$ .

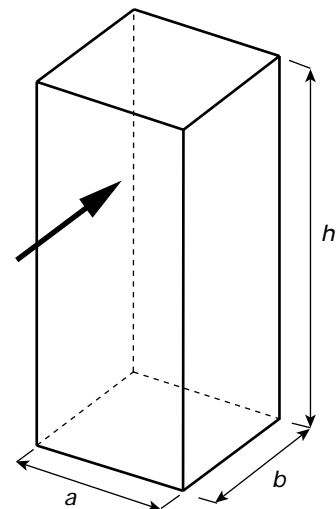


Fig. 2

Deux types d'élément de façade seront considérés :

- A - un « petit » élément :  $0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m}$ ,
- B - un « grand » élément :  $3,1 \text{ m} \times 3,1 \text{ m}$  (aire égale à  $10 \text{ m}^2$ ).

Dans l'ENV, le coefficient de pression  $C_{pe}$  dépend de l'aire de l'élément : deux valeurs sont indiquées dans ce code, l'une pour des éléments de moins de  $1 \text{ m}^2$  (cas A), l'autre pour des éléments de plus de  $10 \text{ m}^2$  (cas B). Les cas intermédiaires sont traités par interpolation.

Dans les règles NV 65, le coefficient de dimension  $\delta$ , fonction des dimensions de l'élément, module la pression extérieure : c'est pourquoi la figure 3 compare le coefficient de pression  $C_{pe}$  de l'ENV au produit  $\delta \cdot C_{pe}$  des NV 65.

Par rapport aux règles NV 65, l'ENV majore un peu les surpressions (10 % pour les éléments de façade de « grande » dimension, 25 % localement pour les très petits éléments; la majoration est nettement plus sensible en dépression (10 à 30 % près des angles, là où seront observées les fortes dépressions; 80 à 100 % en partie courante des façades en dépression).

#### 2 - Élément de couverture

Le bâtiment étudié est un hall industriel de  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  en plan et  $7 \text{ m}$  de hauteur, avec une couverture à faible pente (2 versants de pente égale à  $4^\circ$ ), munie d'acrotères de  $0,7 \text{ m}$  de hauteur.

Là encore, deux éléments sont considérés, de même aire que précédemment (cas A et cas B).

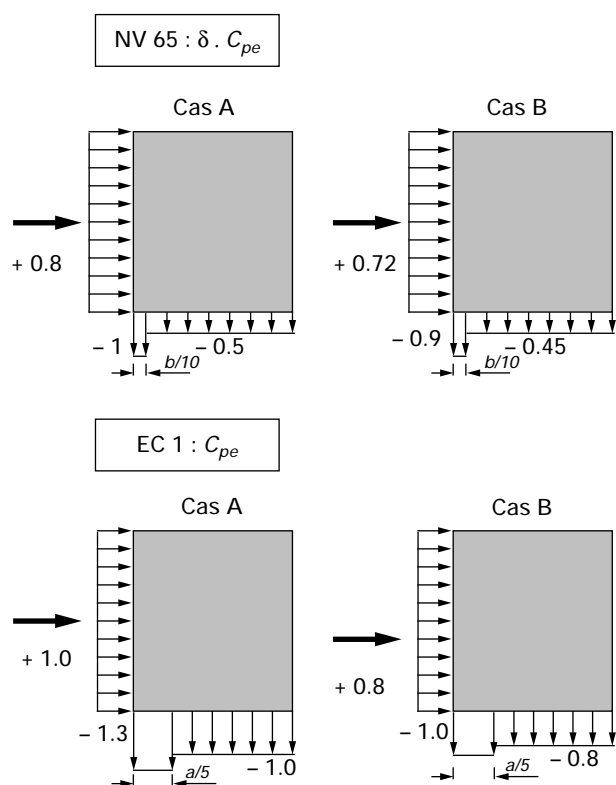


Fig. 3 – Élément de façade

La figure 4 présente, comme précédemment, le produit  $(\delta \cdot C_{pe})$  pour les NV 65 et le coefficient  $C_{pe}$  adapté aux dimensions de l'élément considéré (A ou B) dans le cas de l'ENV.

