



HAL
open science

Conception paracyclonique

Christian Barré, Alexandre de La Foye, Sophie Moreau

► **To cite this version:**

Christian Barré, Alexandre de La Foye, Sophie Moreau. Conception paracyclonique : À l'usage des architectes et ingénieurs. 2011. hal-02327299

HAL Id: hal-02327299

<https://hal.science/hal-02327299>

Submitted on 22 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

**LES GRANDS ATELIERS
DE L'ISLE D'ABEAU**

**BOULEVARD DE VILFONTAINE
BP 43, 38092 VILFONTAINE CEDEX**

T. +33 (0)4 74 96 88 70

F. +33 (0)4 74 96 88 71

www.lesgrandsateliers.fr

ISBN 978-2-913962-13-2

ISSN 2111-6792

CONCEPTION PARACYCLONIQUE

**A l'usage des architectes
et ingénieurs**



les
**grands
ateliers**

de l'Isle d'Abreau

Christian Barré
Alexandre de la Foye
Sophie Moreau

**CONCEPTION
PARACYCLONIQUE**

**A l'usage des architectes
et ingénieurs**

Christian Barré
Alexandre de la Foye
Sophie Moreau

REMERCIEMENTS

S'adressant aux architectes et ingénieurs, enseignants et professionnels, ainsi qu'aux étudiants et chercheurs, la collection des cahiers édités par les Grands Ateliers constitue un ensemble de référence des connaissances nécessaires à la conception, la construction et la protection des édifices et des villes contre les phénomènes naturels.

Cette collection a été développée depuis 2003 avec l'aide du Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement. Aux cahiers parasismiques, œuvre de Milan Zacek et Patricia Balandier, fait suite aujourd'hui le cahier paracyclonique rédigé par Alexandre de la Foye, Sophie Moreau et Christian Barré.

La collection s'inscrit dans le cadre d'un programme d'action confié aux Grands Ateliers pour améliorer l'enseignement des concepts et des méthodes de la conception et de la construction vis-à-vis des risques majeurs (séisme, cyclone...) au sein des formations initiales des divers intervenants de l'acte de construire.

Elle est publiée par les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau, groupement d'établissements d'enseignement supérieur d'architecture, d'ingénierie, d'art et de design, destiné à faire progresser la formation et la recherche sur la construction et les matériaux.

Nous remercions le MEDDTL pour son appui, les auteurs pour leur contribution à la collection, les Grands Ateliers et leur chef de projet du pôle risques majeurs, Georgia Poursoulis pour la coordination et la relecture de l'ouvrage.

SOMMAIRE

PREAMBULE	4
1. CONTEXTE	5
2. PHÉNOMÈNE CYCLONIQUE	
2.1. Introduction	7
2.2. Formation des cyclones	8
2.2.1. Définition des paramètres météorologiques	8
2.2.2. Conditions de formation des cyclones	9
2.2.3. Mécanismes de formation des cyclones	9
2.2.4. Structure d'un cyclone	12
2.2.5. Trajectoire du cyclone	13
2.2.6. Effets du cyclone	13
2.2.7. Mort du cyclone	15
3. AERODYNAMIQUE DU BATIMENT	
3.1. Préambule	16
3.2. La couche limite atmosphérique	16
3.3. Notions sur les écoulements aérauliques	17
3.4. Notions sur les charges aérodynamiques	19
4. CONCEPTION PARACYCLONIQUE	
4.1. Influence du site	21
4.1.1. Bassins cycloniques	21
4.1.2. Topographie de macro-échelle	22
4.1.3. Topographie locale	23
4.1.4. Proximité du littoral, des cours d'eau et des talwegs	25
4.1.5. Environnement immédiat	25
4.2. Conception du bâtiment	28
4.2.1. Réduction des charges aérodynamiques	28
4.2.1.1. Clôtures et talus	28
4.2.1.2. Impact de la morphologie globale de la construction : plans, volumes, extensions	29
4.2.1.3. Influence de la toiture	32
4.2.1.4. Conception en vue de la réduction des charges résultantes	35
4.2.1.5. Les espaces intermédiaires, vérandas et auvents	39

4.2.2.	Exemples d'applications du puits d'équilibrage des pressions à différentes échelles	41
4.2.3.	Protection des constructions existantes	45
4.3.	Amélioration de la résistance	47
4.3.1.	Principes de contreventement	47
4.3.2.	Les fondations	52
4.3.3.	Planchers et dallages	55
4.3.4.	Murs en maçonnerie	56
4.3.5.	Chainages et rampants	58
4.3.6.	Soubassements/crués	59
4.3.7.	Soutènements/crués	60
4.3.8.	Charpentes en bois	60
4.3.9.	Couvertures en tôle ondulée ou nervurées	61
4.3.10.	Menuiseries	63
4.4.	Méthodes de dimensionnement	63
4.4.1.	Approche réglementaire eurocode 1	63
4.4.1.1.	Cadre général de l'eurocode 1	63
4.4.2.	Approche de simulation	67
4.4.2.1.	Simulation à échelle réduite	67
4.4.2.1.1.	Simulation de la couche limite atmosphérique	67
4.4.2.1.2.	Les similitudes	68
4.4.2.1.3.	Extrapolation des mesures à la vraie grandeur	71
4.4.2.1.4.	Métérologie	72
4.4.2.1.5.	Simulation des effets dynamiques et métérologie associée	76
4.4.3.	Evaluation des charges cycloniques	80
5.	STRATÉGIES COMPORTEMENTALES EN CAS D'ALERTE CYCLONIQUE	93
6.	CONCLUSION	94
7.	BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES	95
8.	NOTES	97

Résister aux efforts majeurs qu'un cyclone applique à l'enveloppe et à la structure d'un bâtiment est chose relativement accessible si l'on ne se limite ni sur les sections de ferrailage, ni sur l'épaisseur de béton. Construire au plus juste, de manière réaliste et optimisée économiquement requiert en revanche une compréhension des phénomènes pour s'adapter à la contrainte et proposer une architecture moins sensible au vent.

Au cours du XX^e siècle les aérodynamiciens se sont intéressés aux effets du vent sur les constructions. Ils ont développé des outils de simulation physique (les souffleries) et ont proposé des modélisations des phénomènes.

Le présent document est construit à partir de résultats d'études obtenus notamment lors de simulations physiques réalisées sur modèles réduits en soufflerie turbulente. Ces travaux ont permis de définir des concepts réducteurs de charge ainsi que des stratégies de sauvegarde.

Ce document est destiné aux acteurs de la maîtrise d'œuvre - ingénieurs et architectes - qui exercent dans des zones de climat tropical humide et qui sont confrontés aux problématiques inhérentes aux phénomènes cycloniques.

L'objectif de cet ouvrage est de familiariser le lecteur avec les principes aérodynamiques qui entrent en jeu dans l'effet du vent sur les constructions et de lui transmettre les connaissances de base requises pour la conception d'une architecture adaptée aux contraintes induites par les vents violents. Certains concepts physiques simples y sont énoncés et explicités, et des applications pratiques sont décrites. Des exemples de solutions sont donnés en illustration. Une méthode d'analyse du processus de conception partant du site jusqu'au bâtiment est proposée afin d'accompagner l'architecte et l'ingénieur dans leur parcours de conception de projet.

Afin de cadrer le processus dans le contexte réglementaire européen, celui-ci est décrit et une méthode simplifiée de lecture des codes en vigueur est proposée.

1. CONTEXTE

Les conditions physiques de la cyclogenèse déterminent les régions du globe qui sont exposées aux vents extrêmes. A l'exception des zones équatoriales de latitude inférieure à environ 7°, les cyclones concernent globalement la bande intertropicale maritime. Les phénomènes thermodynamiques nécessaires à l'entretien de l'activité cyclonique excluent de fait les zones terrestres de grande étendue. Ce sont donc principalement les zones littorales et à *fortiori* insulaires qui sont concernées par ces phénomènes climatiques majeurs. Tous les océans sont concernés : on dénombre 7 bassins cycloniques répartis sur l'Atlantique, le Pacifique et l'Océan Indien.

Les cyclones et les tempêtes tropicales font partie des catastrophes naturelles les plus dévastatrices, tant du point de vue humain que du point de vue économique. Leur fréquence constitue déjà un élément majeur de leur impact destructeur : on en dénombre plusieurs dizaines chaque année sur l'ensemble du globe. Selon une étude présentée en 1999 par la Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft¹ qui fait un inventaire détaillé des catastrophes naturelles de l'année 1998, les cyclones représentent à eux seuls 47% des décès et 38% des pertes économiques liés aux catastrophes naturelles. Les trois importants cyclones de l'année 1998 (O3A en Inde, Georges dans les Caraïbes et Mitch en Amérique centrale) ont entraîné à eux seuls la mort de plus de 23000 personnes. Plus récemment, en 2005 le cyclone Katrina qui a frappé la Nouvelle-Orléans en Louisiane a fait environ 1100 victimes et causé 125 Milliards de \$ de dégâts². Parce qu'il a touché cette fois un pays industrialisé, Katrina représente la catastrophe naturelle la plus chère de l'histoire. Les compagnies d'assurance sont particulièrement touchées puisque les pertes de biens assurés lors d'événements cycloniques représentent 80% des dommages qu'elles couvrent pour l'ensemble des catastrophes.

L'impact dévastateur des cyclones sur les populations dépasse la seule action directe des vents extrêmes. Les effets induits que sont les inondations, raz-de-marée, glissements de terrains et conséquences sanitaires pèsent évidemment lourd dans la catastrophe humaine. L'effet destructeur du vent sur les constructions reste néanmoins essentiel car, outre la violence du phénomène, il fragilise la population en la privant d'abri.

Les pays les plus pauvres paient le tribut le plus important. Si les biens détruits ne rivalisent pas financièrement avec les pertes induites dans un pays industrialisé comme les Etats-Unis, l'effet des cyclones est bien plus dramatique encore dans les pays en voie de développement, puisque l'impact se chiffre généralement en milliers de vies humaines. En effet, l'habitat spontané auto-construit, fort répandu dans ces régions, constitue une part très sensible du patrimoine et les populations concernées déjà fragilisées sont les premières à subir les effets destructeurs de ces événements climatiques extrêmes.

En avril 1991 un cyclone suivi de violentes tornades et d'inondations a fait plus de 139000 morts au Bangladesh. Très récemment en mai 2008, le cyclone Nargis qui a frappé la Birmanie a dépassé lui aussi les 130000 décès

et disparitions³. Les cyclones constituent donc des risques majeurs sous l'angle de la sécurité des personnes comme sous celui de la pérennité des ouvrages.

La spécificité des contraintes climatiques des régions tropicales maritimes réside dans l'antagonisme des conditions quotidiennes et des conditions exceptionnelles. En effet, si les événements climatiques extrêmes que sont les cyclones ont, comme nous venons de le voir, un impact fort et immédiat sur la sécurité des personnes et des biens et requièrent en conséquence une conception adaptée des ouvrages, le climat quotidien est quant à lui caractérisé par des conditions impactant le confort des habitants. Il présente généralement dans ces régions des vents constants (direction et niveaux), de fortes températures assorties de taux d'humidité élevés, un ensoleillement soutenu et une pluviométrie importante. Les critères de construction sont, sous ces climats, souvent liés aux exigences les plus quotidiennes. La recherche de confort - sauf à adhérer aux techniques de climatisation artificielle qui rendent parfaitement étanches les constructions (ce qui n'est pas à encourager dans une démarche de développement durable) - conduit alors à généraliser une forme d'architecture très perméable favorisant les mécanismes de ventilation naturelle. Ces types d'architecture se caractérisent par des morphologies très ouvertes et des extensions multiples. Les vérandas et autres dispositifs légers, constituent évidemment des éléments particulièrement sensibles à l'action du vent.

Par ailleurs, des contraintes d'ordre économique conduisent une large part des populations à adopter des constructions légères, fréquemment auto-construites, dont la fragilité est supérieure à celle des constructions de maçonnerie.

Ainsi, la conception d'un habitat parfaitement adapté au climat tropical humide implique nécessairement la prise en compte simultanée des problématiques de confort et de sécurité.

2. LE PHÉNOMÈNE CYCLONIQUE

2.1. INTRODUCTION

Un cyclone est un phénomène météorologique pouvant provoquer :

- Des vents jusqu'à 350 km/h ;
- Des pluies diluviennes provoquant crues et glissements de terrains ;
- Des marées de tempête.

On dénombre environ :

- 90 phénomènes par an ;
- Plusieurs milliers de morts ;
- Quelques dizaines de milliards d'euros de dégâts pour les cyclones les plus importants.

Quelques définitions :

L'aléa correspond à la probabilité de manifestation d'un phénomène accidentel sur un site. L'intensité du phénomène (vitesse de vent par exemple) est liée à une période de temps donnée (10 ans, 50 ans, 100 ans...). Il est en principe impossible d'agir sur l'aléa (fig 1.1).

L'enjeu est l'ensemble des personnes, des biens et des activités qui présentent un certain degré de *vulnérabilité vis-à-vis* du phénomène. La vulnérabilité peut-être réduite par une bonne conception et une bonne réalisation des constructions (fig 1.2).

Le risque exprime et mesure le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux (fig 1.3).

Les zones concernées par les cyclones sont les zones maritimes et côtières tropicales. Ces dernières réunissent en effet toutes les conditions physiques nécessaires à leur formation (fig 1.4).



Fig. 1.1. - Aléa.



Fig. 1.2. - Enjeu.



Fig. 1.3. - Risque.



Fig. 1.4. - Régions cycloniques.

2.2. FORMATION DES CYCLONES

2.2.1. DÉFINITION DES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

La *pression atmosphérique* correspond à la pression exercée sur une unité de surface, par la masse de la colonne d'air située à l'aplomb de cette surface.

Les pressions supérieures à 1013 hPa sont dites « hautes ». Les pressions inférieures à 1013 hPa sont dites « basses ».

Au niveau de la mer, en France métropolitaine, la pression atmosphérique varie entre 950 hPa et 1050 hPa.

Les gradients de pression atmosphérique sont les premiers générateurs de vent : l'air a tendance à quitter les zones de haute pression pour rejoindre les zones de basse pression (fig 1.5).

QUELQUES RAPPELS SUR LES PRESSIONS :

Une pression est mesurée en Pascal (Pa). Elle représente la force s'exerçant sur une surface de 1 m².

La relation entre pression (P), force (F) et surface (S) est la suivante :

$$P = F/S$$

La pression atmosphérique, est généralement exprimée dans des unités plus pratiques : bar ou hPa (hectopascal). Les règles de conversions sont les suivantes :

1 bar	=	100 000 Pa
1 hPa	=	100 Pa

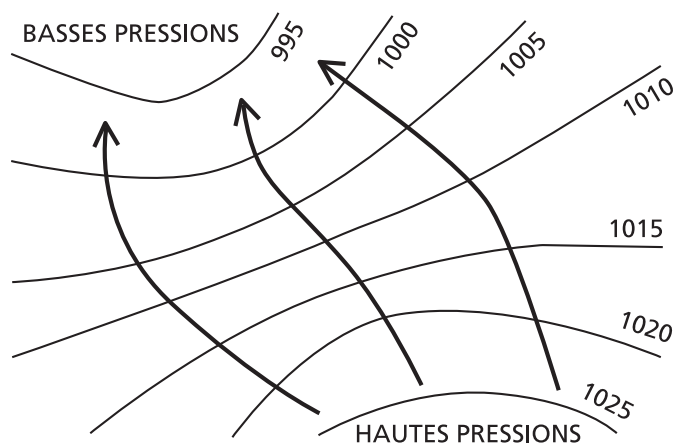


Fig. 1.5. - Vent et isobares (courbes d'égales pressions) ; les valeurs sont exprimées en hPa.

La *température* est variable en fonction de l'altitude, de la latitude, de la saison, des conditions météorologiques, etc.

Elle diminue depuis le sol jusqu'au sommet de la troposphère, suivant un gradient moyen de 0,6 °C par 100 m d'élévation.

L'*hygrométrie* (ou *taux d'humidité*) est un indicateur de la quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur, provenant notamment de l'évaporation des océans, mers, lacs, et de la transpiration des plantes. Elle indique, sous forme de pourcentage, le rapport entre la quantité réelle de vapeur d'eau et la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut contenir. Plus l'air est chaud plus cette quantité maximale de vapeur d'eau est grande. Lorsqu'un air chaud saturé en vapeur d'eau est rapidement refroidi, l'excédent de vapeur d'eau se transforme en eau liquide : c'est la condensation. Ce phénomène se produit notamment en hiver lorsque l'air intérieur d'un logement, chaud et saturé d'eau, est refroidi au contact d'une paroi froide : vitre ou mur mal isolé par exemple.

La force de Coriolis, due à la rotation de la terre, modifie les trajectoires de tout objet en mouvement. Elle est nulle au niveau de l'équateur et augmente avec la latitude. Au nord de l'équateur, les trajectoires sont déviées vers la droite. Au sud de l'équateur, les trajectoires sont déviées vers la gauche. L'intensité de cette force est proportionnelle à la vitesse des objets considérés. Les molécules d'air de l'atmosphère terrestre n'échappent pas à cette règle. Plus la vitesse du vent est élevée, plus l'intensité de la force de Coriolis est grande.

2.2.2. CONDITIONS DE FORMATION DES CYCLONES

Un cyclone est une gigantesque machine à vapeur dont le fonctionnement dépend des paramètres suivants :

- **Situation géographique**

Un vaste réservoir d'eau est nécessaire. Dans la pratique, les cyclones ne se forment qu'au-dessus des océans.

La distance de l'équateur doit être suffisante pour permettre l'apparition des forces de Coriolis. Il est rare qu'un cyclone se forme en dessous d'une latitude de l'ordre de 10°.

- **Paramètres hygro-thermiques**

La température de l'eau doit être supérieure à 26°C pour favoriser l'évaporation et jouer un rôle de « tampon » thermique.

Les température et hygrométrie de l'air doivent être suffisamment élevées pour favoriser les mouvements ascendants.

- **Gradient vertical de la vitesse du vent**

Le gradient vertical de la vitesse du vent doit être le plus homogène possible afin de limiter le cisaillement des courants aérauliques ascendants.

- **Pression atmosphérique**

Un cyclone ne peut se former que dans une zone dépressionnaire, susceptible d'« aspirer » l'air environnant (zone de convergence).

La présence d'une zone de plus haute pression à haute altitude favorise l'« évacuation » de l'air (zone de divergence) et la formation d'une boucle circulatoire à grande échelle.

2.2.3. MÉCANISME DE FORMATION DES CYCLONES

La formation des cyclones est un phénomène très complexe dont beaucoup d'aspects ne sont toujours pas parfaitement compris aujourd'hui. On peut cependant en expliquer les grandes lignes par un scénario schématique.

• **Première étape :**

L'air chaud et humide situé à proximité de la surface de l'océan est soumis à la poussée d'Archimède et s'élève pour rejoindre l'air froid des hautes couches de l'atmosphère (fig. 1.6).

• **Deuxième étape :**

L'humidité contenue dans l'air chaud se condense à mesure que l'air monte et se refroidit au contact des couches supérieures. Il se forme ainsi une masse nuageuse.

Dans le même temps, les courants ascendants accentuent la dépression dans les couches inférieures (fig. 1.7).

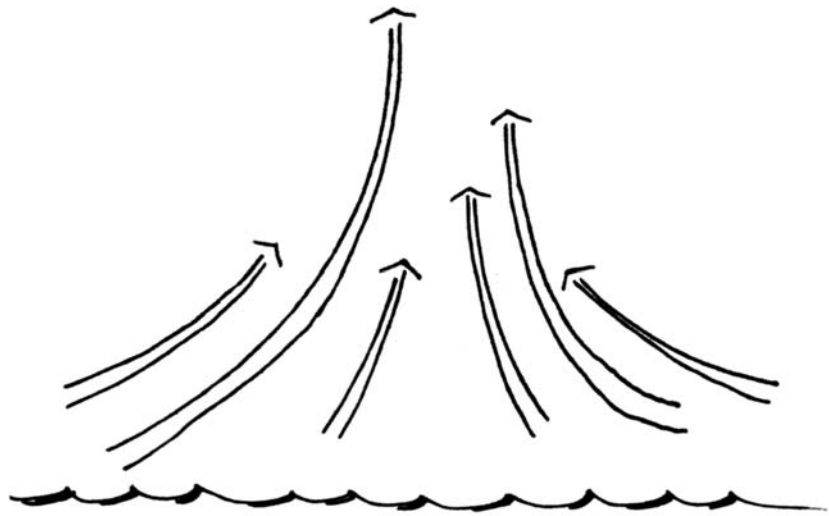


Fig. 1.6. - Première étape : ascension de l'air chaud et humide.