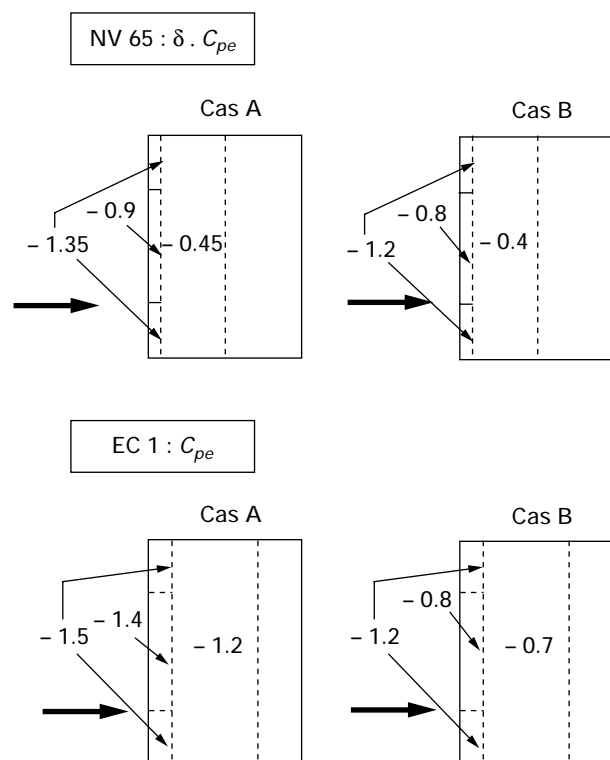


Fig. 4 – Élément de couverture

Par rapport aux règles NV 65, l'ENV majore sensiblement, en général, les dépressions locales, sur les bords et aux angles de toiture; la majoration est particulièrement forte en partie courante de la couverture.

## 5. – ACTIONS D'ENSEMBLE

### 5.1. – Principes

Les forces aérodynamiques s'exerçant sur une structure ou élément de structure peuvent être calculées selon l'une des deux méthodes suivantes :

**a) calcul de forces «globales»**, selon l'expression

$$F_w = q_{ref} \cdot C_e(z_e) \cdot C_f \cdot C_d \cdot A_{ref}$$

Dans cette formulation,  $q_{ref}$  et  $C_e(z_e)$  ont déjà été définis. La hauteur de référence  $z_e$  pour le calcul du coefficient d'exposition et l'aire de référence  $A_{ref}$  (généralement le maître-couple) sont associés au coefficient de force  $C_f$  et, par conséquent, sont définis en même temps que lui.

Le coefficient dynamique  $C_d$  traduit à la fois l'effet réducteur dû à l'imparfaite corrélation des pressions aérodynamiques (l'effet des « dimensions » des Règles NV 65) et l'effet majorateur dû à la réponse dynamique « résonante » des structures lorsque leurs modes propres ont des fréquences assez basses pour être excités par la turbulence.

**b) sommation des effets des pressions** s'exerçant sur les parois, pour les constructions modérément sensibles aux effets dynamiques. Pour une construction verticale, la force  $F_{wj}$  s'exerçant sur l'élément  $j$  est donnée par :

$$F_{wj} = q_{ref} \cdot C_e(Z_j) \cdot C_d \cdot C_{fj} \cdot A_j$$

où :

$C_{fj}$  est le coefficient de force de l'élément  $j$ ;

$A_j$  est l'aire de référence associée à ce coefficient;

$Z_j$  est la hauteur du barycentre de l'aire  $A_j$ .

*Note* : le coefficient dynamique  $C_d$  est bien entendu le même dans ces deux approches.

### Effets de torsion

Même dans le cas de constructions symétriques, soumises à un vent soufflant dans le plan de symétrie, la force aérodynamique résultante ne s'exerce pas, en général, dans le plan de symétrie. Les pressions fluctuantes qui s'exercent sur les différentes parties de la construction ne sont pas parfaitement corrélées et n'atteignent donc pas leurs valeurs extrêmes simultanément.

L'ENV propose une règle simple pour estimer les effets de torsion qui en résultent; elle consiste à appliquer la force  $F_w$  avec une excentricité égale à 10 % de la dimension latérale de la construction. Cette règle est sans équivalent dans les Règles NV 65.

### Forces de frottement (ou d'entraînement)

Les constructions ayant de grandes parois parallèles au vent (par exemple, grandes couvertures isolées) subissent des forces de frottement tangentielles qui peuvent être significatives. Ces forces  $F_{fr}$  sont données par :

$$F_{fr} = q_{ref} \cdot C_e(Z_e) \cdot C_{fr} \cdot A_{fr}$$

où

$A_{fr}$  est l'aire balayée par le vent ;

$C_{fr}$  est un coefficient de frottement, égal à 0,01, 0,02 ou 0,04 selon la rugosité de la paroi. Les Règles NV 65 indiquent les mêmes valeurs, en les associant cependant à des classes de rugosité de surface un peu différentes.

## 5.2. – Coefficient dynamique $C_d$

L'ENV distingue deux cas, pour le calcul du coefficient dynamique  $C_d$  et propose deux procédures.

La **procédure simple** s'applique aux constructions peu ou pas sensibles à l'effet dynamique «résonant». L'utilisation de cette procédure est subordonnée au respect de critères simplifiés (dimensions ; matériau de structure) ; la grande majorité des constructions satisfait à ces critères (bâtiments et cheminées jusqu'à 200 m de hauteur ; ponts routiers ou de chemin de fer jusqu'à 200 m de portée en service<sup>4</sup> ; passerelles pour piétons jusqu'à 30 m de portée). Des abaques permettent de lire la valeur du coefficient dynamique  $C_d$  en fonction de la hauteur et de la largeur, et du type de construction et de matériau (béton, acier, mixte). Ces abaques ont été obtenus par application de la procédure détaillée aux cas considérés, sur la base d'hypothèses (vitesse du vent, rugosité du terrain, amortissement, ...) plutôt «sécuritaires». La figure 5 illustre le cas de bâtiments en acier.

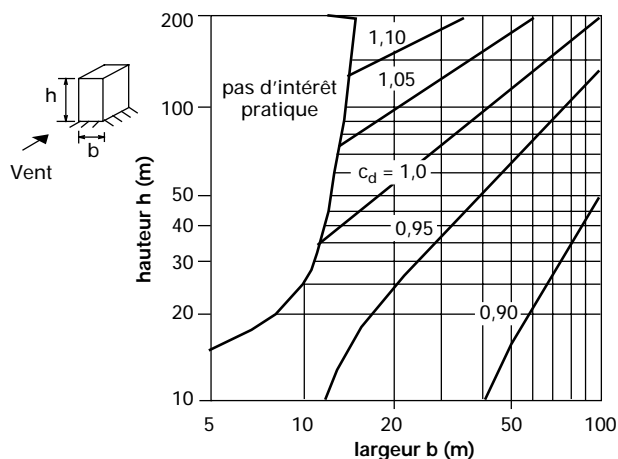


Fig. 5 – Coefficient dynamique pour un bâtiment en acier

La **procédure détaillée** décrit la méthode de calcul du coefficient dynamique  $C_d$ , en fonction de l'intensité de turbulence, des caractéristiques géométriques de la construction et de ses caractéristiques dynamiques (fréquence propre et amortissement). Le projet d'ENV traduit globalement dans le coefficient dynamique  $C_d$  ce que les Règles NV 65 traitent séparément : l'effet de dimensions (coefficient de réduction  $\delta$ ) et l'effet dynamique (coefficient  $\beta$ ).

### Comparaison avec les Règles NV 65

La partie des Règles NV 65 traitant des effets dynamiques est tirée d'une norme soviétique antérieure à 1965. Depuis cette époque, la connaissance de ces phénomènes s'est beaucoup améliorée. Les méthodes de calcul modernes reposent sur les mêmes principes de mécanique aléatoire mais utilisent une modélisation plus fine de la turbulence et de ses effets.

4. Cette valeur limite est peut-être à reconsidérer dans le cas de l'ouvrage en construction.

Il n'est pas possible d'établir une comparaison exhaustive des méthodes exposées dans les NV 65 et l'ENV : malgré les hypothèses simplificatrices introduites, ces méthodes font intervenir un trop grand nombre de paramètres. Nous traitons cependant ci-dessous quelques exemples :

- deux bâtiments-tours, de 48 m et 110 m de hauteur,
- deux cheminées, l'une en béton armé de 110 m de hauteur, l'autre en acier de 68 m de hauteur.

Trois de ces quatre exemples, (le premier et les deux derniers) sont traités à l'Annexe 8 des Règles NV 65.