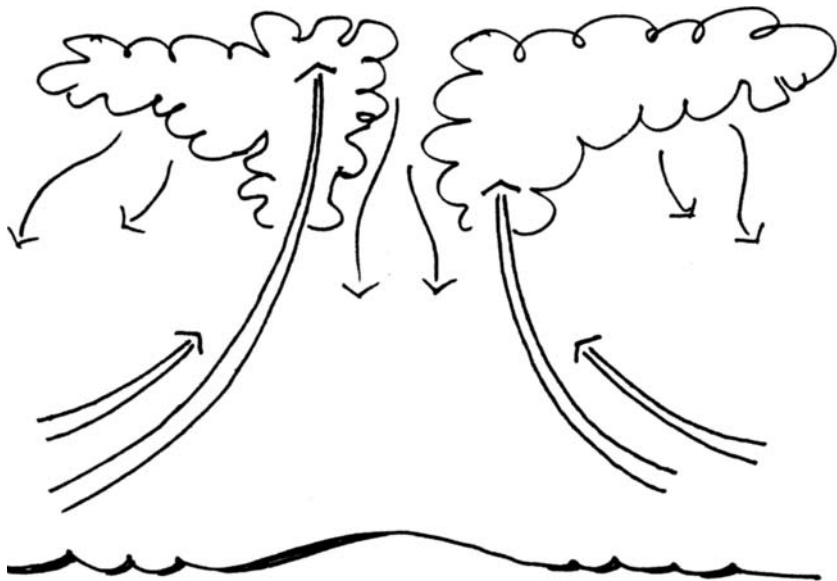


Fig. 1.7. - Deuxième étape : formation d'une masse nuageuse et accentuation de la dépression.

• **Troisième étape :**

La zone dépressionnaire attire des courants d'air « horizontaux » provenant de toutes les directions. Ces courants d'air, tout en rejoignant le mouvement ascendant, sont déviés par la force de Coriolis et contournent donc le centre dépressionnaire. Il se forme alors un tourbillon au cœur de la dépression.

Une grande partie de l'air froid et sec des couches supérieures est évacuée latéralement vers des zones de plus faible pression. Le reste redescend « en ligne droite » au cœur même du mouvement tourbillonnaire ascendant (fig. 1.8 et 1.9).

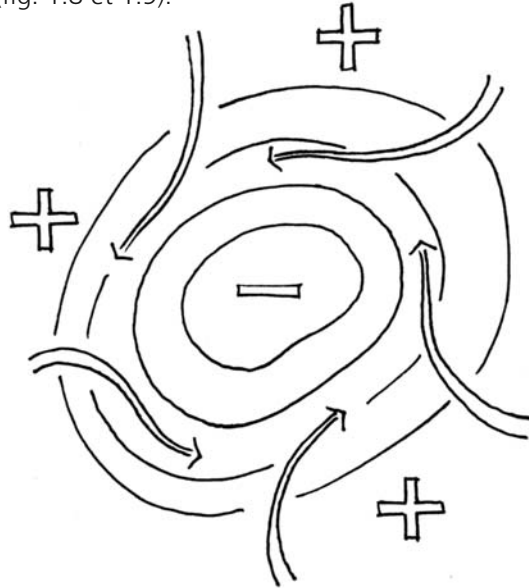


Fig. 1.8. - Troisième étape : convergence des flux d'air et déviation par la force de Coriolis.

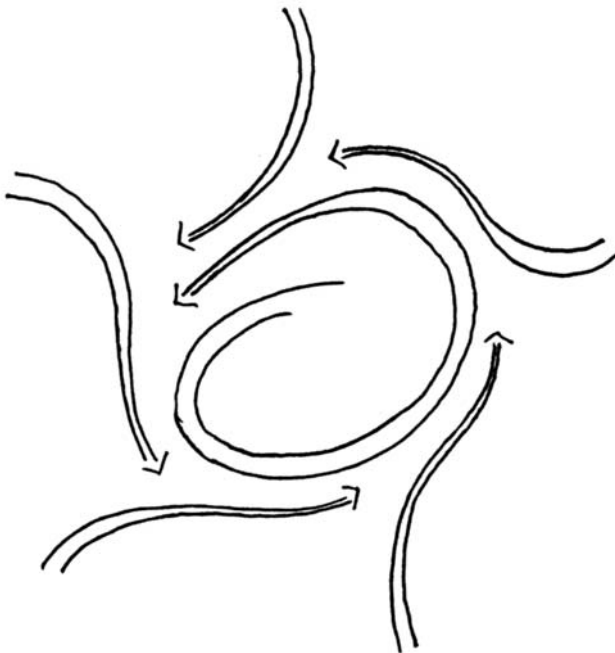


Fig. 1.9. - Troisième étape : formation d'un tourbillon.

• **Quatrième étape :**

Le phénomène se poursuit et la structure cyclonique se développe sur des centaines de kilomètres, tant que les conditions qui ont permis sa naissance sont réunies (fig. 1.10).



Fig. 1.10. - Quatrième étape : amplification du phénomène.

2.2.4. STRUCTURE D'UN CYCLONE

Le cyclone s'organise autour d'une structure centrale verticale appelée œil du cyclone. Son rayon est de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres.

Le cœur de l'œil est caractérisé par une pression extrêmement basse (fig. 2.0). Les vitesses de vent et les précipitations y sont très faibles. C'est donc paradoxalement la zone la plus tranquille. Mais cette tranquillité est bien entendu temporaire car le cyclone se déplace.

C'est à la périphérie de l'œil, à une centaine de kilomètre du centre, que les vitesses de vent sont les plus élevées : de l'ordre de 150 km/h et parfois jusqu'à 300 km/h. La température y est beaucoup plus basse et les précipitations importantes (fig. 2.1). C'est la zone la plus destructrice.

La vitesse du vent et l'intensité des précipitations diminue à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie de l'œil. A 400 km du centre les effets sont généralement modérés.

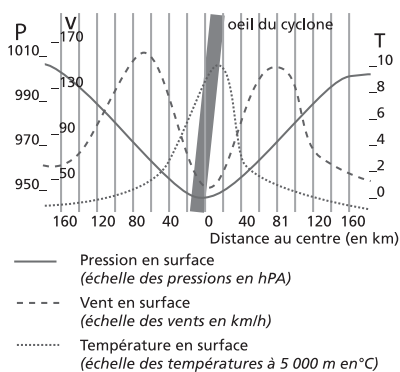


Fig. 2.0. - Evolution des paramètres climatiques en fonction de la distance à l'œil du cyclone.

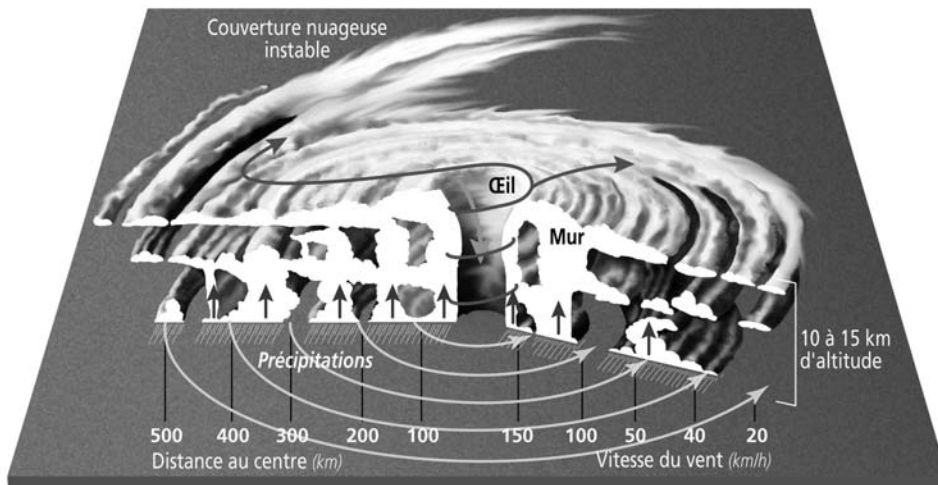


Fig. 2.1. - Structure d'un cyclone.

2.2.5. TRAJECTOIRE D'UN CYCLONE

Les cyclones se déplacent selon une trajectoire dictée par le champ de pression atmosphérique et, plus marginalement, par la force de Coriolis. Dans l'hémisphère Nord, ils ont tendance à se diriger tout d'abord en direction du nord-ouest, puis, aux latitudes élevées, ils dévient vers le nord-est. Dans l'hémisphère Sud, la route habituelle des ouragans et cyclones est d'abord orientée vers le sud-ouest, puis vers le sud-est. En réalité, les trajectoires sont assez difficiles à prévoir et peuvent sortir des schémas habituels (fig. 2.2).

Les cyclones se déplacent à des vitesses variables. Aux basses latitudes, leur vitesse de déplacement est faible voire nulle. Aux hautes latitudes, elle peut être de l'ordre de 30 km/h voire exceptionnellement atteindre 80 km/h.

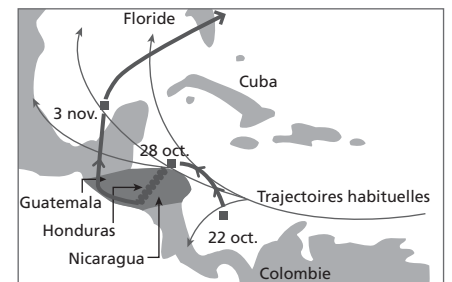


Fig. 2.2. - Trajet du cyclone Mitch (1998).

2.2.6. EFFETS DU CYCLONE

• Les vents

L'intensité des vents et leurs changements brutaux de direction sont à l'origine de dégâts considérables. Les vitesses dépassent aisément les 150 km/h et peuvent exceptionnellement atteindre 350 km/h environ à proximité de l'œil (et plus particulièrement, dans l'hémisphère Nord, dans sa partie avant droite).

Les vents de surface se caractérisent par leur turbulence, avec une alternance entre séries de rafales violentes et accalmies passagères. Cette variabilité a tendance à augmenter à l'intérieur des terres.

Un autre danger résulte du changement à 180° de la direction des vents après le passage de l'œil (de part et d'autre de l'œil, les vents soufflent dans des directions opposées).

• Les pluies

Le cumul des précipitations peut être considérable, y compris pour des cyclones d'intensité relativement modeste (en terme de vents), alors que certains « gros » cyclones ne génèrent que peu de pluies (fig. 2.3). Les pluies peuvent être génératrices d'inondations, de glissements de terrains et de coulées boueuses d'ampleur variable.

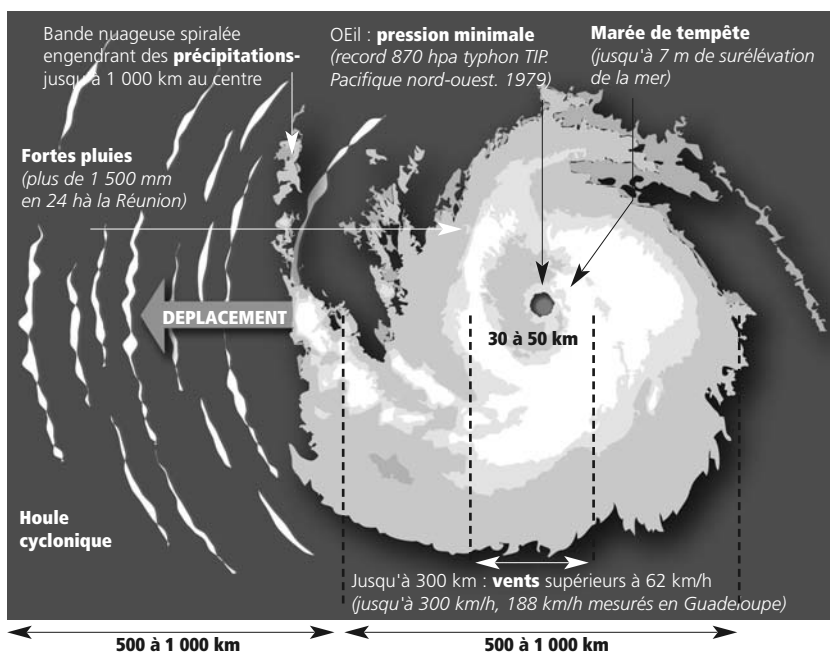


Fig. 2.3. - Signes précurseurs.

• Les ondes et marées de tempête

L'onde de tempête est la montée rapide du niveau de la mer lorsqu'une tempête s'approche de la côte. Le niveau de la mer monte près des côtes, à cause des forts vents du large qui « poussent » l'eau vers elles. De plus, l'eau est « aspirée » vers le haut par la pression très basse régnant près de l'œil du cyclone (phénomène d'intumescence). Les régions basses sont les plus vulnérables, alors que celles où le relief s'élève rapidement ne sont pas touchées (fig. 2.4).

L'onde de tempête peut se superposer à la marée astronomique pour constituer la marée de tempête. L'amplitude de cette dernière varie de un à deux mètres pour les cyclones peu intenses, mais peut dépasser cinq mètres pour les phénomènes plus puissants et être particulièrement dévastatrice.

Dans le delta du Mississippi aux États-Unis, la marée de tempête occasionnée par le passage de Camille en 1969 est montée brusquement jusqu'à près de huit mètres.

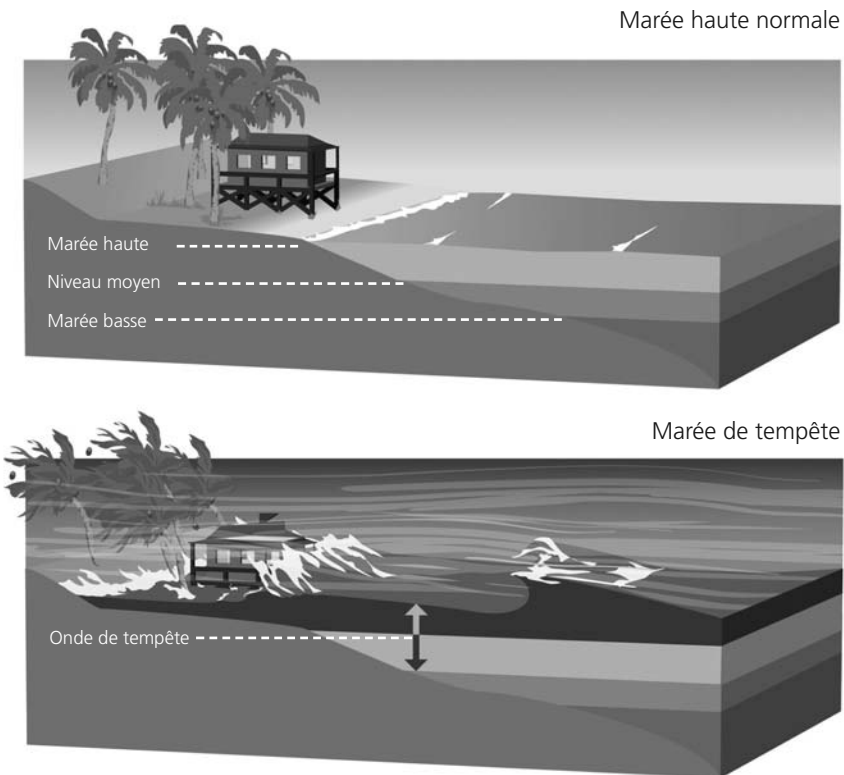


Fig. 2.4. - Marée de tempête.

2.2.7. MORT DU CYCLONE

Un cyclone meurt dès qu'une des conditions qui a permis sa naissance disparaît :

- Lorsqu'il rentre sur un continent, il peut mourir en vingt-quatre heures. Toutefois, les phénomènes les plus puissants peuvent conserver une énergie suffisante pour traverser l'étendue terrestre et se développer à nouveau au contact d'un océan si les conditions nécessaires à leur renforcement sont présentes.
- Lorsqu'il arrive sur des océans dont les eaux de surface ne sont pas assez chaudes.
- Lorsqu'il subit les effets du cisaillement vertical du vent qui déforme sa structure verticale.
- Lorsque sa trajectoire se rapproche trop de l'équateur.

3. AERODYNAMIQUE DU BATIMENT

3.1. PRÉAMBULE

Les phénomènes aérodynamiques mis en jeu lors d'un cyclone sont, à l'échelle des constructions, analogues à ceux produits par une simple brise. Seule l'intensité varie.

3.2. LA COUCHE LIMITE ATMOSPHÉRIQUE

Dans les très hautes couches de l'atmosphère, le vent est principalement généré par le champ de pression atmosphérique et la force de Coriolis. Ses caractéristiques spatiales et temporelles sont donc généralement assez homogènes : l'écoulement est dit *laminaire*. C'est ce type d'écoulement qu'on cherche à reproduire dans les *souffleries laminaires* destinées au secteur de l'aéronautique.

En dessous de 300 mètres d'altitude, les phénomènes de convection thermique et les frottements générés par la rugosité du sol influencent considérablement la nature du vent : cette zone est qualifiée de couche limite atmosphérique. C'est elle qu'on cherche à simuler dans les souffleries dites à *couche limite* destinées à l'étude du cadre bâti.

A proximité du sol, la vitesse moyenne du vent est ralentie. Il en résulte un gradient vertical, d'autant plus prononcé que la rugosité du sol est élevée (fig. 2.5). Dans les approches réglementaires, on considère généralement que ce gradient obéit à une loi de type logarithmique. Dans l'Eurocode 1, cette loi est notamment paramétrée par le coefficient z_0 , facteur de rugosité. Sa valeur varie de quelques millimètres au-dessus de la mer à quelques mètres en zone urbaine.

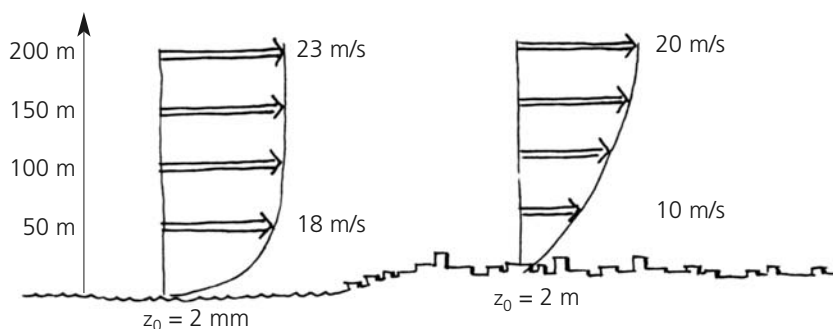


Fig. 2.5. - Gradients verticaux de la vitesse moyenne du vent au-dessus de la mer et au-dessus d'une zone urbaine.

Par ailleurs, la vitesse instantanée du vent fluctue considérablement dans le temps et dans l'espace : c'est la *turbulence* du vent. Cette dernière est

généralement caractérisée par son taux, exprimé en %, rapport entre l'écart-type temporel des variations de la vitesse du vent et la vitesse moyenne. Le taux de turbulence est de l'ordre de 5% en rase campagne et de l'ordre de 20 à 30% en zone urbaine (fig. 2.6).

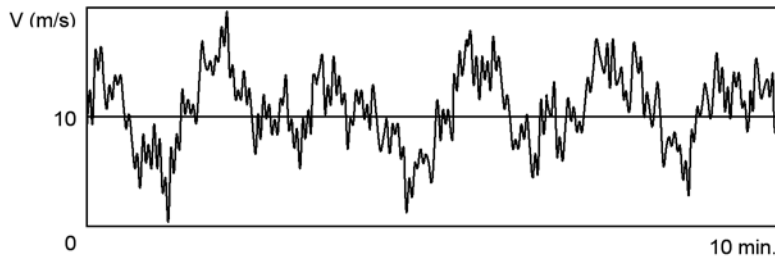


Fig. 2.6. - Enregistrement de la composante horizontale de la vitesse du vent sur dix minutes en zone urbaine.

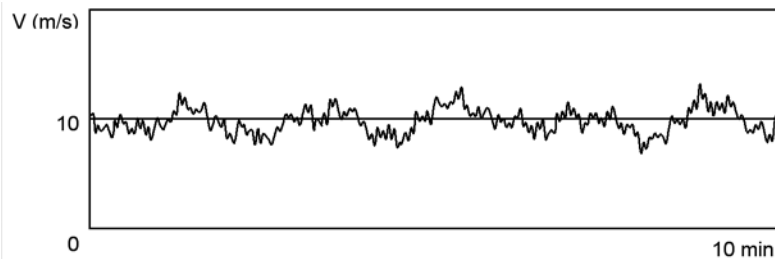


Fig. 2.7. - Enregistrement de la composante horizontale de la vitesse du vent sur dix minutes au dessus de la mer.