Le coefficient  $C_d$  de l'ENV intègre l'effet de dimensions et l'effet dynamique proprement dit. Dans la procédure détaillée, il dépend de la vitesse du vent et de l'intensité de turbulence, par conséquent de la rugosité du sol. Dans les exemples qui suivent, les quatre catégories seront considérées.

Les Règles NV 65 traduisent séparément les effets de dimensions et dynamique, par les coefficients  $\delta$  et  $\beta$  qui dépendent de la hauteur au-dessus du sol.

Dans les exemples qui suivent, nous avons choisi de comparer le coefficient  $C_d$  (ENV) et le produit  $\delta \cdot \beta$  (NV 65), pour le moment fléchissant à la base.

#### a) Bâtiment-tour de 48 m de hauteur en béton armé

Le contreventement est assuré par un noyau central en béton armé. Les dimensions horizontales sont  $a = b = 17$  m ; période propre : 1,05 s en flexion.

Rugosité	ENV : $C_d$		NV 65 : $\delta \cdot \beta$
	Méthode détaillée	Méthode simplifiée	
I	0,96	0,96	0,86
II	0,94		
III	0,90		
IV	0,86		

Dans l'ENV, les abaques de la procédure simplifiée ont été établis pour le cas le plus sévère (rugosité I «mer»). Avec cette procédure, l'ENV est plus sévère que les NV 65 d'environ 12 %.

#### b) Bâtiment-tour de 108 m de hauteur, en béton armé

Dimension horizontale :  $b = 32$  m dans la moitié supérieure, période propre 1,3 s.

Rugosité	ENV : $C_d$		NV 65 : $\delta \cdot \beta$
	Méthode détaillée	Méthode simplifiée	
I	0,91	0,97	1,10
II	0,89		
III	0,86		
IV	0,82		

La méthode simplifiée de l'ENV est ici pénalisante par rapport à la méthode détaillée, même pour la rugosité I. Cette méthode simplifiée repose sur une estimation empirique de la



fréquence propre, qui ne tient compte que de la hauteur. Dans l'exemple traité par la méthode détaillée nous avons utilisé une estimation plus exacte de la fréquence propre (0,75 Hz contre 0,43 Hz selon l'estimation empirique).

Dans cet exemple, les NV 65 sont plus sévères que l'ENV, de 13 % pour la méthode simplifiée, de 21 % à 34 % selon la rugosité pour la méthode détaillée.

#### c) Cheminée en béton de 110 m de hauteur

Dimension horizontale : 16,7 m à la base - 6,8 m au-dessus de 20 m, période propre : 2,5 s.

Rugosité	ENV : $C_d$		NV 65 : $\delta \cdot \beta$
	Méthode détaillée	Méthode simplifiée	
I	1,22	sans objet	1,30
II	1,23		
III	1,22		
IV	1,18		

La méthode simplifiée de l'ENV n'est pas applicable à l'exemple traité. Les Règles NV 65 sont un peu plus sévères (7 % environ) que l'ENV.

#### d) Cheminée en acier de 68 m de hauteur

Dimensions horizontales : 5,7 m à la base - 3,45 m au-dessus de 27 m, période propre : 0,9 s.

Rugosité	ENV : $C_d$		NV 65 : $\delta \cdot \beta$
	Méthode détaillée	Méthode simplifiée	
I	1,08	env. 1,15	1,16
II	1,08		
III	1,05		
IV	1,01		

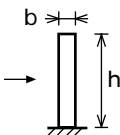
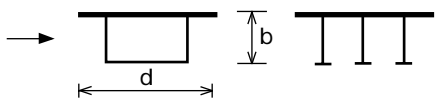
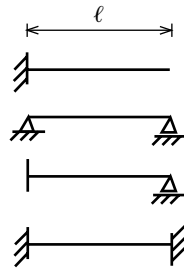
Les Règles NV 65 sont plus sévères que l'ENV méthode détaillée, de 7 à 15 % selon la rugosité.

### 5.3. – Détachement tourbillonnaire, instabilité aéroélastique et phénomènes dynamiques d'interférence

Les structures élancées peuvent être sujettes à des phénomènes vibratoires et d'instabilité aéroélastique (cf. chapitre 2). L'ENV indique des critères qui, s'ils sont satisfaits, permettent d'éviter de considérer ces phénomènes. Ces critères sont les suivants :

TABLEAU

*Critères de sensibilité des ponts aux détachements tourbillonnaires, phénomènes de galop classique, phénomènes de galop d'interférence et phénomènes de flottement*

	Structures insensibles si :			
Structures élancées : cheminées, mâts, tours	<div></div> <div><math>h/b &lt; 8</math></div>			
Ponts				
<div></div>	<div><math>\ell \leq 200 \text{ m}</math></div>			
Types d'appuis vis-à-vis d'efforts horizontaux		<div><math>d/b \leq 5</math></div>	<div><math>5 &lt; d/b &lt; 10</math></div>	<div><math>d/b \geq 10</math></div>
<div></div>	<div><math>l/b</math></div>	<div>8</div> <div>16</div> <div>24</div> <div>32</div>	<div>Interpolation linéaire</div>	<div>14</div> <div>29</div> <div>44</div> <div>58</div>

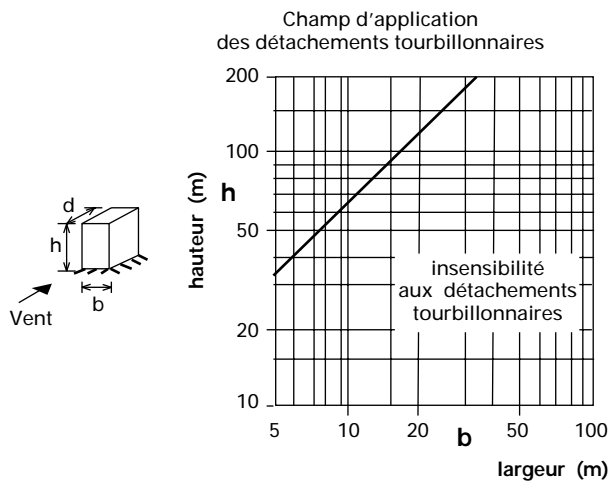


Fig. 6 – Critère de sensibilité des bâtiments aux détachements tourbillonnaires et aux phénomènes de galop classique

Dans le cas où ces critères ne sont pas satisfaits, des méthodes sont proposées (Annexe C) pour calculer :

- les effets du détachement tourbillonnaire (« tourbillons alternés »)<sup>5</sup>. La méthode, itérative, tient compte des phénomènes aéroélastiques associés que l'on observe dans le cas de grandes amplitudes d'oscillation de la structure. Elle permet de calculer l'amplitude maximale d'oscillation, les forces statiques équivalentes pour le calcul des sollicitations et le nombre de cycles de contrainte à considérer dans les vérifications à la fatigue. Les Règles NV 65 proposent également (Annexe 8) une méthode de calcul de ces effets ; mais cette méthode, ancienne, conduit à sous estimer largement ce phénomène ;
- la **vitesse critique de « galop »** en flexion latérale des structures souples ;
- la **vitesse critique de « galop d'interférence »**, lorsque plusieurs structures souples sont proches les unes des autres ;
- la **vitesse critique de « divergence »** en torsion.

**Note :** les phénomènes de galop simple ou d'interférence, et de divergence ne sont pas considérés dans les Règles NV 65.

## 6. – CONCLUSION

Nous nous sommes efforcés, dans cette présentation rapide du projet d'ENV d'indiquer quelques éléments de comparaison avec les Règles NV 65 actuellement en vigueur.

Il est clair que l'ENV majore très sensiblement le niveau du vent de référence. La prise en compte de l'effet réducteur de la forte rugosité du sol dans les zones construites compense cette majoration. Au total, pour ces deux aspects, il en résultera une meilleure répartition, à niveau moyen égal, de la sécurité des constructions.

Pour les bâtiments courants, les coefficients de pression de l'ENV sont plus élevés que ceux des règles NV 65.

Il est évident qu'une analyse plus détaillée devra être entreprise si l'on veut se faire une idée plus exacte de l'impact du futur ENV sur la construction en France, en termes de sécurité et d'économie.

## ANNEXE : VENT DE RÉFÉRENCE EN FRANCE

**Note préliminaire :** La carte ci-jointe a été établie sur la base des documents discutés lors de la réunion du 20 avril 1994 de la Commission P06A (Bases de calcul des structures), de CGN Bât-DTU et du groupe de travail du fascicule 61 du CCTG-Titre IV Section I - (Actions du vent sur les constructions) ; elle traduit les observations formulées et les décisions prises lors de cette réunion.