Dès lors, quantifier l'intensité de la vitesse du vent par une seule valeur est délicat et peut être source de confusions : parle-t-on de vitesse moyenne ou de vitesse de pointe ? En première approche, on peut considérer que la valeur de pointe en zone urbaine sur un enregistrement de 10 minutes (celle qui sera retenue pour le dimensionnement des ouvrages) est égale au double de la valeur moyenne (fig. 2.7).

3.3. NOTIONS SUR LES ÉCOULEMENTS AÉRAULIQUES

En l'absence d'obstacles, l'écoulement moyen du vent peut, en première approche, être assimilé à un ensemble de filets d'airs parallèles à la surface du sol et à peu près rectilignes. Les seules variations notables de la vitesse moyenne du vent sont celles du gradient vertical.

A l'instant où ils percutent un obstacle, les filets d'air sont brutalement écartés de leur trajectoire initiale. On distingue alors généralement les zones caractéristiques suivantes (fig. 2.8) :

Les points de décollement, généralement au niveau des arêtes vives de l'obstacle, en aval desquels on constate une augmentation de la vitesse du vent et une chute de pression.

Des couches de cisaillement caractérisées par un fort gradient de vitesse moyenne : survitesses à proximité de l'obstacle, liées au resserrement local des filets d'air (diminution de l'aire pour un débit constant), vitesses « normales » loin de l'obstacle (écoulement non perturbé).

Des zones de recirculation en aval des points de décollement, caractérisées par un écoulement rotatif et des pressions pariétales négatives. L'intensité du champ dépressionnaire est généralement maximale à proximité du point de décollement et tend à s'atténuer vers l'aval. Il arrive même parfois, si la paroi est suffisamment longue, que les pressions s'annulent.

Une zone de sillage en aval de l'obstacle, généralement caractérisée par une forte turbulence et, parfois, l'apparition d'un phénomène particulier appelé détachement tourbillonnaire. Les pressions pariétales sous le vent sont toujours négatives et leur intensité est généralement limitée.

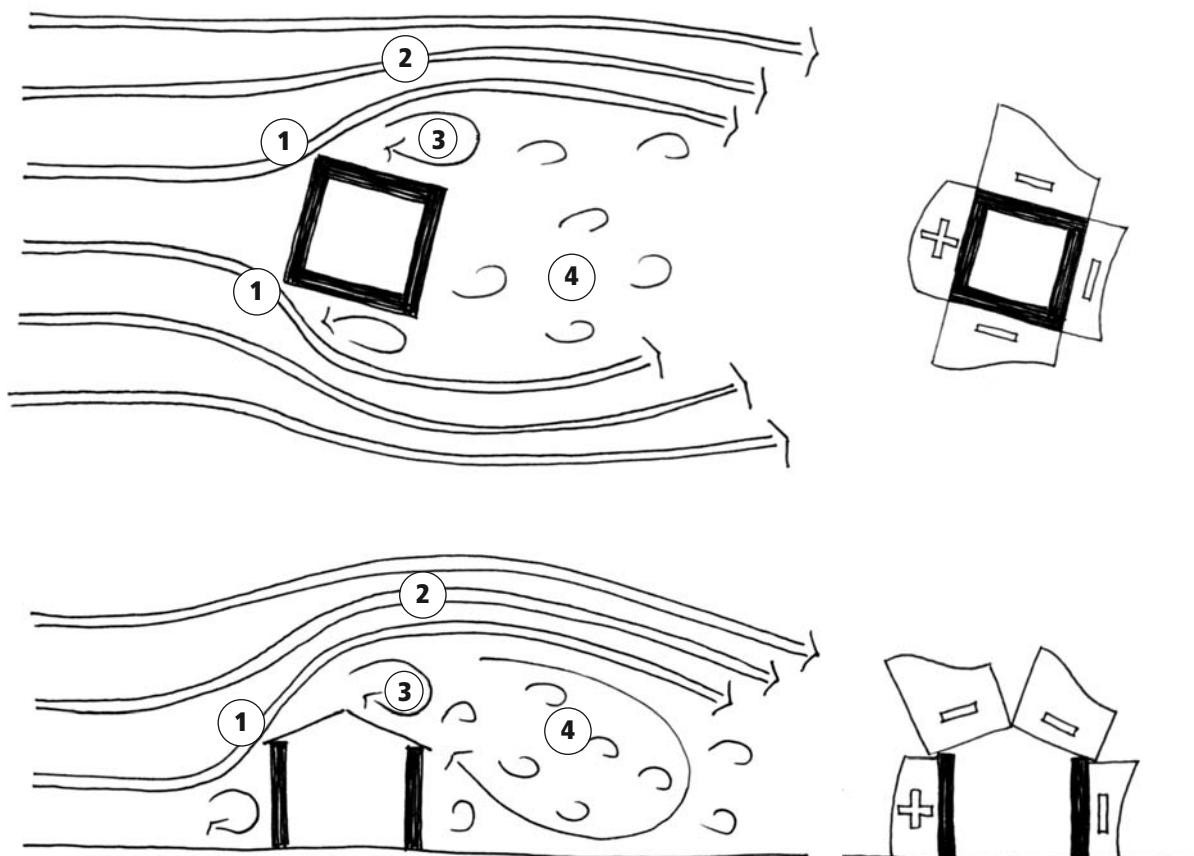


Fig. 2.8. - Ecoulement aéraulique autour d'un bâtiment : vues en plan et en élévation.

- | | |
|--------------------------|---------------------------|
| 1 : point de décollement | 3 : zone de recirculation |
| 2 : zone de cisaillement | 4 : sillage |

3.4. NOTIONS SUR LES CHARGES AÉRODYNAMIQUES

L'atmosphère exerce à la surface de la terre une pression considérable de l'ordre de 100 000 Pa (équivalent à 10 tonnes par mètre carré), poids d'une colonne d'air de 8 kilomètres de haut sur une surface d'un mètre carré. A l'échelle d'un être humain ou d'une construction cette pression est identique en tout point. C'est la raison pour laquelle son effet n'est pas ressenti. C'est également la raison pour laquelle, par commodité, on assimile souvent la pression atmosphérique à une pression nulle (fig. 2.9).

A la pression atmosphérique, s'ajoute la *pression dynamique*, résultant de l'action du vent. Cette pression peut être positive (surpression) ou négative (dépression).

La *pression dynamique de référence* est la pression qu'exercerait le vent sur une surface perpendiculaire à sa direction et dirigée contre lui. Elle peut être exprimée en fonction de la vitesse du vent de la manière suivante :

$$P_{ref} = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2$$

P_{ref}	pression dynamique de référence (Pa)
ρ	masse volumique de l'air $\sim 1,25 \text{ kg/m}^3$
V	vitesse du vent (m/s)

En chaque point de l'enveloppe d'un bâtiment, la pression dynamique, positive (surpression) ou négative (dépression), peut être exprimée en fonction de la pression dynamique de référence à l'aide du coefficient de pression :

$$P = P_{ref} \times C_p$$

C_p	coefficient de pression (adimensionnel)
-------	---

A titre d'exemple, un coefficient de pression égal à -2 correspond à une dépression de « forte » intensité tandis qu'un coefficient égal à $0,5$ correspond à une surpression de « faible » intensité.

Les forces de frottement tangentes aux parois sont généralement négligeables... et négligées. L'action du vent sur les bâtiments se résume donc exclusivement à un champ de pressions normales aux parois. Les forces aérodynamiques agissant sur les parois leurs sont donc également perpendiculaires. On peut les obtenir par intégration du champ de pression sur la surface d'application : $F = P \times S$ (fig. 2.10).

Si le bâtiment est parfaitement étanche, la pression interne est sensiblement égale à la pression atmosphérique. Seule l'enveloppe externe est soumise aux pressions dynamiques du vent.

Si le bâtiment est poreux voire largement ouvert, l'enveloppe interne est également soumise à la pression dynamique du vent. La force agissant sur une paroi résulte alors de la combinaison de la pression interne et de la pression externe. Dans la pratique, une configuration courante et particu-

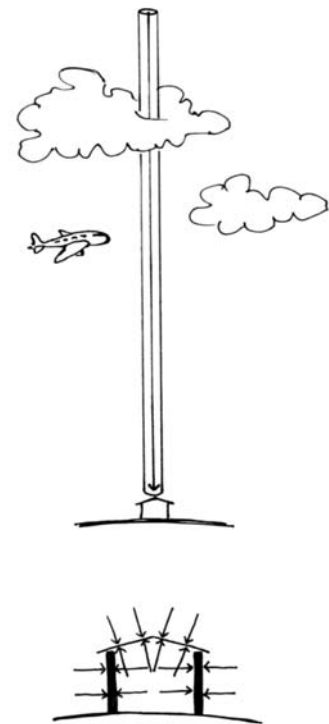


Fig. 2.9. - Pression exercée par une colonne d'air à la surface de la terre.

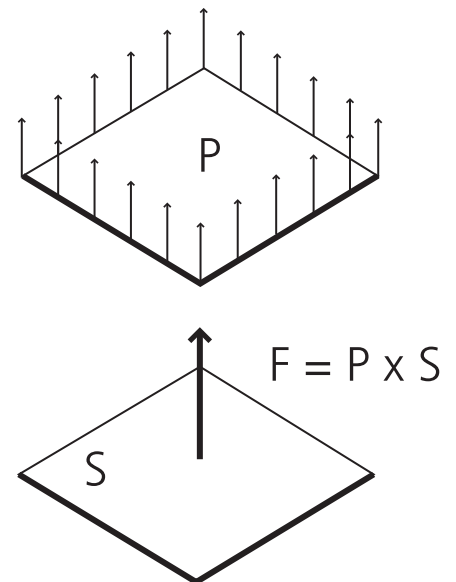


Fig. 2.10 - Intégration du champ de pression sur une surface d'application.

lièrement défavorable correspond à la combinaison d'une surpression interne et d'une dépression externe. (fig. 2.11)

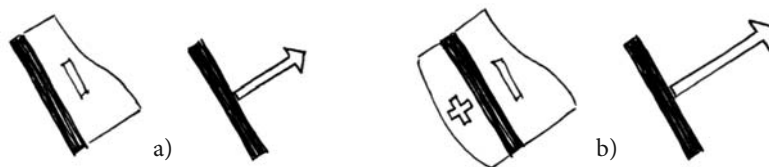


Fig. 2.11. - Force pariétale résultant des champs de pression interne et externe
 a) Pression interne nulle (pression atmosphérique) et pression externe négative
 b) Pression interne positive et pression externe négative

Les pressions pariétales extérieures sont généralement négatives. Seules les parois extérieures clairement tournées vers le vent sont sujettes à des pressions positives dont l'intensité est généralement assez proche de celle de la pression dynamique de référence. Les dépressions les plus prononcées sont souvent localisées en aval des arêtes vives (points de décollement) : les coefficients de pression peuvent être localement de l'ordre de -2 à -3 (fig. 3.1).

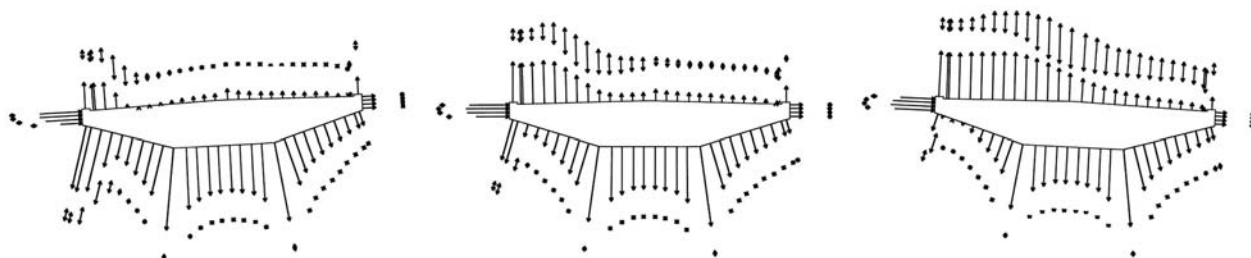


Fig. 3.1. - Champs de pressions (valeurs moyennes et fluctuations) autour d'un tablier de pont pour 3 incidences de vent (vent venant de la gauche). Ces visualisations sont issues de mesures effectuées sur une maquette en soufflerie.

Pour les constructions courantes, les valeurs des coefficients de pression peuvent être fournies par les textes réglementaires : « Neige et vent 65 » (règles françaises) ou Eurocode 1 (règles européennes).

Pour les constructions plus atypiques, la caractérisation du champ de pression doit être réalisée « sur mesure » à partir de simulations expérimentales (tests de maquettes en soufflerie) ou de simulations numériques (utilisation de logiciels résolvant les équations de la mécanique des fluides).

Dans notre démarche nous proposons également une approche visant à réduire la sollicitation.

4. CONCEPTION PARACYCLONIQUE

Le calcul correct du dimensionnement des fondations, de la structure, des contreventements ainsi qu'une mise en œuvre conforme aux règles de l'art des éléments secondaires, permettent généralement de s'opposer efficacement aux sollicitations aérodynamiques.

Il s'agit notamment de modifier le champ aérodynamique autour de la construction afin de changer la répartition des pressions et ainsi minimiser l'action du vent. Les structures et enveloppes sont alors moins sollicitées et leur dimensionnement peut être allégé.

Le processus de conception suppose une démarche logique depuis le choix du site jusqu'à la réalisation de l'ouvrage. Cette approche de la macro-échelle vers la micro-échelle implique un regard élargi sur le projet considérant les facteurs géomorphologiques et humains de l'environnement tout autant que les formes et composants de l'architecture.

Ce chapitre aborde donc l'effet de la topographie sur la sollicitation aérodynamique, celui de l'environnement proche et décrit des concepts simples et réalistes de contrôle des champs aérodynamiques externes et internes qui permettent de réduire les efforts appliqués à l'ouvrage. Ces dispositifs peuvent être intégrés dès la conception de l'ouvrage, ou intervenir en « réhabilitation » sur le bâti existant. L'influence des géométries et des volumes sur les actions globales induites par le vent est également décrite. Seront enfin abordés les principes essentiels permettant d'améliorer la résistance des constructions.

4.1. INFLUENCE DU SITE

Selon les sites l'exposition aux vents cycloniques est variable. Pour un événement cyclonique donné, l'implantation géographique, les caractéristiques topographiques et orographiques atténuent ou accroissent la vitesse locale. Par conséquent la sollicitation aérodynamique des ouvrages est en partie fonction de leur implantation.

4.1.1. BASSINS CYCLONIQUES

Comme évoqué en introduction de cet ouvrage, les zones géographiques concernées par une activité cyclonique sont localisées dans l'espace inter-tropical maritime.

Tous les océans du globe sont potentiellement générateurs de cyclones. Les espaces les plus sensibles sont donc les territoires côtiers ou zones insulaires des régions tropicales. Le territoire français compte parmi ceux-ci la majorité de ses départements et territoires d'Outre-mer.

4.1.2. TOPOGRAPHIE DE MACRO-ÉCHELLE

La topographie de grande échelle (reliefs montagneux, vallées...) modèle le vent dans les basses couches atmosphériques et influence sa vitesse. La topographie peut avoir des effets de canalisation, d'accélération ou au contraire agir comme un masque. Néanmoins, le cyclone étant un phénomène en spirale animé d'un mouvement général de translation on ne peut anticiper la direction du vent en chaque point de sa trajectoire. La bande de territoire sur laquelle passe l'œil du cyclone voit même successivement des directions de vent opposées. C'est la raison pour laquelle il est prudent de ne pas considérer une quelconque particularité topographique comme durablement protectrice. A l'inverse une topographie potentiellement aggravante doit impérativement être considérée dans le dimensionnement des constructions. Les majorations de charge peuvent être considérables.

A titre d'illustration une modélisation des effets de relief sur la vitesse proche du sol a été réalisée pour les départements français d'Outre-mer soumis aux risques cycloniques⁴. A des fins de simplification l'approche réglementaire issue des Eurocodes définit des vitesses moyennes de référence à adopter comme base de calcul. Pour l'ensemble des exemples suivants, la valeur forfaitaire retenue est 34 m/s. Les cartographies des vents présentées ci-dessous illustrent les écarts importants entre la forfaitisation et la vitesse réelle accrue par l'effet du relief (fig. 3.2). Elles donnent selon un découpage fin de l'ordre du km², la vitesse moyenne sur 10 minutes d'un vent cyclonique de période de retour 50 ans, mesurée à 10 mètres au dessus du sol sur un terrain de catégorie 2 (catégorie normalisée d'une station météorologique).

Ces cartes intègrent donc uniquement les effets topographiques de grande échelle. De manière conservatrice, elles considèrent en chaque point l'incidence de vent la plus défavorable. Elles mettent en évidence sur les reliefs certaines majorations très sensibles qu'il est utile de prendre en considération dans la conception du projet.

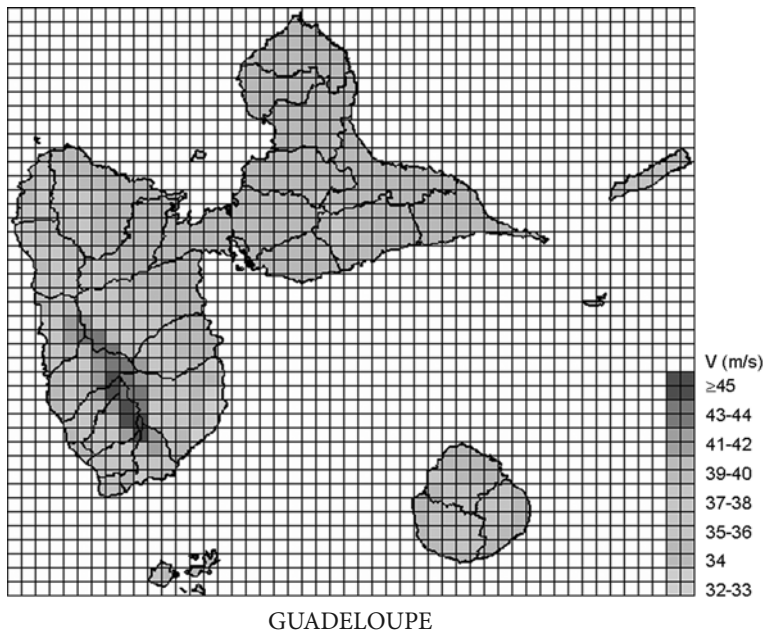


Fig. 3.2. - CARTOGRAPHIE DES VENTS CYCLONIQUES
 Vitesse de référence intégrant le relief global
 (10mn, 10m rase campagne, retour 50 ans)

4.1.3. TOPOGRAPHIE LOCALE

La topographie de petite échelle est susceptible de modifier localement la vitesse du vent cyclonique. Il est donc prudent, avant toute implantation de bâti, de prendre conscience du degré de risque que représente le site de construction.

Les modifications du vent peuvent être des amplifications comme des minorations de la vitesse. Les effets majorants recensés sur le site pourront être considérés comme des indices d'alerte d'une sensibilité accrue à laquelle il conviendra de parer par une conception architecturale particulièrement soignée sous l'angle de l'aérodynamique. Les effets minorants pourront quant à eux être appréhendés par le concepteur comme des stratégies de protection à intégrer à son projet.

Terrain en pente

La rupture de pente d'une déclivité de faible hauteur et d'un angle compris entre 10° et 40° est le lieu d'une accélération de vitesse de l'ordre de 10 à 20% (fig. 3.3). Toute la zone au voisinage de l'infléchissement de la pente doit être considérée comme plus exposée.

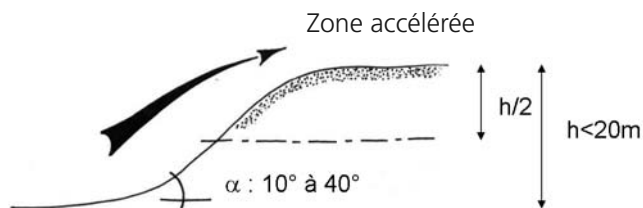


Fig. 3.3. - Vitesse majorée de 10 à 20% (soit jusqu'à 40% d'augmentation des efforts).

Sites en collecteur (zones entre 2 collines, vallées)

La morphologie de collecteur que constituent 2 coteaux le long d'une vallée ou 2 collines voisines accroît la vitesse du vent de l'ordre de 10% (fig. 3.4). Le phénomène apparaît pour certaines proportions du modèle telles que décrites ci-dessous.

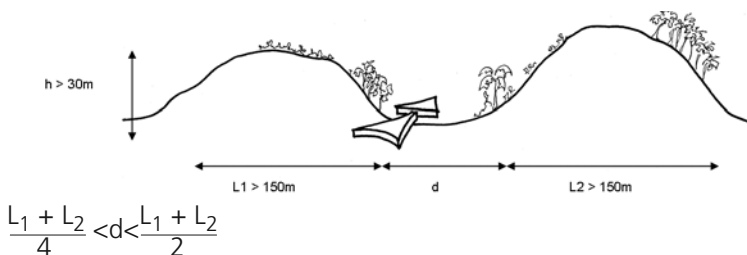


Fig. 3.4. - Vitesse majorée de 10%.