### Définition de la vitesse du vent de référence (rappel)

L'ENV définit la vitesse du vent de référence  $V_{ref}$  comme la vitesse moyenne sur 10 minutes mesurée à 10 m de hauteur au-dessus du sol, dans un site de rugosité catégorie II (rase campagne, paramètre de rugosité  $z_0 = 0,05$  m) et dont la probabilité annuelle de dépassement est égale à 0,02 (période de retour égale à 50 ans).

### Carte du vent de référence

La France métropolitaine et les Départements d'Outre-Mer sont divisés en 5 zones définies par la carte ci-jointe et, plus précisément, selon les limites administratives départementales et éventuellement cantonales.

La vitesse du vent de référence dans chacune des zones est la suivante :

#### Aude :

- zone 4, pour les cantons suivants : Coursan, Durban-Corbières, Ginestas, Lézignan-Corbières, Narbonne, Sigean
- zone 3, pour les cantons suivants : Capendu, Lagrasse, Moutoumet, Peyriac-Minervois, Touchan
- zone 2, pour les cantons

#### Bouches-du-Rhône :

- zone 3, pour les cantons suivants : Arles, Châteaurenard, Peyrolles-en-Provence, Saintes-Maries-de-la-Mer, Saint-Rémy-de-Provence, Tarascon
- zone 4, pour les autres cantons

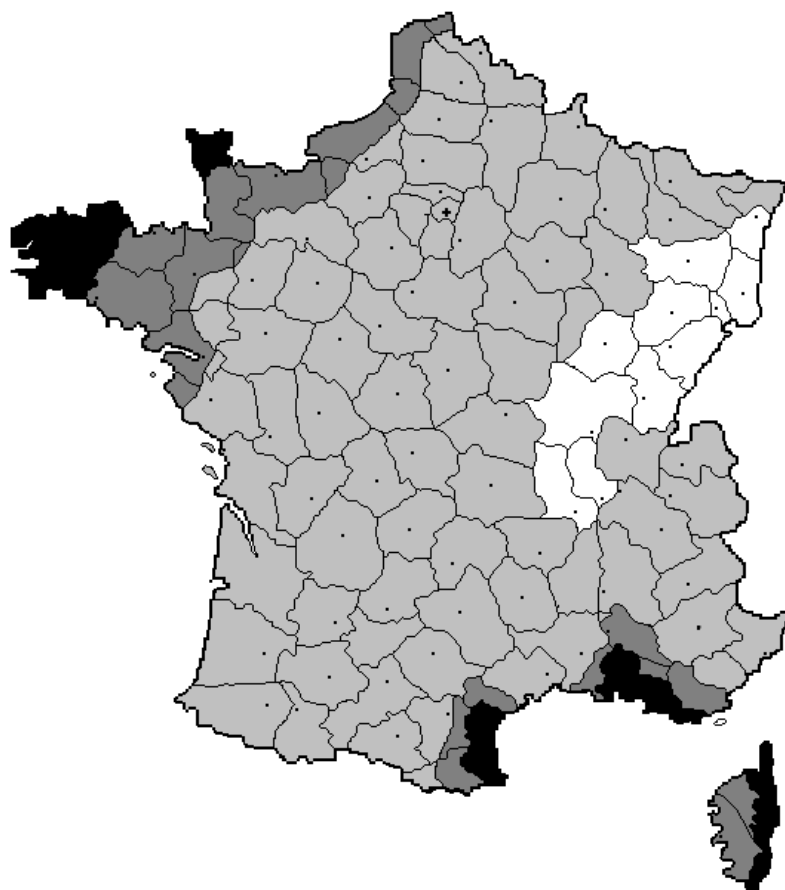
#### Haute-Corse :

- zone 3, pour les cantons suivants : Belgodère, Calacuccia, Calenzana, Calvi, Corte, Ile-Rousse, Morosaglia, Venaco
- zone 4, pour les autres cantons

#### Corse du Sud :

- zone 4, pour les cantons suivants : Bonifacio, Figari, Levie, Porto-Vecchio
- zone 3, pour les autres cantons

5. Méthode proposée par H. Ruschweyh.



\* Cette carte est donnée à titre indicatif mais n'a pas de caractère contractuel.  
Pour préciser les limites des zones, reportez vous à la liste des cantons ci-jointe.