Parmi les configurations topographiques qui produisent des effets de minoration de la vitesse du vent, certaines dispositions « dissymétriques » (pied de colline, zone sous le vent d'une colline ou dénivelé, zone à proximité immédiate d'une falaise ou dénivelé abrupt...), impliquent une incidence de vent privilégiée (fig. 3.5). Dans la mesure où la direction des vents cycloniques est variable d'un cyclone à l'autre et même au cours d'un même cyclone, il est exclu de considérer ces cas de figure comme des dispositions de protection pérennes. Seule la configuration minorante qui intègre la possibilité d'une incidence quelconque est donc à retenir.

Zone dépressionnaire – cuvette (décaissé)

La topographie peut néanmoins présenter d'autres formes de danger en exposant par exemple le bâti aux effets du ravinement (une analyse des zones de ravines naturelles doit toujours accompagner l'implantation d'une construction nouvelle dans un site inconnu).

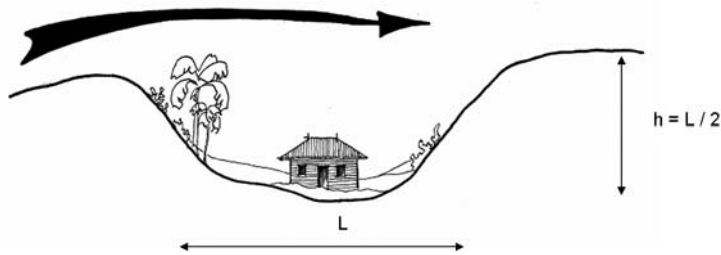


Fig. 3.5. - Vitesse minorée de 50 à 70%.

4.1.4. PROXIMITÉ DU LITTORAL, DES COURS D'EAU ET DES TALWEGS

La proximité des cours d'eau ou une implantation en zone littorale expose à des risques connexes.

Sur la côte, outre des effets aérodynamiques qui peuvent être sévères (exposition directe sur le front de mer, effet de sur-hauteur lors de construction en bord de falaise ou sur terrain en déclivité...), la construction est exposée aux déferlantes et aux impacts de corps flottants que la mer peut charrier. La force des vagues peut éroder sévèrement le terrain et déchausser les fondations mettant en péril la stabilité du bâtiment.

En rive de cours d'eau ou de talweg (voir 4.2.2 p. 52), la construction encourt des risques d'inondation et de glissement de terrain. Les précipitations massives associées aux cyclones gonflent en effet la charge des rivières alimentées par des affluents en surrégime et par le ruissellement global des zones de relief. Celles-ci peuvent alors déborder entraînant avec elles des terrains fragilisés par les abondantes précipitations.

Une vigilance particulière doit donc accompagner la conception de projet dans de telles zones. L'aménagement de ces parties de territoire est d'une manière générale très réglementé.

4.1.5. ENVIRONNEMENT IMMÉDIAT

Les composants de l'environnement proche conditionnent directement les phénomènes aérodynamiques auxquels est soumise la construction. L'observation du bâti existant dans le périmètre immédiat du projet ($R \geq 100$ à 150 m) est nécessaire pour jauger l'accroissement du risque ou au contraire évaluer l'effet protecteur induit (effet de masque).

Effets protecteurs

La masse bâtie

Le tissu urbain constitue généralement un maillage suffisamment dense pour assurer une auto-protection efficace. La construction immergée dans le tissu urbain - sous réserve qu'elle ne dépasse pas de la hauteur moyenne des bâtiments - est alors sous un effet de masque qui réduit la vitesse du vent et par conséquent minore la sollicitation aérodynamique (fig. 3.6).

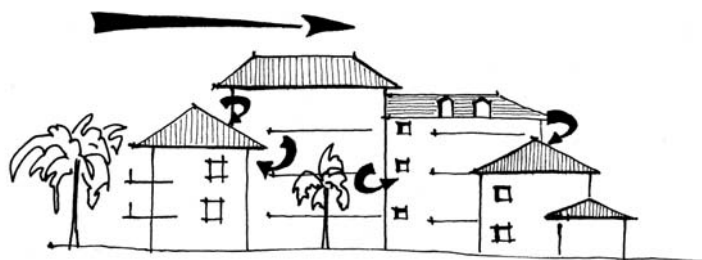


Fig. 3.6. - Zone abritée

Cet effet protecteur, qui peut être très efficace (réduction de la vitesse souvent supérieure à 50%), reste cependant délicat à évaluer car il est propre à chaque situation, et peu fiable dans la durée dans la mesure où l'on ne maîtrise pas le devenir des constructions environnantes. Cette remarque est fautive si l'on considère un ensemble de bâtiments éléments d'un même programme qui peuvent -si la conception est bien adaptée- s'auto-protéger. Cet effet de masque ne peut être véritablement considéré comme un paramètre fiable permettant d'alléger le dimensionnement des structures, mais le concepteur doit savoir qu'une construction inscrite dans la rugosité urbaine est globalement moins sensible qu'un bâtiment construit dans un tissu lâche (N.B. : une construction émergente dépassant largement la hauteur moyenne de la rugosité reste cependant très exposée). Par ailleurs, la frange périphérique de la zone urbanisée dense reste sensible d'une façon très marquée sur une profondeur d'environ 200 mètres. Enfin, si dans ce tissu dense subsistent des espaces ouverts de grandes dimensions (environ 400 mètres de linéaire) et sans végétation ou construction, les ouvrages qui bordent ces espaces ne bénéficient d'aucun effet de masque. Bien évidemment, une densité du plan masse suffisante pour assurer une protection efficace du point de vue du risque cyclonique hypothèque sérieusement toute potentialité de ventilation quotidienne des locaux. Ainsi, sauf à opter pour des techniques de climatisation artificielle, la densification extrême du tissu urbain a ses limites et ne représente pas la solution idéale.

Végétation

La protection végétale, qui peut dans certains cas être effective, constitue un mode d'action beaucoup trop aléatoire pour être préconisé (attention à la résistance des végétaux et en particulier des arbres de haute tige au tronc fragile ou aux racines trop faiblement développées, qui peuvent à l'inverse d'une protection efficace devenir de dangereux projectiles) (fig. 3.7).

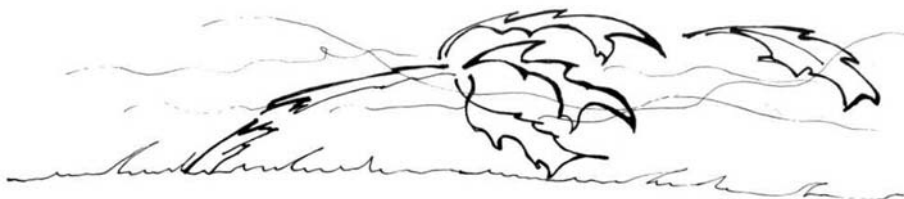


Fig. 3.7. - Dangers d'une végétation trop élancée.

Effets amplificateurs

L'interaction d'éléments bâtis voisins de dimensions importantes peut conduire localement à des accélérations significatives.

D'une manière générale, les types d'urbanisation de grands ensembles de tours et de barres, du fait de l'interférence des différents éléments qui les composent, ne peuvent présenter aucune forme d'atténuation de la vitesse du vent cyclonique par de quelconques effets de masque. Au contraire des phénomènes d'interaction locale induisent des majorations de la vitesse du vent.

Brèches et collecteurs

Les brèches comprises entre deux immeubles voisins, sont des zones d'écoulement où se produisent des accélérations. Pour certaines proportions critiques, le phénomène est amplifié (fig. 3.8).

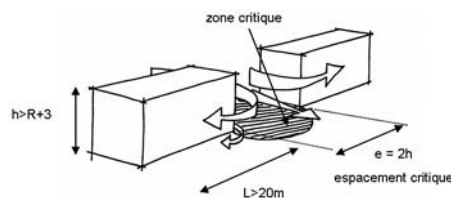


Fig. 3.8. - Vitesse majorée de 10 à 30%.

La conception de toute construction édifée dans la zone sensible à cette accélération, c'est à dire immédiatement sous le vent de la brèche, doit tenir compte de cette sollicitation.

Lorsque l'agencement de deux immeubles forme un collecteur, il se produit un effet bien connu appelé « effet Venturi » qui génère une forte accélération à l'étranglement de ce collecteur (fig. 3.9).

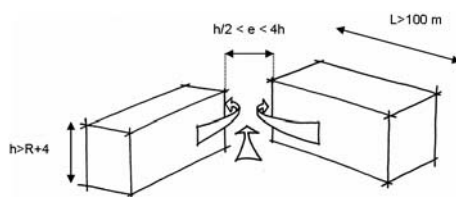


Fig. 3.9. - Vitesse majorée de 20 à 30%.

Effets de contournement

Au contournement d'une construction isolée de hauteur significative (>15m) les écoulements sont accélérés. Le rayon d'influence est de l'ordre de la hauteur de l'édifice. A proximité immédiate de celui-ci les accélérations sont d'environ 20% pour un bâtiment de 15m et peuvent dépasser 100% pour des Immeubles de Grande Hauteur. L'influence de la construction est d'autant plus importante que celle-ci émerge de la rugosité bâtie alentour.

Il est donc prudent lorsque l'on construit en région cyclonique, d'éviter autant que possible de créer ce genre de singularité aérodynamique ainsi que d'implanter des bâtiments dans ces zones « à risques ». Lorsqu'il n'est pas possible de changer l'implantation, il est impératif de prendre en considération cet accroissement de la sollicitation dans le dimensionnement de l'ouvrage et veiller à une bonne mise en œuvre des couvertures et enveloppes.

4.2. CONCEPTION DU BÂTIMENT

La conception architecturale en zone cyclonique suppose deux réflexions conjointes. Il s'agit en effet de coupler un dimensionnement correct des structures et des systèmes d'accroche des éléments d'enveloppe, et une stratégie de réduction des charges appliquées à l'ouvrage. Cette double approche requiert une bonne mise en œuvre des règles de l'art de la construction et une connaissance des mécanismes aérodynamiques mis en jeu.

4.2.1. RÉDUCTION DES CHARGES AÉRODYNAMIQUES

4.2.1.1. CLÔTURES ET TALUS

L'environnement immédiat de la construction qui est du domaine du concepteur (jardin, clôture...) peut avoir des effets majorants ou minorants sur la charge aérodynamique appliquée à la construction.

L'influence d'un mur de clôture modifie très directement le champ aérodynamique développé sur la construction. Le concept peut constituer une protection locale sensible dans certaines situations (fig. 3.10).

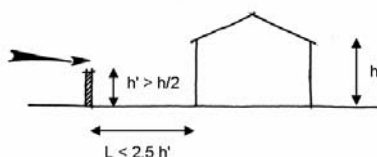


Fig. 3.10. - Dimensions et implantation d'un mur de protection.

Un mur au vent de géométrie telle que décrite sur la figure, permet d'une part de réduire la surpression de la façade au vent (jusqu'à 50% de réduction) et d'autre part de diminuer voire d'annuler les efforts d'arrachement sur la toiture au vent.

Un talus qui constitue un élément de paysage peut également intervenir dans la protection locale du bâti (fig. 4.0).

Il est bien certain que si ces dispositifs locaux modifient le champ de pression de manière positive dans une optique de protection, ils constituent un frein à la ventilation naturelle dans une stratégie de confort quotidien (bien que les vitesses de vent de tous les jours soient moins réduites ou déviées par l'obstacle que les fortes vitesses). On peut toutefois préconiser

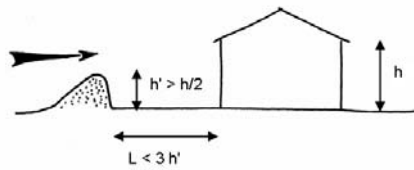


Fig. 4.0. - Dimensions et implantation d'un talus de protection.

L'usage de ce type d'éléments proches du bâti à des fins de protection localisée pour contrebalancer un effet amplificateur amont par exemple. La solution du talus présente l'avantage de s'intégrer aisément par l'introduction d'une haie végétale lorsqu'il n'est pas déjà existant dans le paysage. Par ailleurs sa nature mixte minérale et végétale lui confère une bonne stabilité qui conforte son rôle de protection (fig. 4.1).



Fig. 4.1. - Intégration et stabilisation d'un talus par plantation.

4.2.1.2. IMPACT DE LA MORPHOLOGIE GLOBALE DE LA CONSTRUCTION : PLANS, VOLUMES, EXTENSIONS

Le champ de pression développé sur une construction présente une distribution spatiale complexe, il est variable dans le temps et fonction de la forme de cette construction et de l'incidence du vent.

La géométrie globale de l'ouvrage a ainsi une influence sur son comportement au vent. L'exemple ci-dessous en présente une illustration.

Les sollicitations d'ensemble sur un bâtiment s'expriment en termes d'efforts de portance (soulèvement), de traînée et de dérive (glissements longitudinaux et transversaux). Ces charges induisent également des moments de renversement et de torsion.

Des pesées dynamométriques réalisées en soufflerie sur les maquettes de trois maisons de formes différentes mais de surfaces habitables et de hauteurs de faîtage identiques (fig. 4.2), montrent des différences importantes de sollicitations de soulèvement et de glissement en fonction de la géométrie considérée. Les graphes suivants donnent les efforts horizontaux et verticaux pour des maisons de surface 50 m² et pour un vent cyclonique de 240 km/h (fig. 4.3). Des formes types ont été intentionnellement choisies :

un plan carré de volumétrie compacte, un plan rectangulaire d'une dimension bien supérieure à l'autre et une forme octogonale.

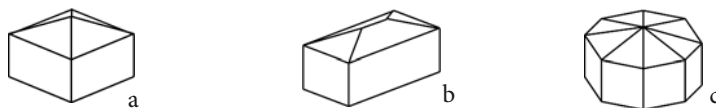


Fig. 4.2. - Effet de la volumétrie sur la sollicitation dynamique
 a) Maison 1 b) Maison 2 c) Maison 3.

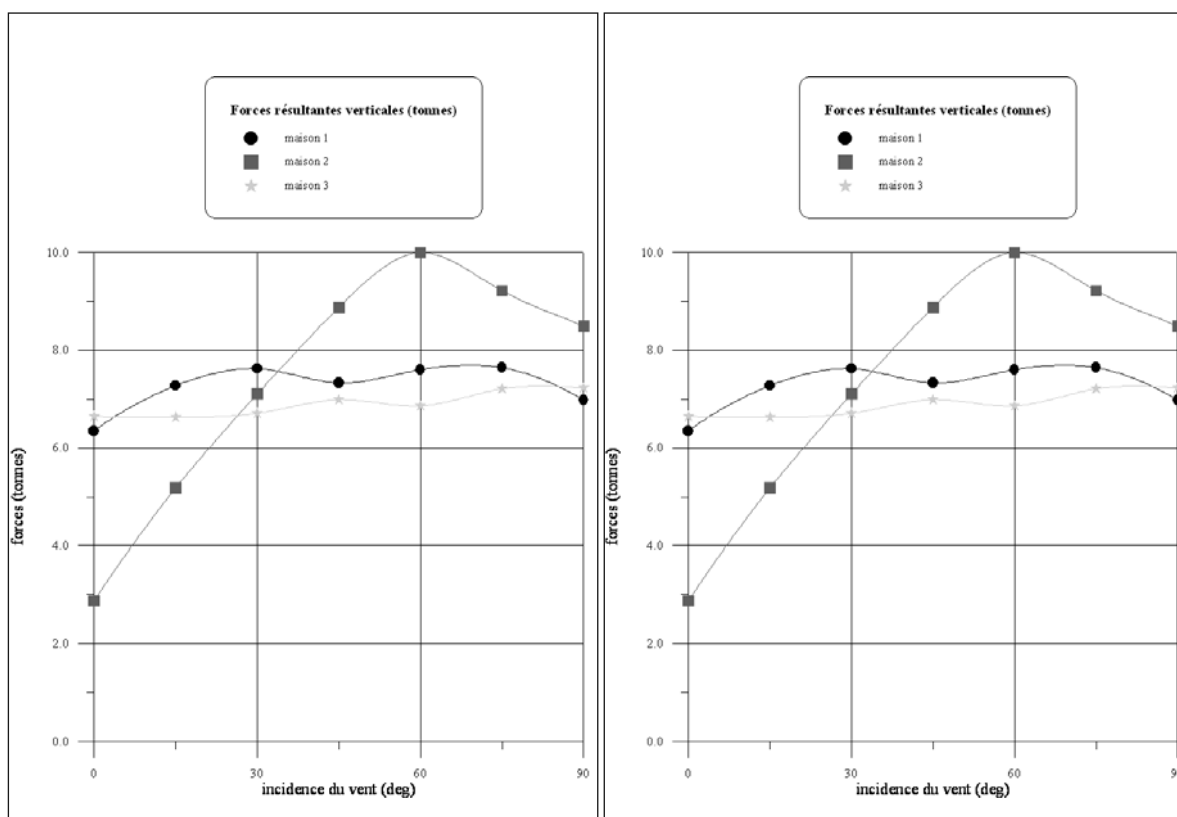


Fig. 4.3. - Forces de traînée

Forces de portance.

Selon la géométrie on identifie des différences significatives de sensibilité à la direction du cyclone. On peut également faire le constat d'une réduction sensible (facteur 1.5) des forces résultantes (charges dimensionnantes) pour une forme de géométrie compacte (type plan octogonal).

En vue de minimiser ces charges, il convient donc dans la mesure du possible de concevoir des formes les plus compactes qui ont un comportement au vent plutôt « tridimensionnel ». Le choix d'une géométrie de « révolution » (carré ou mieux encore : hexagone ou octogone) dont les dimensions au sol sont approximativement équivalentes, couverte d'une toiture à pans multiples (4 et plus) permet donc de réduire significativement la sollicitation globale de la construction.

On peut imaginer en application un type de construction légère dont la forme serait modifiable. (fig. 4.4) Cette gestion de la forme s'intégrerait dans une stratégie de protection en période cyclonique parfaitement adaptée à des constructions de petites dimensions dont le mode constructif pourrait être mixte (maçonnerie + ossature bois).

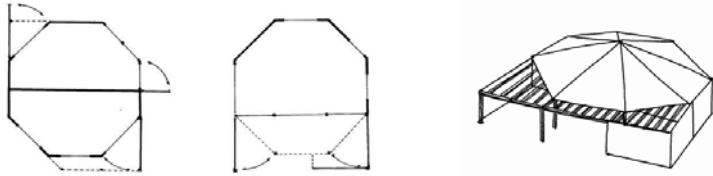


Fig. 4.4. - Architecture cyclonique modulaire.

La gestion de la forme globale de l'architecture par la souplesse de l'espace intermédiaire (la véranda) permet de configurer l'espace pour des situations quotidiennes où la ventilation est nécessaire comme pour des situations extrêmes de vents violents où l'effacement aérodynamique de la construction permet de réduire les efforts globaux appliqués à la structure (fig. 4.5 et 4.6).

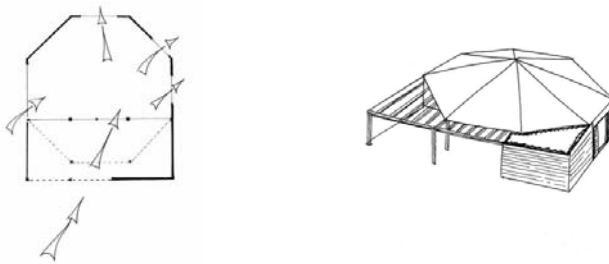


Fig. 4.5. - Configuration ventilation naturelle.

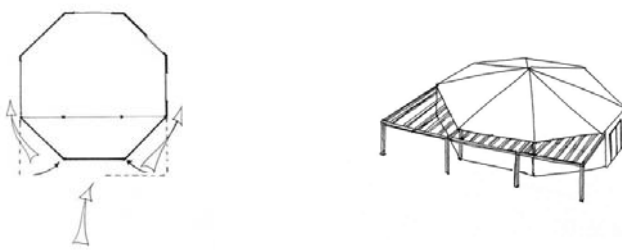


Fig. 4.6. - Configuration cyclonique.

Ce type de solution modulable requiert évidemment une construction légère et des éléments mobiles de relativement faibles dimensions. Il s'adapte bien à des stratégies d'autoconstruction ou des constructions de faible coût. La couverture de l'ossature de l'espace intermédiaire par des vêtements légers aisément maniables (textile par exemple) semble être une bonne solution.

4.2.1.3. INFLUENCE DE LA TOITURE

La forme et la pente de la toiture influent pour une grande part dans la répartition des efforts qui s'y exercent.

Nombre de pans

Le choix d'une toiture à quatre pans permet une forte réduction des charges à l'arrachement en comparaison avec un toit à deux pans. En incidence oblique plus particulièrement la sollicitation est réduite d'environ 50%. Cette réduction des efforts se fait essentiellement sentir en rive de toiture, zone particulièrement sollicitée de la couverture ; et de façon générale, les sollicitations sont mieux réparties sur l'ensemble de la structure porteuse.

Pente

La pente de toiture est un paramètre très sensible dans l'établissement du champ de pression externe (fig. 4.7).

Pour des toits à deux pans de pente inférieure à environ 20°, l'écoulement décolle au voisinage de la rive au vent, et la toiture au vent est fortement dépressionnaire en particulier pour les incidences orthogonales du vent. Au contraire, l'augmentation de la pente tend à diminuer les zones de décollement réduisant de la sorte les risques d'arrachement.

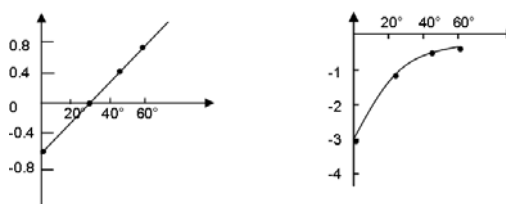


Fig. 4.7. - Influence de la pente sur les coefficients de pression mesurée sur le versant au vent du toit pour une incidence de 0° (incidence orthogonale à la façade)

Pour ce qui concerne le toit sous le vent, la pente a peu d'influence aux faibles incidences sur l'écoulement induit par les zones de décollement, mais la dépression tend à augmenter avec la pente en incidence oblique.

En conséquence puisque l'amélioration obtenue sur le toit au vent, par augmentation de la pente, est accompagnée d'une aggravation des dépressions sous le vent, il n'est pas opportun d'incliner les pans de toiture au-delà de 30°.

En outre, quelle que soit la pente, les rives restent toujours des zones particulièrement exposées.

En synthèse, l'analyse de moindre sollicitation tant en action globale sur la toiture qu'en action locale au niveau des rives et des arêtes, conduit à l'identification d'un optimum architectural qui consiste en une volumétrie

plutôt compacte, sans débord tendant vers le cube avec une toiture à quatre pans (au minimum) de pente voisine de 30°.

Ce type de volumétrie présente un comportement au vent tridimensionnel qui favorise les lois de brassage au niveau du contournement et minimise en conséquence les champs dépressionnaires extrêmes.

Dans le cadre de la conception d'une architecture de type collectif, on conseillera de décliner des formes qui se « couchent » sous le vent, plutôt que de construire des bâtiments de géométrie sensible.

Ainsi les immeubles de type « barres » qui présentent une faible épaisseur mais de grandes largeurs et hauteurs et qui sont couverts de toit à double pans de faible pente sont à éviter.

Au contraire on privilégiera les projets de volumétrie plus « assise », on ne multipliera pas le nombre d'étages à l'excès en favorisant la conception de collectifs « horizontaux », et on cherchera à conserver des pentes de toiture proches de 30°.

L'association de deux « demi-formes » à fortes pentes de toiture peut également constituer une bonne solution (fig. 4.8).

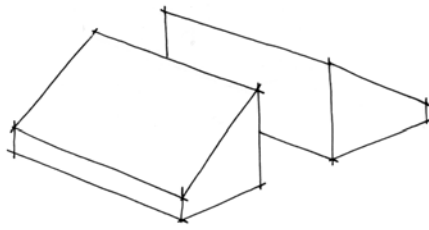


Fig. 4.8. - Constitution d'une forme adaptée à la sollicitation cyclonique par association de deux bâtiments.

On favorisera aussi les mêmes critères pour les volumétries globales de bâtiments et ensembles de bâtiments au sein d'un plan masse (fig. 4.9).

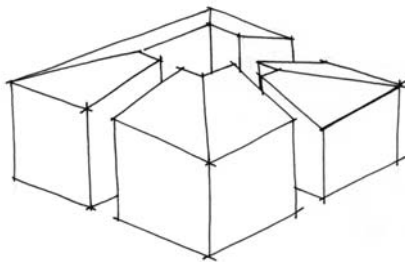


Fig. 4.9. - Composition urbaine cyclonique.

Éléments singuliers de toiture

Les débords de toiture constituent des éléments particulièrement sensibles au vent puisqu'ils cumulent des surpressions à l'intrados (face inférieure de l'extension) et des dépressions à l'extrados (face supérieure de l'extension) qui se combinent générant ainsi une charge résultante maximale.

Réduction des débords

Tout « accident » survenant sur un de ces appendices ne doit pas entraîner la ruine de l'édifice par soulèvement de la toiture. La réponse la plus élémentaire consiste à réduire le plus possible les extensions solidaires de la structure principale de la construction (fig. 4.10).



Fig. 4.10. - Réduction des débords de toiture.

D'une manière générale, tout élément de toiture en porte à faux doit être étudié avec attention de sorte que la rupture éventuelle de ce dernier n'entraîne pas de sinistre sur le reste de l'édifice.

Déconnexion structurale

Dans de tels cas, il sera toujours conseillé de désolidariser les systèmes structuraux principaux et secondaires. La structure annexe doit alors seulement être en appui sur la structure principale (fig. 5.0).



Fig. 5.0. - Désolidarisation structurale des vérandas.

Éléments fusibles

Outre la désolidarisation des systèmes structurels il est également conseillé de déconnecter de la vêtue principale, les éléments de couverture susceptibles d'être arrachés par le vent (fig. 5.1). Une véritable stratégie d'éléments « fusibles » est alors mise en œuvre. Ce principe de sauvegarde des éléments essentiels du clos et du couvert est adaptable au bâti existant comme à l'immobilier neuf.



Fig. 5.1. - Éléments fusibles.

4.2.1.4. CONCEPTION EN VUE DE LA RÉDUCTION DES CHARGES RÉSULTANTES

Champ de pression externe – réduction des sollicitations locales

Indépendamment de la volumétrie générale de la construction et du champ de pression externe moyen, il subsiste toujours sur l'enveloppe des sollicitations localisées et en particulier des dépressions ponctuelles. L'observation des champs de pression externes permet de mettre en évidence les zones de forte sollicitation (fig. 5.2) :

Si le toit est globalement en zone dépressionnaire, les arêtes et les rives de la toiture soumises à de très forts niveaux de pression sont particulièrement sollicitées et génèrent dans leur sillage des zones de décollement.

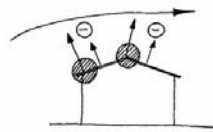


Fig. 5.2. - Zones de forte dépression

Par l'intervention de dispositifs externes, il est possible au niveau des rives basses de toiture (égout) de contrôler et réduire ces sollicitations.

Les dispositifs proposés ont des modes d'action différents :

Freiner la composante verticale de la vitesse du vent et ainsi réduire le décollement et donc la dépression locale (fig. 5.3). Une sorte de grille horizontale de conception relativement simple permet cet effet. Sa perméabilité doit rester calibrée (de l'ordre de 25 à 30%) et sa profondeur doit être égale à environ 50 à 60cm. Le système doit assurer une continuité sur tout le périmètre de la construction. Comme suggéré précédemment, il est prudent de concevoir l'accroche de ce système sur la structure verticale et non solidairement à la charpente ou la couverture.

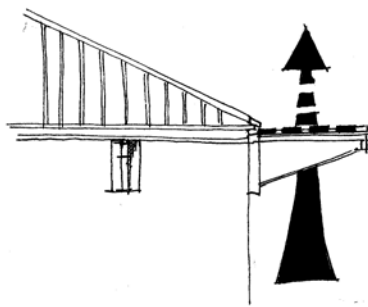


Fig. 5.3. - Réduction de la composante verticale de la vitesse du vent.

Générer des tourbillons qui augmentent les lois de mélange et minimisent les dépressions susceptibles de décoller les rives de la couverture (fig. 5.4). Une frise dentelée positionnée verticalement à hauteur de l'égout et faisant le tour de la construction peut assurer cette fonction.

Les motifs de cette frise dépassent la ligne basse du pan de toiture d'environ 20 à 30 cm.

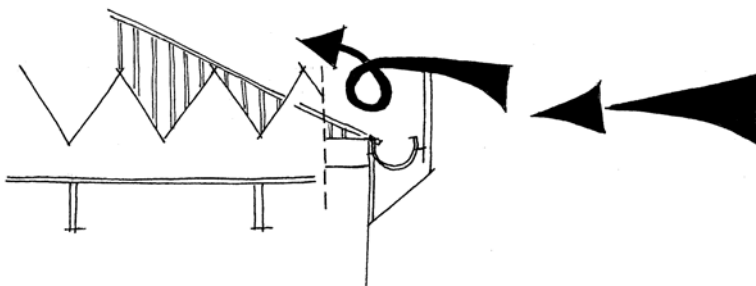


Fig. 5.4. - Un générateur de tourbillons réduit la force locale d'arrachement.

Ces dispositifs externes ne requièrent qu'une mise en œuvre relativement simple et peuvent parfaitement s'adapter à l'habitat existant comme aux constructions neuves. Ils permettent de réduire les charges locales d'un facteur 1.5 à 2 en fonction des incidences de vent. Ces deux principes ont des actions différentes par leur nature mais leur efficacité ne se cumule pas. Il n'est donc pas judicieux de vouloir compliquer le dispositif par la juxtaposition des deux systèmes. La grille horizontale présente l'intérêt de cumuler les fonctions de protection cyclonique et de brise-soleil (fig. 5.5).

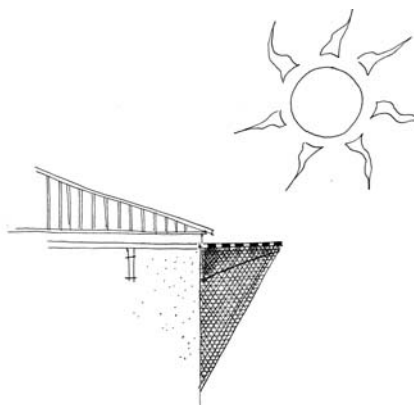


Fig. 5.5. - Système de protection cyclonique et pare-soleil.

Contrôle du champ de pression interne

L'effort exercé sur une paroi est directement lié à la résultante des pressions externe et interne. Outre les principes de réduction des charges du strict point de vue du champ de pression externe, il est donc également utile de pouvoir contrôler le niveau moyen de pression interne pour maîtriser les charges résultantes exercées sur la paroi considérée. Ce contrôle simultané des pressions externes et internes doit permettre une réduction sensible des charges appliquées sur la structure et la vêtue de la construction. A l'intérieur d'un bâtiment, la pression résulte du champ de pression externe et de la nature et de la répartition des perméabilités et ouvertures sur

la forme (fig. 5.6). Une seule ouverture sur une façade (porte ou fenêtre ouverte) impose à l'intérieur du bâtiment un niveau de pression comparable à celui régnant à l'extérieur au droit de cet orifice. Dans ce contexte, la pression intérieure suit pratiquement les fluctuations de la pression externe. Avec deux ouvertures, la pression interne devient une « moyenne » de ces deux mises à l'atmosphère, pondérée par le débit de fuite (rapport de force des champs aérodynamiques entre les deux orifices et des caractéristiques de l'écoulement d'équilibrage interne qui se crée). Une porosité homogène (fuites, joints, recouvrements etc...) répartie sur l'ensemble des façades, conduit à une pression interne légèrement négative et qui peut être considérée comme peu variable dans le temps en raison du filtrage des fluctuations du champ de pression externe par les pertes de charge des fuites. Elle est en bonne approximation égale à la moyenne des pressions moyennes extérieures s'exerçant sur les éléments de paroi poreux, pondérée par la surface de chacun d'eux.

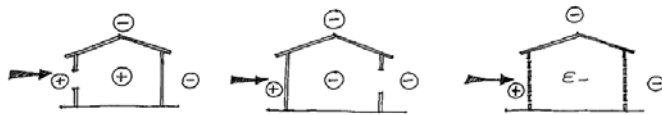


Fig. 5.6. - Mécanisme d'équilibrage des pressions internes.

Par conséquent en vue de contrebalancer les dépressions externes susceptibles d'arracher la couverture d'une construction, la solution consiste à conduire à l'intérieur du volume une dépression de niveau semblable.

La réalisation d'un « puits » (fig. 5.7) au centre de la construction créant une liaison entre le volume intérieur et la partie la plus haute de la toiture, où règne un niveau dépressionnaire très fort, permet un équilibrage des pressions entre l'intérieur et l'extérieur, de telle sorte que les sollicitations de la toiture soient réduites voire annulées.

Le positionnement central du puits est dicté par le niveau de dépression maximal existant au sommet de la construction (fig. 5.8) et intègre la notion d'incidence quelconque du vent, ce qui est une caractéristique fondamentale des vents cycloniques. La mise en relation pneumatique par le puits de l'intérieur de la maison et de la zone de dépression voisine du faîtage, conduit à un niveau fortement dépressionnaire à l'intérieur du volume.

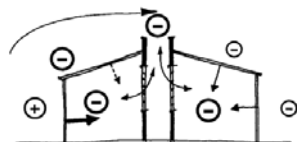


Fig. 5.7. - Contrôle de la pression interne par un puits d'équilibrage.

Les parois sont alors soumises à une sollicitation résultante qui tend à plaquer façades et toiture vers l'intérieur sur la structure porteuse. Les risques d'arrachement sont de la sorte très largement réduits y compris dans les zones sous le vent.

Ce procédé suppose par ailleurs une bonne étanchéité à l'air de la construction afin que la surface du puits d'équilibrage soit toujours très supérieure à celle des éventuelles fuites. Pour une totale efficacité du puits, celui-ci doit présenter une section d'environ 1,5 à 2 m² pour une maison de surface moyenne. Par ailleurs, le principe de fonctionnement suppose que l'ensemble des volumes de la construction soit en liaison pneumatique avec ce puits lors du cyclone. Un volume interne qui serait non communiquant, aurait un niveau de pression hétérogène par rapport au reste du bâtiment et pourrait localement induire des dommages locaux susceptibles de se généraliser à l'ensemble de la construction.

Des tests en soufflerie ont montré que la présence du puits annule en valeur moyenne les efforts résultants d'arrachement, ce qui signifie que les charges moyennes appliquées sont des charges d'écrasement.

La parfaite efficacité du puits d'équilibrage dans toutes les incidences de vent, suppose qu'il soit rehaussé d'une hauteur minimale de 40 cm au-dessus de la cote de faitage afin d'obtenir un décollement aérodynamique franc susceptible de générer une dépression nette. Rappelons que les charges à l'écrasement ne constituent pas de véritable problème car les structures « travaillent » généralement bien en compression, mais qu'au contraire, les dommages sont généralement le fait d'arrachement d'éléments de vêture ou de « déboîtement » de l'ossature.

Néanmoins, le vent étant un signal fluctuant, il peut localement subsister en événement de pointe des efforts de succion qu'il convient de traiter par des dispositifs de protection externe tels ceux qui ont été décrits précédemment.

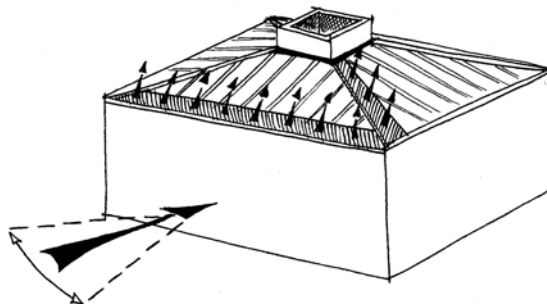


Fig. 5.8. - Zones sensibles à l'arrachement

Dans la mesure où les deux concepts énoncés ont des actions cumulatives, nous préconiserons le recours simultané au principe d'équilibrage des pressions interne et externe et à celui de réduction des efforts locaux externes.

4.2.1.5. LES ESPACES INTERMÉDIAIRES, VÉRANDAS ET AUVENTS

Les vérandas de conception traditionnelle présentent une architecture particulièrement fragile du point de vue de la sollicitation cyclonique (fig. 5.9).

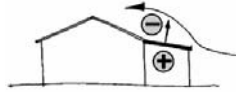


Fig. 5.9. - Cumul de l'effort de surpression intrados et de dépression extrados.

Impact de la forme

On peut établir une distinction entre deux configurations classiques de véranda (fig. 5.10a et b).

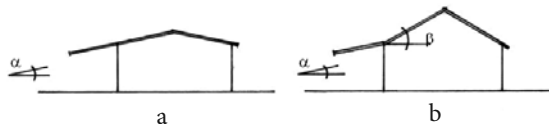


Fig. 5.10. - Effet de la géométrie globale sur le champ de pression sur la toiture d'une véranda.

a. La première a une pente qui s'inscrit dans le prolongement de la toiture de la maison
 b. La seconde présente une rupture de pente avec le toit de la partie close maison

La charge résultante à l'arrachement est supérieure dans le cas d'une continuité de pente.

Il est donc pertinent de privilégier les configurations présentant des ruptures de pente de toiture entre la partie close de l'habitat et les différents développements externes.

Effacement aérodynamique de la toiture

Équilibrage intrados/extrados

Le principe de protection repose sur la « transparence » aérodynamique de la toiture de la véranda afin de réduire voire d'annuler le déséquilibre intrados/extrados et tendre ainsi vers un « effacement » aérodynamique (fig. 6.0). Cet objectif peut-être atteint par la mise en œuvre d'un système à lames parallèles verticales de largeur 15 à 20 cm auquel est adjoit un caillebotis de perméabilité proche de 30% installé en partie haute des pignons. Le maintien d'un système de protection de rive de perméabilité environ égale à 25% est indispensable à la tenue de la toiture de la maison. De préférence, on choisira un procédé de fixation indépendant de la structure de la véranda.

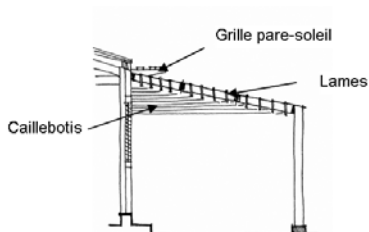


Fig. 6.0. - Véranda équipée de lames verticales

La perméabilité de la toiture permet un équilibrage aisé des pressions de part et d'autre de la toiture. La présence d'un caillebotis en pignon réduit la sollicitation des éléments lors d'incidences obliques et en particulier lorsque la véranda est sous le vent de la maison.

Dans la pratique ces systèmes à lames peuvent être mobiles et ne posséder que deux crans de fixation afin de définir deux positions : configuration quotidienne (fermée) à des fins de protection solaire, et configuration cyclonique (ouverte).

Toiture en surpression

Ce principe de sauvegarde de la couverture de la veranda fait appel au sectionnement de la toiture en pans opaques rabattables (fig. 6.1). Le toit est donc divisé dans le sens de la pente en trois parties d'environ 1m de profondeur. Ces panneaux sont basculés vers le sol afin de former un angle d'environ 40° avec l'horizontale, et forment des sortes de « volets d'appui » (ailerons). L'adjonction d'une joue opaque en partie haute de pignon permet de valider l'efficacité du procédé quelle que soit l'incidence de vent.

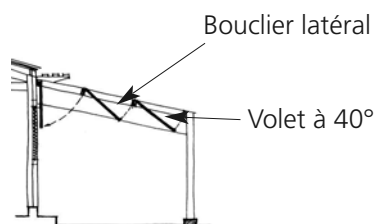


Fig. 6.1. - Véranda à pans inclinés

Lorsqu'elle est au vent, la toiture de la véranda travaille globalement en surpression par l'effet de l'inclinaison de ses constituants. Lorsqu'elle est sous le vent (en incidence oblique de 120° par exemple), les joues opaques font office de bouclier déflecteur et assurent ainsi la stabilité des pans inclinés. Les panneaux doivent néanmoins être solidement ancrés dans cette position de sorte qu'ils ne battent pas, ce qui conduirait inexorablement au sinistre.

Les deux types de traitements proposés permettent de réduire les efforts exercés sur la toiture de la véranda environ d'un facteur 6. Le traitement aérodynamique de la véranda permet donc de donner à ce dispositif architectural dont la géométrie traditionnelle est particulièrement sensible, de bonnes qualités de tenue à la sollicitation cyclonique.

L'adjonction d'une véranda de ce type à une maison n'affranchit cependant pas du maintien des protections locales en rives de toiture. Elles peuvent être conçues comme des éléments constitutifs de la véranda ou en être dissociées.

La prudence élémentaire conduira toutefois à déconnecter les structures de la maison et de la véranda afin qu'un éventuel dommage sur l'extension n'entraîne pas la ruine totale de l'édifice.