zones	1	2	3	4	5
$V_{ref}$ (m/s)(à 10 m)	24	26	28	30	34

Zone	Définition des zones par départements (Découpage Eurocode 1 - version mars 1998).	$V_{ref,0}$ m/s
1	Côte-d'Or(*), Doubs, Jura, Loire, Bas-Rhin(*), Haut-Rhin, Rhône, Haute-Saône, Saône-et-Loire, Vosges, Belfort (Territoire), Guyane	24
2	Ain, Aisne, Allier, Alpes de Haute-Provence, Hautes-Alpes, Alpes-Maritimes, Ardèche, Ardennes, Ariège, Aube, Aude(*), Aveyron, Cantal, Charente, Charente-Maritime, Cher, Corrèze, Côte-d'Or(*), Creuse, Dordogne, Drôme, Eure(*), Eure-et-Loir, Gard, Haute-Garonne, Gers, Gironde, Hérault(*), Ile-et-Vilaine(*), Indre, Indre-et-Loire, Isère, Landes, Loir-et-Cher, Haute-Loire, Loire-Atlantique, Loiret, Lot, Lot-et-Garonne, Lozère, Maine-et-Loire, Marne, Haute-Marne, Mayenne, Meurthe-et-Moselle, Meuse, Moselle, Nièvre, Nord(*), Oise, Orne, Pas-de-Calais(*), Puy-de-Dôme, Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Pyrénées-Orientales(*), Bas-Rhin(*), Sarthe, Savoie, Haute-Savoie, Seine-Maritime(*), Deux-Sèvres, Somme(*), Tarn, Tarn-et-Garonne, Var(*), Vaucluse(*), Vendée(*), Vienne, Haute-Vienne, Yonne, Région Ile-de-France	26
3	Aude(*), Bouches-du-Rhône(*), Calvados, Haute-Corse(*), Corse-Sud(*), Côte d'Armor(*), Eure(*), Hérault(*), Ile-et-Vilaine(*), Loire-Atlantique(*), Manche(*), Morbihan(*), Nord(*), Pas-de-Calais(*), Pyrénées-Orientales(*), Seine-Maritime(*), Somme(*), Var(*), Vaucluse(*), Vendée(*)	28
4	Aude(*), Bouches-du-Rhône(*), Haute-Corse(*), Corse-Sud(*), Côtes-d'Armor(*), Finistère, Manche(*), Morbihan(*), Pyrénées-Orientales(*), Var(*), Vaucluse(*), Saint-Pierre-et-Miquelon	30
5	Guadeloupe, Martinique, Réunion, Mayotte	34
(*) Pour une partie du département. <b>Départements appartenant à plusieurs zones : découpage selon les cantons (*)</b>		

**Côte d'Or :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Aignay-le-Duc, Baigieux-les-Juifs, Châtillon-sur-Seine, Laignes, Montbard, Montigny-sur-Aube, Précy-sous-Thil, Recy-sur-Ource, Saulieu, Semur-en-Auxois, Venarey-les-Laumes, Vitteaux
- zone 1, pour les autres cantons

**Côte d'Armor :**

- zone 4, pour les cantons suivants :  
Bégard, Belle-Isle-en-Terre, Bourbriac, Callac, Gouarec, Guingamp, Lannion, Lanvollon, Lézardrieux, Maël-Carhaix, Paimpol, Perros-Guirec, Plestin-les-Grèves, Plouagat, Plouaret, Plouha, Pontrieux, Roche-Derrien (La), Rostrenen, Saint-Nicolas-du-Pélem, Tréguier
- zone 3, pour les autres cantons

**Eure :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Beuzeville, Cormeilles, Pont-Audemer, Quilleboeuf-sur-Seine, Saint-Georges-du-Viévre, Thiberville
- zone 2, pour les autres cantons

**Hérault :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Béziers, Capestang, Olonzac, Saint-Chinian, Saint-Pons-de-Thornières
- zone 2, pour les autres cantons

**Ile-et-Vilaine :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Argentré-du-Plessis, Bain de Bretagne, Châteaubourg, Grand-Fougeray, La Guerche-de-Bretagne, Janze, Retiers, Le Sel-de-Bretagne, Vitré (tous cantons)
- zone 3, pour les autres cantons