4.2.2. Exemples d'applications du puits d'équilibrage des pressions à différentes échelles

Prototype d'habitat individuel

Dans la conception d'un habitat simple pour s'affranchir d'un savoir-faire élaboré dans le domaine de la mise en œuvre, ou tout simplement pour minimiser la contrainte, il est impératif d'atteindre de bonnes performances aérodynamiques. Les deux principes évoqués précédemment permettent, s'ils sont bien appliqués, d'obtenir d'excellents seuils de tenue au vent de l'habillage de la construction.

Prenons pour exemple une petite maison de type traditionnel : plan rectangulaire 8 m x 6 m, couverture 4 pans de faible pente (16°) (fig. 6.2).



Fig. 6.2. - Type d'architecture traditionnelle.

Des tests en soufflerie sur un modèle à échelle proche de la vraie grandeur, ont permis de comparer les performances de tenue au vent d'une maison classique et de la même maison équipée d'un puits d'équilibrage des pressions et de systèmes de protection locale positionnés au niveau de l'égout. Les résultats ont validé l'efficacité des concepts par le constat d'une réduction des charges d'arrachement d'un facteur 4.

A des fins d'application pratique, il est possible de simplifier un concept d'habitat cyclonique reposant sur les principes aérodynamiques simples que nous avons énoncés et qui se présenterait sous la forme d'un kit composé des éléments suivants (fig. 6.3 et 6.4) :

- Une dalle béton comprenant des fondations adaptées à la nature du terrain (longrines, semelles, éventuellement radier...) et des systèmes d'ancrages de la structure.
- Un noyau maçonné central multifonctions :
 - Appui de l'ossature du bâtiment et de la charpente
 - Système de distribution des réseaux fluides (eau, gaz, électricité)
 - Puits d'équilibrage des pressions

- Une ossature de montage simple (par exemple des systèmes moisés avec assemblages boulonnés) correctement dimensionnée et contre-ventée.
 - Des dispositifs de protection de rive.
- Le remplissage, la vêtiture et l'aménagement intérieur pourraient être laissés à l'initiative de l'habitant.

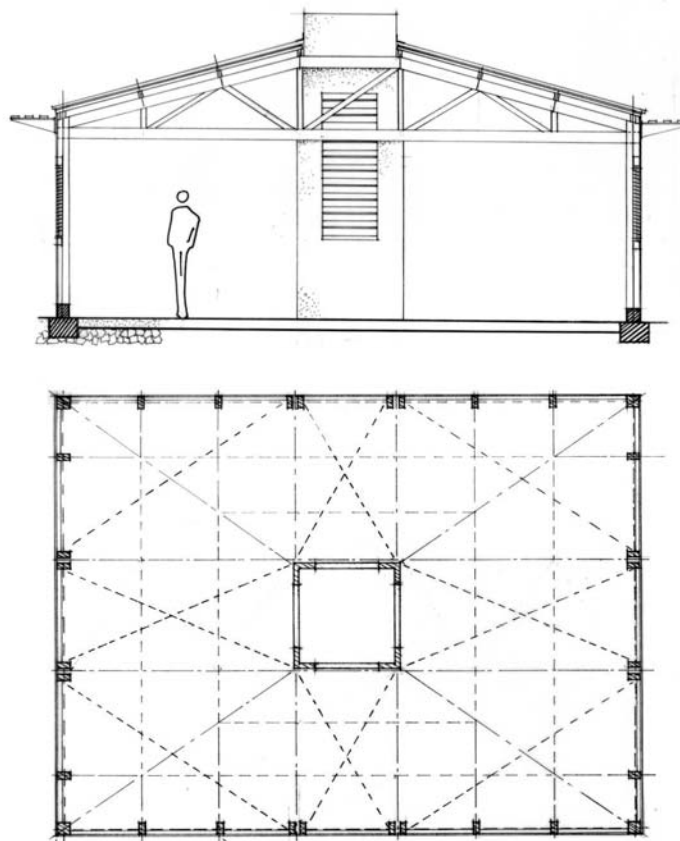


Fig. 6.3. - Coupe et plan d'une habitation cyclonique

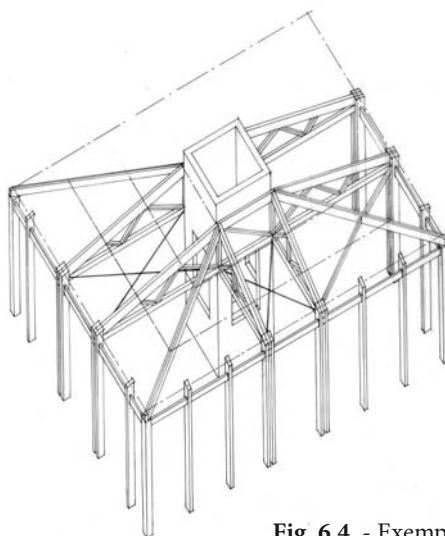


Fig. 6.4. - Exemple d'ossature préfabriquée

Un tel concept d'habitat s'adapte bien à l'auto-construction : la rigueur apportée à la réalisation (préfabrication artisanale ou industrielle) et à l'assemblage du kit suffirait à reprendre les efforts, et ceci même si le second œuvre, et en particulier les accroches de couverture, est réalisé sans un respect scrupuleux des règles de l'art.

Le principe proposé offre donc de réduire les exigences constructives inhérentes aux conditions cycloniques et permet ainsi d'assurer la tenue mécanique de la structure tout en laissant largement place à l'initiative de « l'habitant-constructeur ». La seule condition à respecter en matière d'aménagement est la nécessité de laisser une communication entre chacune des pièces et le puits central afin que l'intégralité du volume soit en équilibre avec la pression régnant au faite du toit.

Dans la pratique quotidienne, le puits est également compatible avec les principes de ventilation naturelle puisqu'il favorise et développe l'irrigation des volumes internes.

L'étanchéité à la pluie peut-être assurée par un dispositif en « nid d'abeilles » qui « draine » les eaux pluviales en évitant qu'elles ne frappent directement les percements verticaux des puits, mais qui ne pénalise en rien le phénomène d'équilibrage (fig. 6.5).

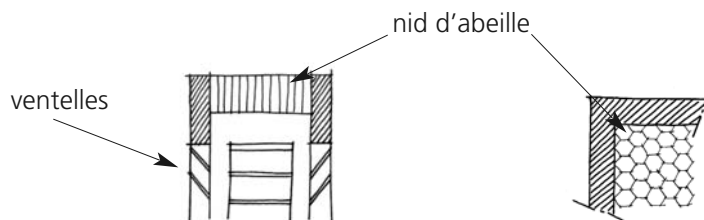


Fig. 6.5. - Coupes sur puits : système de nid d'abeilles et ventelles.

Développements : de l'échelle du puits à celle du patio

Le modèle proposé dans l'exercice précédent est une case de type populaire de petites dimensions (~48m²) afin d'illustrer le principe sur le thème de l'auto-construction. Les concepts aérodynamiques énoncés ici peuvent évidemment s'adapter à des formes plus élaborées et des dimensions plus importantes pour se conformer à des schémas plus proches de la maison individuelle construite par des professionnels.

On peut effectivement décliner ces principes à toute forme d'architecture qui s'organise autour d'un espace central de type patio – que cette architecture soit totalement fermée autour de ce patio ou que des espaces ouverts soient ménagés (architecture en plots sous une couverture unique) (fig. 6.6).

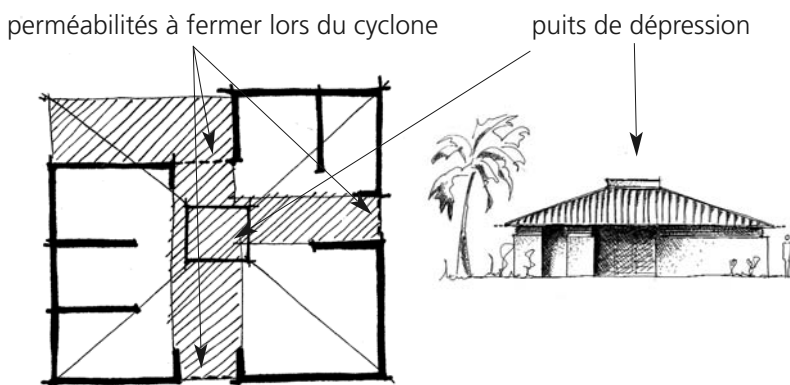


Fig. 6.6. - Modèle d'une architecture tropicale cyclonique.

Dans le cas d'une organisation spatiale en plots, la seule nécessité est de pouvoir clore hermétiquement les perméabilités lors de l'alerte cyclonique. Le caractère même de ces architectures ouvertes sur l'intérieur facilite la gestion de l'équilibrage des pressions pour l'intégralité du volume de la maison.

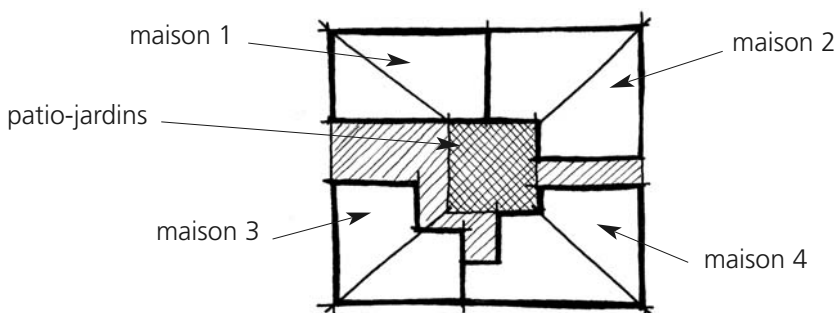


Fig. 6.7. - Ensemble collectif autour d'un patio cyclonique.

Des expériences en soufflerie ont validé par ailleurs l'application de ce même principe à l'échelle d'un ensemble de logements individuels. Le puits d'équilibrage utilisé comme patio peut donc se décliner à l'échelle du jardin semi-collectif ou du groupement de jardins privatifs, et les blocs à l'échelle de la maison. Le concept n'est donc en aucun cas restreint à la seule application à la maison individuelle (fig. 6.7). Un soin attentif doit cependant être porté au traitement aérodynamique du puits central car il est impératif que la dépression interne soit franche. Pour ce faire il faut relever l'espace central d'une partie verticale de maçonnerie comme il a été fait pour le puits. Il faut aussi que la dépression centrale puisse atteindre directement le volume intérieur de chaque maison et en particulier les zones sous toiture. Pour ce faire il est nécessaire de concevoir des perméabilités entre ces zones et le patio (caillebotis par exemple).

4.2.3. PROTECTION DES CONSTRUCTIONS EXISTANTES

Pour assurer la pérennité des ouvrages existants, quelques règles simples doivent être observées dans le cas de constructions fragiles.

Filets brise-vent

En développement et en complément du système d'haubanage une stratégie un peu plus sophistiquée consiste à tendre de l'égout à une ligne au sol parallèle à la façade, espacée de celle-ci d'une distance au moins égale à sa hauteur, un filet de perméabilité comprise entre 30 et 50%. Cela permet de réduire efficacement la succion en rive de toiture au vent ainsi que la surpression en façade (fig. 6.8). La perméabilité est le rapport géométrique de la superficie de vide ramenée à la surface totale de l'élément. Dans le cas de ce principe de brise-vent, une perméabilité supérieure à 50% n'est d'aucune efficacité.

Ce type de protection ne peut apparaître comme totalement généralisable, mais peut constituer une forme de protection ponctuelle et complémentaire qui s'intègre bien dans l'habitude d'arrimage de l'habitat lors d'événements cycloniques. Il convient bien évidemment d'assurer la bonne tenue de ces filets en concevant des massifs d'ancrage résistants et en répartissant les accroches de part et d'autre de la maison sans venir solidariser le filet et un élément de toiture par exemple.

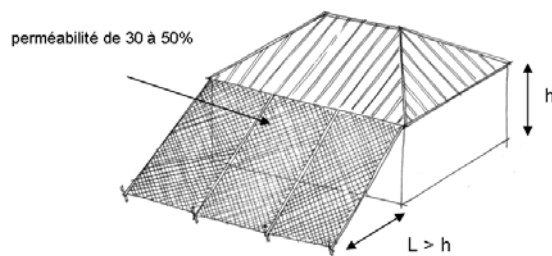


Fig. 6.8. - Filet de protection.

Protection des ouvrants

Les baies en matériau verrier sont particulièrement fragiles aux impacts de projectiles portés par le vent. Il convient donc d'assurer une protection mécanique correcte des ouvertures.

Il est nécessaire de prévoir des volets capables de résister aux impacts, mais également dimensionnés pour les efforts dus au vent (volets eux-mêmes et fixations) (fig. 6.9).

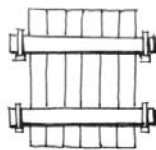


Fig. 6.9. - Volet de protection des ouvrants.

Pour les baies de grandes dimensions, la difficulté réside essentiellement dans la tenue du volet lui-même. Une solution consiste en une configuration en « accordéon » qui assure le contreventement et donc la rigidité du volet afin qu'il ne fléchisse pas sous l'action du vent et ne sorte pas de son logement (fig. 6.10).

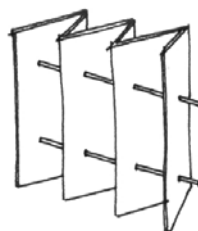


Fig. 6.10. - Volets pour ouvrants de grande dimension.

Protection des constructions sur pilotis

Les bâtiments sur pilotis sont très courants sous les tropiques. Cumulant un effet de sur-hauteur et un mécanisme de sillage qui réduit les recirculations de culot, les constructions sur pilotis favorisent les principes de ventilation naturelle (fig. 7.0).

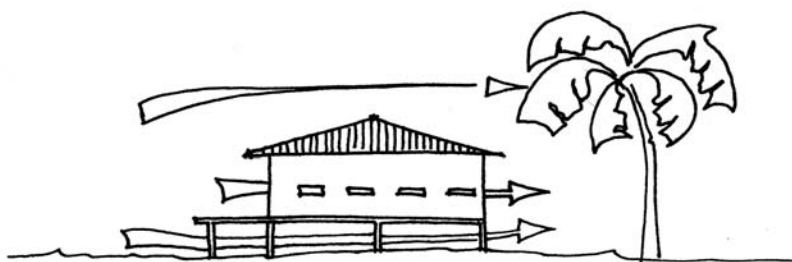


Fig. 7.0. - Ventilation des constructions sur pilotis.

En contrepartie elles présentent un véritable handicap en ce qui concerne les charges aérodynamiques. La surpression sur la façade au vent est accrue de même que la succion en partie basse de la toiture au vent.

Une solution consiste à obturer de manière homogène au moins la moitié de l'espace laissé libre sous la maison (fig. 7.1). Du point de vue des charges appliquées, on se retrouve alors dans des gammes proches de celle d'une construction classique. Cette tolérance (combler la moitié seulement de l'espace libre) permet d'assurer une efficacité d'un « colmatage » complet de l'espace même si celui-ci n'est pas très correctement réalisé. Des mal-façons qui laisseraient des perméabilités plus ou moins bien réparties entre les éléments de remplissage, ne compromettraient pas le bon fonctionnement de cette méthode de sauvegarde.

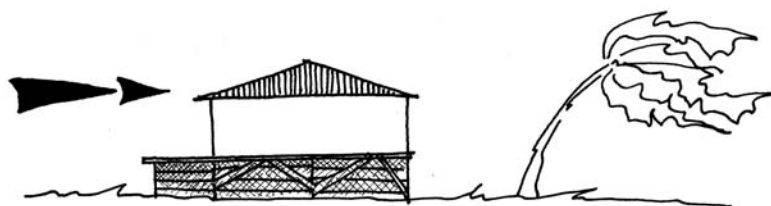


Fig. 7.1. - Protection cyclonique des constructions sur pilotis.

4.3. AMELIORATION DE LA RESISTANCE

Le bon comportement des constructions sous l'action cyclonique passe par une bonne transmission des charges aérodynamiques de l'enveloppe à la superstructure et de la superstructure aux fondations.

Si un seul des maillons de la chaîne est mal conçu, mal dimensionné, mal réalisé ou mal entretenu, l'ensemble de la construction est en péril. Il ne faut pas oublier que le risque cyclonique ne se limite pas aux effets du vent. Les pluies torrentielles et les crues qu'elles engendrent doivent également être prises en compte.

4.3.1. PRINCIPES DE CONTREVENTEMENT

Le bon comportement d'une construction sous l'action du vent passe d'abord par la capacité de la superstructure à transmettre les efforts horizontaux aux fondations. C'est ce qu'on appelle, pour des raisons étymologiques évidentes, le contreventement.

Cette partie concerne tous les types de constructions mais plus particulièrement les constructions dites à ossature, c'est à dire dont la structure est essentiellement composée d'éléments linéaires : poteaux, poutres, tirants... Les constructions en maçonnerie sont également concernées mais sont généralement moins sensibles aux effets du vent.

Dans toute structure à ossature, on considère que la liaison par défaut entre deux éléments adjacents est une articulation. Cela signifie que les deux éléments en question sont censés pouvoir tourner librement l'un par rapport à l'autre (fig. 7.2). Même lorsque ce n'est pas exactement le cas, cette hypothèse va dans le sens de la sécurité.

Contreventement d'une file 2D

Pour commencer, intéressons nous au cas d'une structure bi-dimensionnelle soumise à une force horizontale. L'ensemble des éléments horizontaux et verticaux étant articulés les uns aux autres, la structure ne peut opposer aucune résistance significative à cette action extérieure : elle se comporte comme un vulgaire château de carte. La structure est dite instable (fig. 7.3).

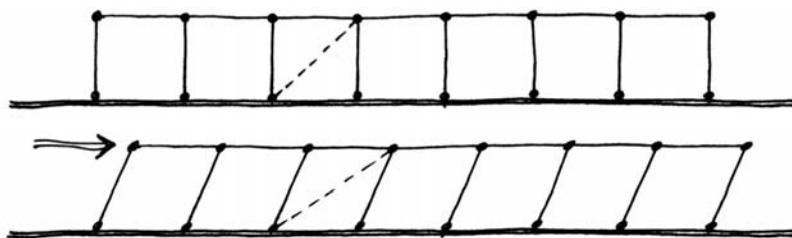


Fig. 7.3. Comportement d'une structure bi-dimensionnelle non contreventée soumise à une force extérieure horizontale

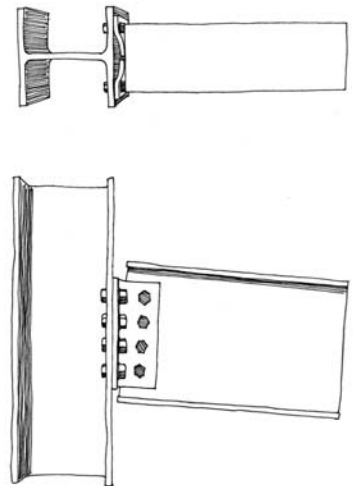


Fig. 7.2. Cette liaison qui, à première vue, peut sembler parfaitement rigide, est en réalité une articulation. Sa rigidité étant beaucoup plus faible que celles du poteau et de la poutre, elle concentre l'essentiel de la déformation en rotation.

On remarque cependant que la déformation de chaque rectangle en parallélogramme entraîne l'allongement de l'une des diagonales et le raccourcissement de l'autre. On peut donc s'opposer à l'effondrement de la structure en plaçant au niveau d'une des diagonales un élément capable de s'opposer à son allongement ou à son raccourcissement, selon le sens de la force extérieure : un élément capable de travailler en traction ou en compression. C'est le principe de base du contreventement d'une structure 2D (fig. 7.4).

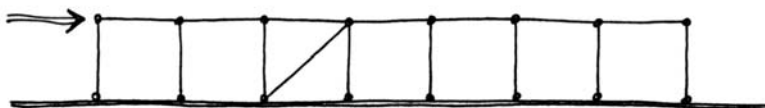


Fig. 7.4. - Contreventement d'une file 2D (ici la diagonale s'oppose à l'allongement : elle travaille en traction).

En théorie, une seule travée contreventée est suffisante pour stabiliser toute une file. Dans la pratique, les calculs effectués par un bureau d'étude peuvent conduire à en placer plusieurs afin de mieux répartir les efforts au sein de la structure.

Il existe un grand nombre de solutions pour constituer un élément vertical de contreventement (fig. 7.5 et 7.6). La plupart sont basées sur la constitution de diagonales capables de travailler en traction et/ou en compression.

Une autre solution, moins efficace mais moins contraignante sur le plan architectural, consiste à s'opposer aux rotations relatives des éléments en remplaçant certaines articulations par des encastresments : poteaux encastres en pied, portiques encastres en tête et éventuellement en pied.

Une dernière solution consiste à remplir totalement le cadre par un panneau rigide capable de résister à une compression (ou traction) diagonale.



Fig. 7.5. - Principaux types d'éléments verticaux de contreventement
 a) Une diagonale capable de travailler en traction et compression
 b) Deux diagonales capables de travailler en traction
 c) Mur de contreventement
 d) Portique encastéré en tête



Fig. 7.6. - Murs de contreventement
 a) Ossature poteaux-poutres avec remplissage en maçonnerie
 b) Maçonnerie chaînée
 c) Voile en béton armé
 d) Mur à ossature bois contreventé par panneaux de contreplaqué ou OSB

Contreventement d'une structure 3D sans contreventement horizontal

Dans le cas rare et non souhaitable où la toiture d'une structure à ossature n'est pas contreventée, la stabilité est conditionnée par la mise en place d'un élément vertical de contreventement par file et par direction. En effet, l'extrême souplesse de la toiture ne permet pas à une file de s'appuyer sur ses voisines (fig. 7.7 ; 7.8 et 7.9). Cette disposition est bien entendu très contraignante sur le plan architectural. C'est la raison pour laquelle il est préférable de faire de la toiture ou du plancher haut de la construction un élément rigide : ce qu'on appelle un *diaphragme*.

Contreventement horizontal par diaphragme

Un diaphragme (plancher en béton armé ou toiture généreusement contreventée) permet de solidariser les différents éléments verticaux de contreventement et de transmettre efficacement à chacun les actions horizontales extérieures.

Le rôle d'un diaphragme peut être comparé à celui du couvercle d'une boîte en carton (fig. 7.10). Sans couvercle, une paroi verticale est trop souple pour reprendre efficacement une force horizontale perpendiculaire appliquée en tête. Avec le couvercle, la même force horizontale est transmise aux deux parois qui sont les plus rigides dans cette direction. Le couvercle agit comme une poutre transmettant les efforts que constituent les parois verticales latérales aux deux appuis.

En théorie, trois éléments verticaux de contreventement correctement disposés (non concourants ni parallèles tous les trois) suffisent à assurer le contreventement du bâtiment (fig. 8.0, 8.1 et 8.2).

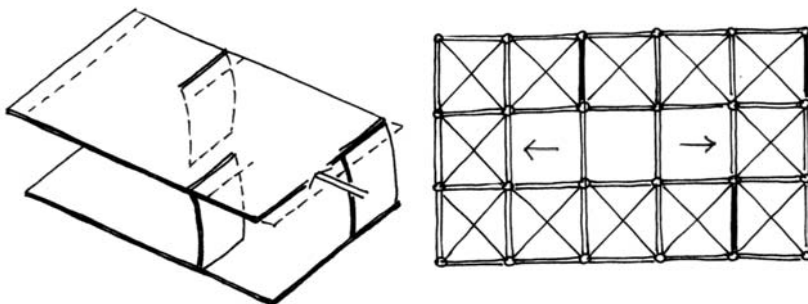


Fig. 8.0. - Mauvaises dispositions des trois éléments verticaux de contreventement. Ils sont parallèles : instabilité en translation.

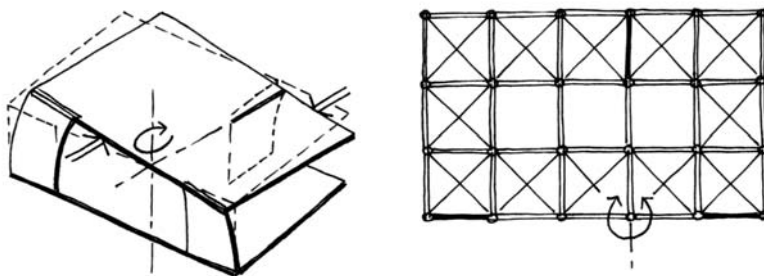


Fig. 8.1. - Mauvaises dispositions des trois éléments verticaux de contreventement. Ils sont concourants : instabilité en rotation.

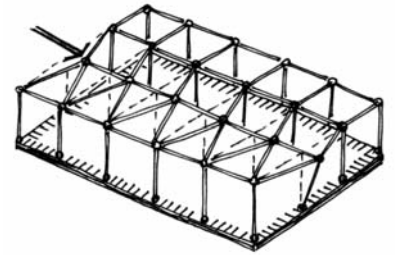


Fig. 7.7. - Absence de contreventements verticaux et horizontaux : instabilité d'une file longitudinale.

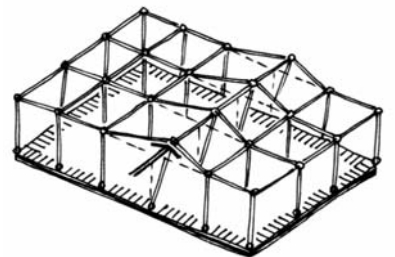


Fig. 7.8. - Absence de contreventements verticaux et horizontaux : instabilité d'une file transversale.

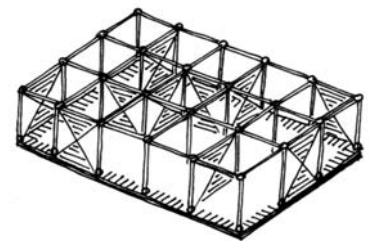


Fig. 7.9. - Absence de contreventement horizontal : stabilisation de chaque file transversale et longitudinale par un élément vertical de contreventement.

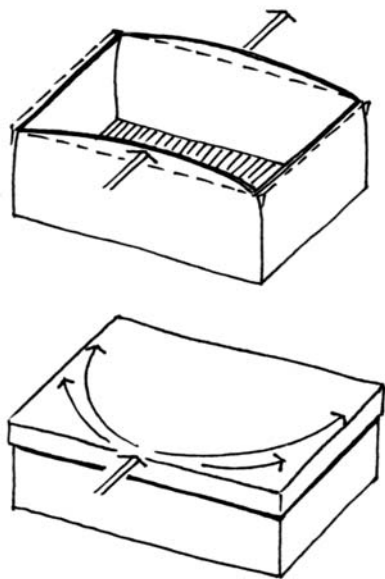


Fig. 7.10. - Plancher diaphragme : analogie avec une boîte en carton

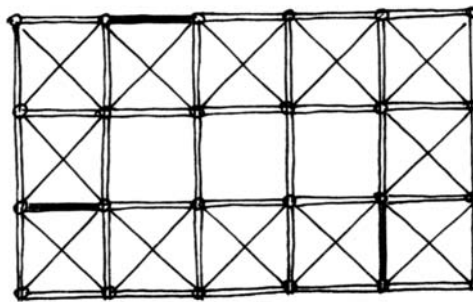


Fig. 8.2. - Disposition correcte minimale des éléments verticaux de contreventement : trois non concourants ni tous parallèles.

Dans la pratique, il est souhaitable d'augmenter le nombre d'éléments verticaux de contreventement et de les éloigner les uns des autres afin d'améliorer la rigidité en torsion du bâtiment (fig. 8.3).

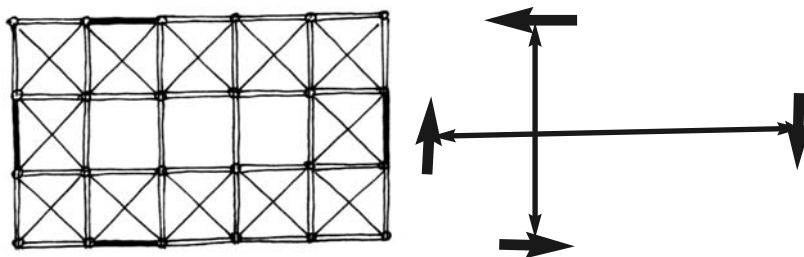


Fig. 8.3. - Disposition améliorée des éléments verticaux de contreventement et couples résistants associés.

Cas des structures à portiques transversaux

Dans le cas des halles contreventées transversalement par des portiques, il n'est plus nécessaire de recourir à un diaphragme complet. Les efforts transversaux sont en effet directement transmis aux portiques les plus proches. Par contre les efforts longitudinaux sont transmis à des éléments verticaux de contreventement par un système de contreventement horizontal appelé poutre au vent (fig. 8.4).

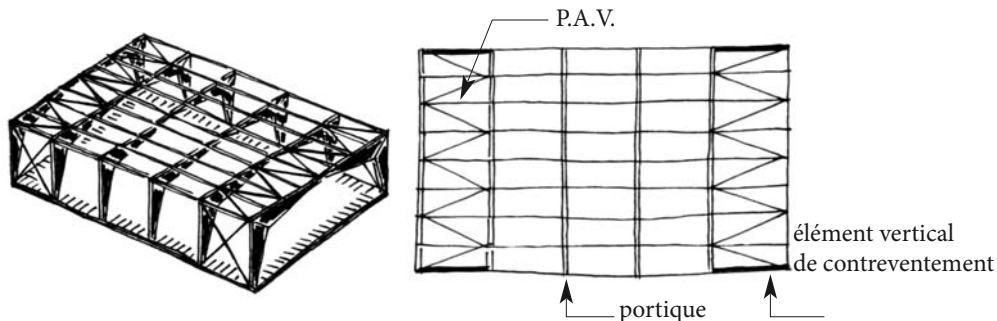


Fig. 8.4. - Contreventement d'une structure à portiques transversaux

Cas des constructions en maçonnerie chaînée

Les constructions en maçonnerie chaînée se comportent généralement bien vis-à-vis de l'action cyclonique. Elles sont naturellement lourdes et rigides, deux facteurs favorables vis-à-vis de l'action du vent.

Une bonne conception et une réalisation soignée du chaînage est néanmoins primordiale : la maçonnerie doit être systématiquement confinée par une ceinture en béton armé (fig. 8.5). La fonction du chaînage est multiple :

- Constituer des trumeaux de contreventement en permettant le développement des bielles de compression,
- Eviter la désagrégation de la maçonnerie en la confinant,
- Améliorer la résistance aux impacts (objets emportés par le vent ou les crues torrentielles),
- Permettre le scellement efficace de la charpente, des menuiseries et autres équipements.

Des chaînages verticaux doivent être disposés à tous les angles, à toutes les extrémités de murs et sur les bords des trumeaux de contreventement. Ces derniers ne doivent comporter aucune ouverture pour permettre la mise en place de bielles de compression.

Les chaînages horizontaux et rampants doivent être soigneusement solidarisés avec les chaînages verticaux par des recouvrements des armatures longitudinales (50 fois le diamètre des armatures).

Toutes les baies doivent être encadrées par une ceinture en béton armé.

Il est fortement recommandé que le dernier niveau soit équipé d'un plancher haut en béton armé. Ce dernier permet non seulement de rigidifier la structure (fonction diaphragme) mais également d'assurer la protection des habitants en cas de destruction de la toiture. En outre, son rôle est favorable vis-à-vis des actions sismiques et du rayonnement solaire.

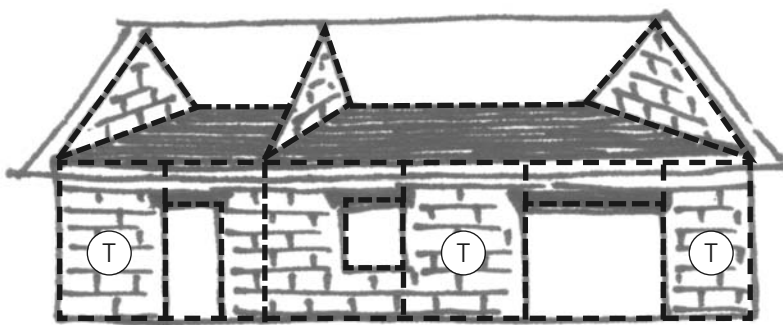


Fig. 8.5. - Principe de chaînage d'une construction en maçonnerie. Un plancher béton assure la fonction de diaphragme rigide : il solidarise l'ensemble des murs du bâtiment.
Les « T » désignent les trumeaux de contreventement constitués par le confinement des panneaux de maçonnerie.

4.3.2. LES FONDATIONS

Erosion du sol et déchaussement des fondations superficielles

Les inondations provoquées par les pluies cycloniques provoquent des écoulements violents qui dévalent les pentes puis rejoignent les lignes naturelles de collecte des eaux : les talwegs (fig. 8.6). Ces écoulements érodent les sols et peuvent déchausser les fondations des bâtiments construits à proximité. Il est donc fortement conseillé d'éloigner les constructions des bordures de talweg lorsque cela est possible.

Dans tous les cas, il est indispensable de faire appel à un géotechnicien.



Fig. 8.6. - Construction en bordure de talweg.

- Dispositions générales pour les fondations superficielles

Les massifs de fondations devront être suffisamment ancrés dans le sol vis-à-vis du risque de ravinement. Dans la mesure du possible, les fondations seront encastrées dans le rocher afin d'éviter les risques de glissement.

D'une manière générale, et plus particulièrement lorsque les caractéristiques du sol sont médiocres, les risques d'affouillement peuvent être limités par des ouvrages parafoilles dont le rôle est de confiner le sol porteur (fig. 8.7).

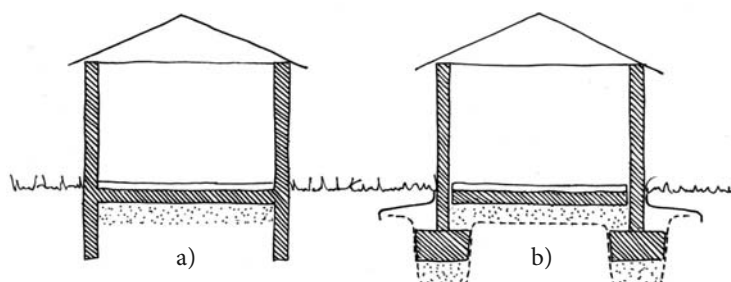


Fig. 8.7. - Ouvrages parafoilles dans le cas de fondations superficielles
a) Radier et bûches
b) Confinement des remblais sous massifs par nappes géotextiles

- *Constructions en bordure de talweg ou de cours d'eau*

Dans l'hypothèse d'une construction en bordure de talweg il peut être judicieux de rehausser la construction au moyen d'un remblai bien compacté. Dans tous les cas, le talus, qu'il soit « naturel » ou « artificiel » doit être stabilisé. Différentes familles de solutions peuvent alors être envisagées :

Techniques de végétalisation

On peut recourir à une végétalisation de l'ensemble du talus en combinant l'utilisation de plantes herbacées qui assurent une stabilisation à court terme et de plantes arbustives dont le réseau de racines, plus profond et plus étendu, assure la stabilisation à long terme. Il est préférable d'utiliser des espèces locales. Il est également souhaitable de diversifier les espèces et favoriser les plus rustiques, capables de s'autorégénérer et de résister aux maladies et insectes.

La plantation d'arbres sur le replat du terrain peut permettre de parfaire la consolidation du sol. On doit cependant éviter les arbres à trop haute tige susceptibles d'être déracinés par le vent (fig. 8.8).

Il est également loisible de recourir aux techniques du génie végétal, science hybride qui découle de la botanique, la mécanique des sols, l'hydraulique, etc. A partir de l'étude de la croissance et du développement de certaines espèces de plantes, des techniques ont été mises au point pour utiliser le végétal comme matériau structural pour protéger les sols contre l'érosion et les stabiliser. Toutes ces techniques sont basées sur un même principe : introduire des branches coupées qui vont s'enraciner et se développer sur le talus.

Les rangs de plançons désignent un alignement de branches ramifiées enfouies presque entièrement sous un remblai. Plusieurs branches sont attachées et sont ainsi étagées, formant plusieurs cordons de végétation horizontaux et parallèles. Ils sont plutôt employés sur des remblais nouveaux peu compactés et peuvent s'adapter à des pentes fortes.

On peut également utiliser des « fagots », arrangements de branches solidement attachées de façon à former un boudin uniforme. Ils sont mis en place par des piquets profondément enfoncés dans le sol. Ils sont déposés sur le talus de manière à créer une barrière protectrice. Ils peuvent être employés sur des talus anciens et de fortes pentes.

En bas de talus, on peut utiliser des « fascines », arrangements de branches placées dans le même sens et solidement fixées entre deux alignements parallèles de pieux.

Les « matelas de branches » désignent un arrangement de branches déposées sur la pente et retenues à l'aide de fils métalliques. Les branches utilisées sont placées parallèlement à la pente. Le dispositif assure une fonction protectrice immédiate contre le ravinement et doivent être combinés avec d'autres méthodes en bas de talus : fagots, fascines ou enrochement léger.



Fig. 8.8. - Stabilisation du talus par végétalisation.

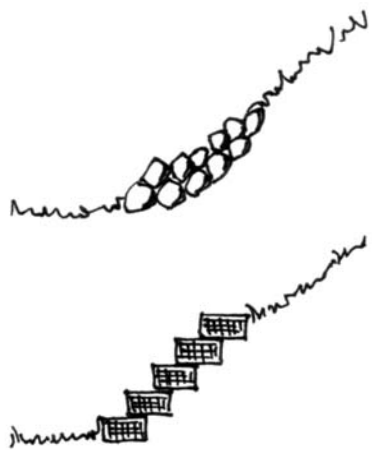


Fig. 8.9. - Stabilisation du pied de talus par enrochements (ou gabions).

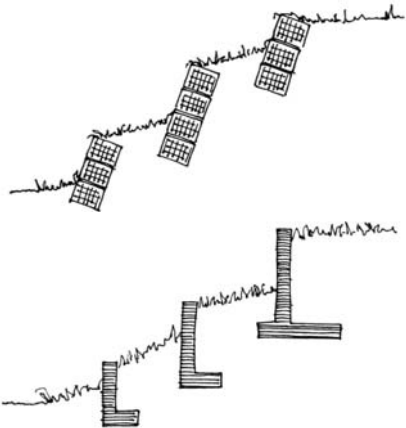


Fig. 8.10. - Stabilisation de l'ensemble du talus par murs de soutènements : murs-poids en gabions ou murs cantilever en béton armé.

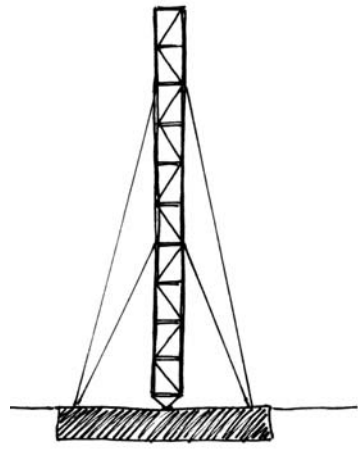


Fig. 9.1. - Pylône Haubanné.

Utilisation de géotextiles

La stabilisation des talus peut également être obtenue en disposant des nappes horizontales de géotextiles. Cette solution est particulièrement adaptée dans le cas de talus remblayés de fortes pentes et lorsqu'une efficacité immédiate est exigée. La protection superficielle peut également être assurée par une solution textile favorisant l'accroche d'une couche végétale.

Solutions minérales

Parmi les solutions « minérales », on peut citer la protection du pied de talus par enrochement ou la stabilisation de l'ensemble de la pente par murs de soutènement (murs-poids ou murs cantilever) (fig. 8.9 et 8.10).

- Constructions sur versants

Les fondations superficielles des bâtiments construits sur des versants peuvent être protégées des affouillements par des parois profondément enterrées en amont (fig. 9.0). Ces parois peuvent être réalisées en béton armé, palplanches, mais peuvent également être constituées de pieux en bois bien jointifs.

Une stabilisation du terrain par végétalisation ou murs de soutènements est également envisageable.

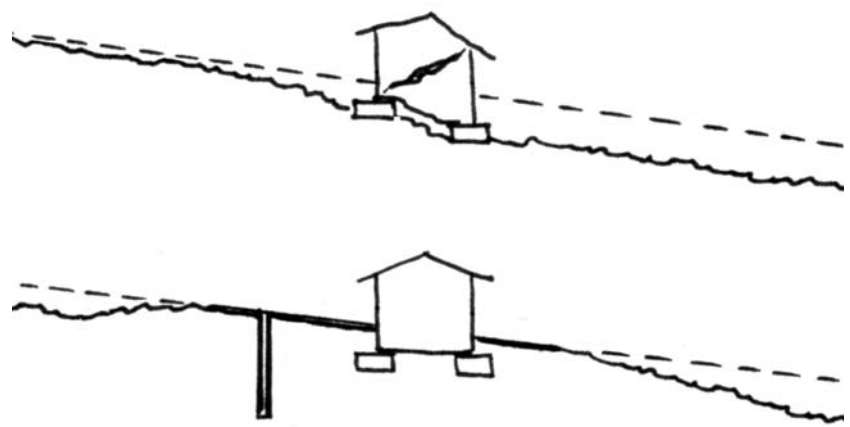


Fig. 9.0. - Protection contre les affouillements par parois enterrées.