**Loire-Atlantique :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Aigrefeuille-sur-Maine, Ancenis, Châteaubriant, Clisson, Derval, Ligné, Moisdon-la-Rivière, Nort-sur-Erdre, Nozay, Riaillé, Rougé, Saint-Julien-de-Vouvantes, Saint-Mars-la-Jaille, Vallet, Varades
- zone 3, pour les autres cantons

**Manche :**

- zone 4, pour les cantons suivants :  
Barneville-Carteret, Beaumont, Bricquebec, Cherbourg, Equeurdreville-Hainneville, Montebourg, Octeville, Pieux (Les), Quettehou, Sainte-Mère-l'Eglise, Saint-Pierre-Eglise, Saint-Sauveur-le-Vicomte, Tourlaville, Valognes
- zone 3, pour les autres cantons

**Morbihan :**

- zone 4, pour les cantons suivants :  
Faouët (Le), Guémené-sur-Scorff, Gourin
- zone 3, pour les autres cantons

**Nord :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Bergues, Bourbourg, Coudekerque-Branche, Dunkerque (tous cantons), Grande-Synthe, Graveline, Hondschoote, Wormhout
- zone 2, pour les autres cantons

**Pas-de-Calais :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Ardres, Audruicq, Berck, Boulogne-sur-Mer (tous cantons), Calais (tous cantons), Campagne-lès-Hesdin, Desvres, Etaples, Guines, Hucqueliers, Marquise, Montreuil, Outreau, le Portel, Samer
- zone 2, pour les autres cantons

**Pyrénées-Orientales :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Mont-Louis, Olette, Sallégouse
- zone 3, pour les cantons suivants :  
Arles-sur-Tech, Céret, Prades, Prats-de-Mollo-la-Preste, Saint-Paul-de-Fenouillet, Sournia, Vinça
- zone 4, pour les autres cantons

**Bas-Rhin :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Bischwiller, Bouxwiller, Drulingen, Haguenau, Lauterbourg, Marmoutier, Niederbronn-les-Bains, Petite-Pierre (La), Sarre-Union, Saverne, Seltz, Soultz-sous-Forêts, Wissembourg, Woerth
- zone 1, pour les autres cantons

**Seine-Maritime :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Bacqueville-en-Caux, Bellecombe, Blangy-sur-Bresle, Bolbec, Cany-Barville, Caudebec-en-Caux, Criquetot-l'Esneval, Dieppe (tous cantons), Doudeville, Envermeu, Eu, Fauville-en-Caux, Fécamp, Fontaine-le-Dun, Goderville, Gonfreville-l'Orc, le Havre (tous cantons), Lillebonne, Londinières, Longueville-sur-Scie, Montivilliers, Offranville, Ourville-en-Caux, Pavilly, Saint-Romain-de-Colbosc, Saint-Valéry-en-Caux, Tôtes, Valmont, Yerville, Yvetot
- zone 2, pour les autres cantons

**Somme :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Abbeville (tous cantons), Ailly-le-Clocher, Ault, Crécy-en-Ponthieu, Friville-Escarbotin, Gamaches, Hallencourt, Moyenneville, Novion, Rue, Saint-Valéry-sur-Somme
- zone 2, pour les autres cantons

**Var :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Aups, Callas, Comps-sur-Artuby, Draguignan, Fayence, Fréjus, Muy (Le), Saint-Raphaël, Salernes, Tavernes
- zone 3, pour les cantons suivants :  
Barjols, Besse-sur-Issole, Brignoles, Collobrières, Cotignac, Cuers, Grimaud, Lorgues, Luc (Le), Rians, Roquebrussanne (La), Saint-Tropez
- zone 4, pour les autres cantons

**Vaucluse :**

- zone 2, pour les cantons suivants :  
Bollène, Valréas
- zone 4, pour les cantons suivants :  
Bonnieux, Cadenet, Cavaillon, L'Isle-sur-la-Sorgue, Pernes-les-Fontaines
- zone 3, pour les autres cantons

**Vendée :**

- zone 3, pour les cantons suivants :  
Beauvoir-sur-Mer, Challans, Noirmoutier-en-l'Ile, Palluau, Port Joinville, Saint-Gilles-Croix-de-Vie, Saint-Jean-de-Monts
- zone 2, pour les autres cantons