Cas particulier des ouvrages élancés de grande hauteur

Pour les ouvrages élancés de grande hauteur (pylônes), les ancrages ainsi que la taille et profondeur des fondations doivent être sérieusement dimensionnés vis à vis du risque de renversement sous les rafales de vent. Il est indispensable de faire appel à un bureau d'étude spécialisé (fig. 9.1).

4.3.3. PLANCHERS ET DALLAGES

Dallages sur terre-plein - Tassements

Les pluies cycloniques peuvent imbiber le remblai mis en œuvre sous un dallage. Le remblai peut alors tasser et entraîner le fléchissement du dallage. Cela se traduit par une mise en compression des fibres supérieures et donc du revêtement de sol. Ce dernier peut alors rompre par flambement si aucune disposition particulière n'a été prise (fig. 9.2).

Le phénomène peut être aggravé par le gonflement causé par les remontées capillaires.

Pour éviter ce type de désordre, il est conseillé de prévoir des joints de dilatation pour les revêtements de sol fragiles et éventuellement une désolidarisation du support. Les remblais doivent être soigneusement compactés. Le compactage peut être validé par des essais Proctor ou des essais de plaque.

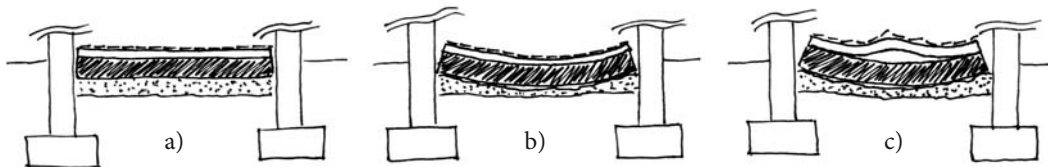


Fig. 9.2. - Dallage sur terre-plein : désordres causés par le tassement du remblai

- a) Etat initial
- b) Fléchissement du dallage
- c) Flambement du revêtement de sol

Dallages sur terre-plein – Remontées capillaires

Les remontées capillaires dans les dallages peuvent provoquer des désordres au niveau des revêtements de sols. Ces remontées peuvent être évitées en disposant une barrière étanche sous le dallage : film de polyéthylène par exemple.

Dans le cas d'un dallage existant non protégé, une solution possible consiste à interposer un film plastique sous une chape flottante (fig. 9.3).

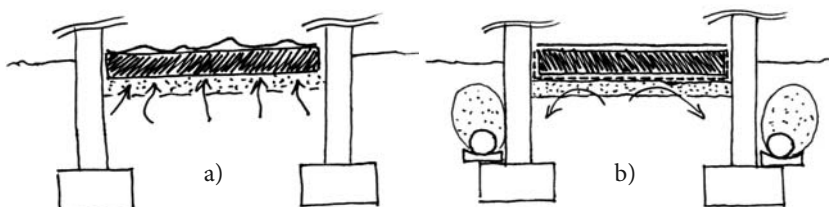


Fig. 9.3. - Dallage sur terre-plein : désordres causés par les remontées capillaires

- a) Absence de dispositions contre les remontées
- b) Coupure contre les remontées capillaires + drainage périphérique

Les désordres de remontées capillaires peuvent également être évités en optant pour un plancher sur vide sanitaire.

4.3.4. MURS EN MACONNERIE

Murs et murets isolés

Les murs en maçonnerie isolés sont des ouvrages particulièrement vulnérables aux actions du vent. D'abord en raison de leur mode de fonctionnement mécanique : la console (fig. 9.4). Ensuite parce que le champ dépressionnaire d'une face peut se conjuguer avec le champ surpressionnaire de l'autre face (fig. 9.5). Si l'on s'en tient aux valeurs fournies par l'Eurocode 1, chaque mètre carré de mur peut recevoir un chargement de l'ordre de 4000 N (équivalent à une masse de 400 kg).

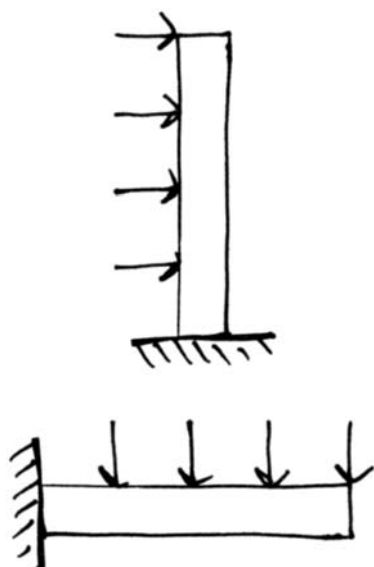


Fig. 9.4. - Equivalence du fonctionnement mécanique d'une console horizontale et d'une console verticale

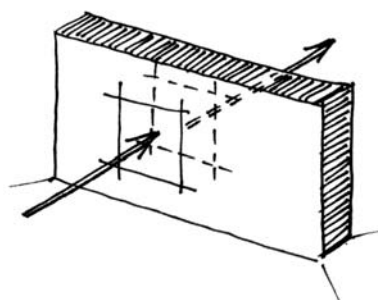


Fig. 9.5. - Pressions de vent cyclonique de part et d'autre d'un muret isolé.

- Equilibre global

Les fondations doivent être capables de s'opposer au moment de renversement du vent. Un grand bras de levier résistant pourra être assuré soit par une assise large soit par une grande profondeur. En première approche, la stabilité du mur est assurée si les conditions suivantes sont vérifiées (fig. 9.6) :

a)	
$L > 0,8H_1$	pour $H_2 < 0,5 \text{ m}$
$L > 0,7H_1$	pour $H_2 = 0,5 \text{ m}$
$L > 0,5H_1$	pour $H_2 = 1 \text{ m}$
b)	
$L > 1,1H_1$	pour $H_2 < 0,5 \text{ m}$
$L > 0,8H_1$	pour $H_2 = 0,5 \text{ m}$
$L > 0,6H_1$	pour $H_2 = 1 \text{ m}$

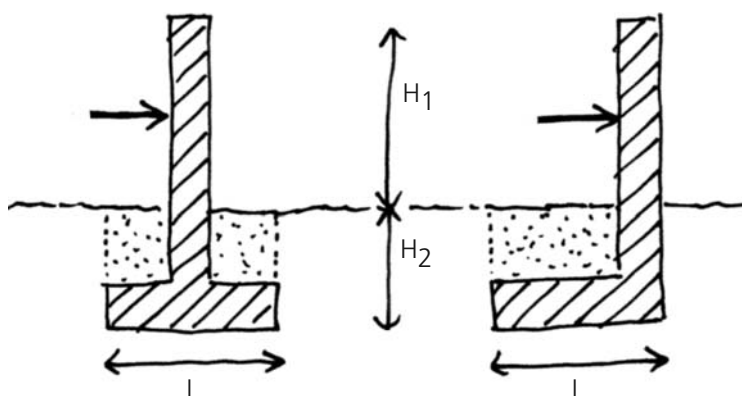


Fig. 9.6. - Pré-dimensionnement de la semelle d'un muret isolé

- Chaînages verticaux et horizontaux

Les chaînages jouent ici un rôle qui va au-delà du simple confinement de la maçonnerie : les chaînages horizontaux fonctionnent comme des poutres fléchies transmettant les efforts horizontaux du vent aux consoles verticales constituées par les chaînages verticaux (fig. 9.7).

Les chaînages verticaux et horizontaux doivent donc être constitués au minimum de quatre aciers haute adhérence de diamètres 10 mm. Il est conseillé de prévoir au minimum un chaînage vertical tous les 2 m et un chaînage horizontal tous les 1 m.

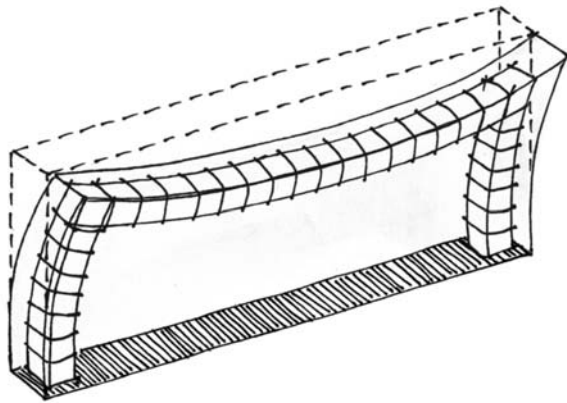


Fig. 9.7. - Continuité mécanique entre les chaînages verticaux et horizontaux.

La bonne transmission des efforts du vent jusqu'aux fondations passe par une bonne continuité mécanique des chaînages verticaux avec les chaînages horizontaux d'une part et les semelles de fondation d'autre part. Un recouvrement minimal de 50 fois le diamètre des armatures est indispensable (fig. 9.8 et 9.9).

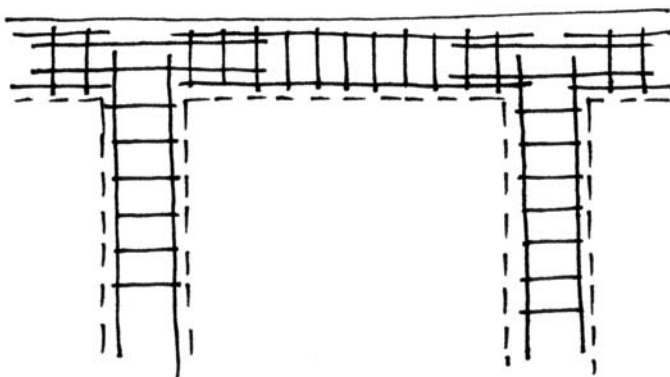


Fig. 9.8 - Continuité mécanique entre les fondations et les chaînages verticaux.

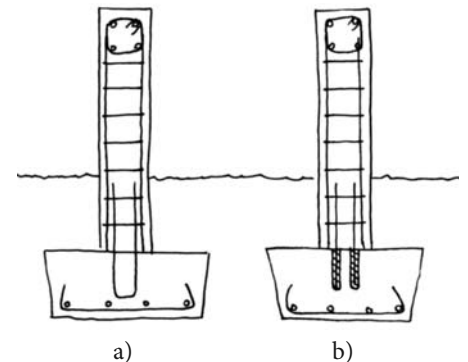


Fig. 9.9. - a) U en attentes
b) Aciers scellés chimiquement

Les chaînages verticaux pourront être conçus comme des contreforts en béton armé (fig. 9.10). Cette solution, plus gourmande en béton sera néanmoins plus économe en acier (augmentation du module d'inertie) : chaînage carré (fig. 10.0).

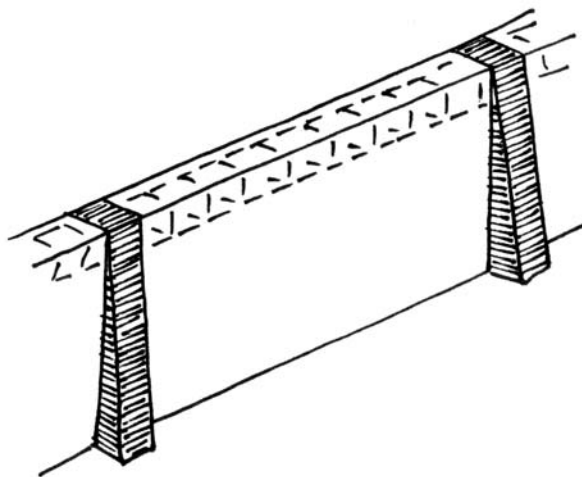


Fig. 9.10. - Contreforts en béton armé en guise de chaînages verticaux.

Un muret en blocs d'agglomérés creux peut avantageusement être remplacé par un muret en béton armé ou en blocs d'agglomérés à bancher correctement ferraillés, à condition que l'ancrage aux fondations soit bien assuré.

Enfin, la qualité des joints et de l'enduit doit être soignée afin de favoriser la durabilité de l'ouvrage.

Surélévations

Toute surélévation de mur doit impérativement être chaînée et connectée mécaniquement à l'édifice pré-existant par des barres d'acier haute adhérence scellées chimiquement dans les anciens chaînages verticaux sur la longueur d'ancrage réglementaire.

4.3.5. CHAINAGES ET RAMPANTS

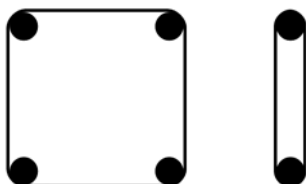


Fig. 10.0. - Chaînage carré, chaînage plat.

Les chaînages de rampants reçoivent des charges transversales considérables transmises par l'ensemble de la toiture via les pannes. Il ne doivent pas seulement être conçus comme une ceinture de confinement travaillant en traction mais également comme des poutres fléchies soumises à des charges réparties ascendantes. C'est pourquoi il est nécessaire de placer des cages d'armatures constituées de quatre barres filantes et des cadres (éventuellement deux barres en partie supérieure + grand moment d'inertie) (fig. 10.0). Ces chaînages doivent être continus et soigneusement ancrés dans les chaînages verticaux. Ces derniers peuvent être rapprochés (notamment enca-

drement des baies prolongé) afin de réduire les portées des rampants et améliorer la descente des charges (fig. 10.1).

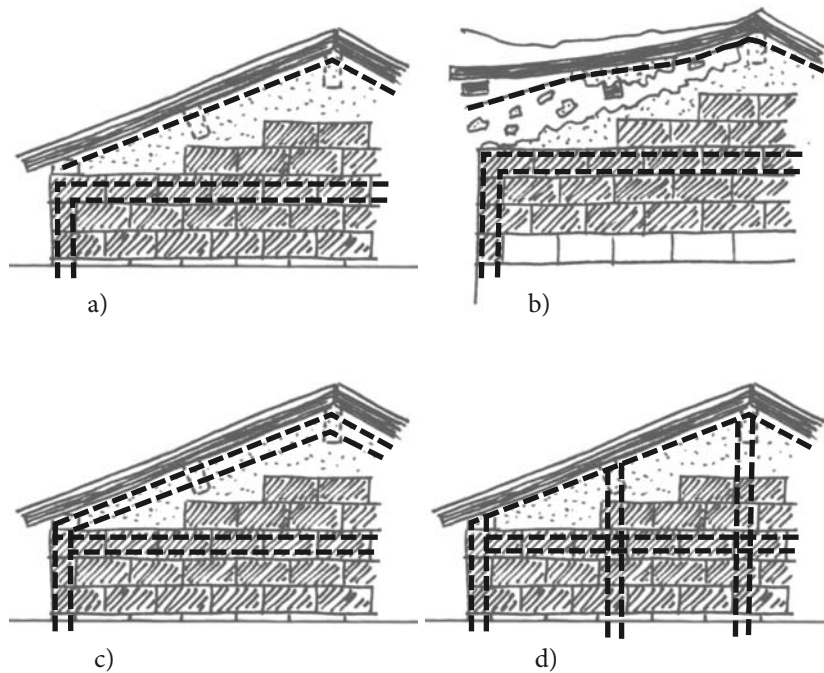


Fig. 10.1. - a) et b) Chaînage de rampant insuffisant et non connecté au chaînage vertical.
 c) Solution 1 : chaînage de rampant carré connecté aux chaînage vertical d'angle.
 d) Solution 2 : chaînage de rampant plat connecté à plusieurs chaînages verticaux.

4.3.6. SOUBASSEMENTS/CRUES

Les constructions situées en bordures de talweg peuvent être percutées par des débris transportés par l'écoulement des eaux. Il est donc souhaitable de protéger les soubassements contre les chocs (fig. 10.2).

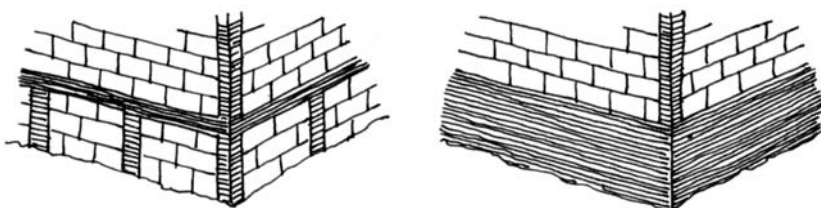


Fig. 10.2. - a) Soubassement en maçonnerie fortement chaînée.
 b) Soubassement en béton armé.

4.3.7 SOUTÈNEMENTS/CRUES

Les murs de soutènements doivent être conçus et dimensionnés en prenant en compte la possibilité de saturation du sol en eau : les poussées exercées par un sol gorgé d'eau peuvent être supérieures de 50% à celles exercées par le même sol sec. Un système d'évacuation des eaux devra dans tous les cas être mis en place pour limiter les effets de la poussée hydrostatique : barbacanes, drain (fig. 10.3).

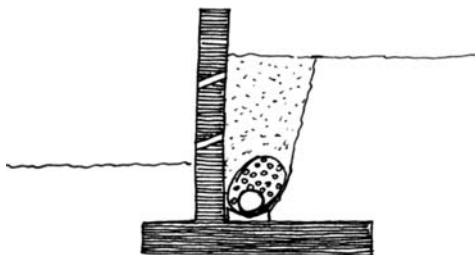


Fig. 10.3. - Mur de soutènement, barbacanes et drain.

4.3.8. CHARPENTES EN BOIS

Fixations des pannes sur la maçonnerie

La fixation des pannes en bois sur la maçonnerie est un point particulièrement sensible. Il faut absolument éviter le scellement des pannes dans la maçonnerie à l'aide de mortier de béton : les déformations différentielles des deux matériaux dans le temps peuvent mettre à mal leur cohésion.

Les pannes doivent donc impérativement être fixées à l'aide d'organes métalliques scellés dans les chaînages des rampants (fig. 10.4). Toute solution conduisant à interrompre le chaînage au droit d'une panne doit être proscrite. On doit donc privilégier les fixations par sabots, étriers ou cornières, ces dernières pouvant également être utilisées pour le renforcement de l'existant.

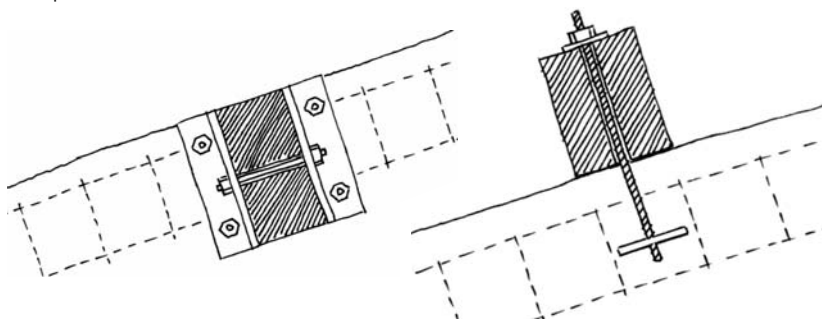


Fig. 10.4. - Fixation d'une panne sur chaînage de rampant.
Par deux cornières boulonnées.
Par tige filetée et plaque d'arrêt.

Les scellements chimiques dans le béton doivent être faits avec soin : l'injection ne doit être réalisée que dans un percement propre et sec.

Assemblages entre pièces de bois

L'utilisation de clous, même torsadés, travaillant en traction doit être proscrite. Les forces de frottements mises en jeu sont généralement insuffisantes pour s'opposer aux forces d'arrachement d'un vent cyclonique. Les clous ne peuvent donc être utilisés que pour reprendre des contraintes de cisaillement.

Les assemblages travaillant à la traction peuvent être réalisés avec des tire-fonds ou boulons éventuellement combinés avec des plats ou cornières. Dans le cas d'assemblages boulonnés travaillant en traction, il est essentiel de limiter le diamètre de perçage du bois, de placer de larges rondelles de répartition, et de prévoir un dispositif empêchant les écrous de se desserrer sous l'effet des vibrations.

Les assemblages à mi-bois ainsi que tous les assemblages traditionnels conduisant à un affaiblissement local des pièces de charpentes doivent être évités. Dans le cas de charpentes existantes, les zones sensibles peuvent être renforcées par des plaques métalliques clouées ou boulonnées.

L'emploi d'échantignolles pour fixer les pannes sur une ferme ne peut assurer à lui seul la reprise des forces d'arrachement du vent. L'emploi de cornières est donc indispensable.

Les fermettes industrielles ne posent généralement pas de problèmes en tant que telles. Il est par contre primordial de soigner leur contreventement et de contrer le flambement latéral des entrants susceptibles de travailler en compression sous les efforts ascendants du vent.

Maisons à ossature bois

Si les constructions à ossature en bois ne sont pas déconseillées en régions cycloniques, elles ne pardonnent cependant aucune approximation de conception et d'exécution. Il est donc fortement conseillé de recourir aux services d'un bureau d'étude spécialisé.

4.3.9. COUVERTURES EN TÔLES ONDULÉES OU NERVURÉES

Dispositions générales

Les couvertures en tôles, du fait de leur grande légèreté, sont particulièrement vulnérables à l'action des vents cycloniques. Leur pose doit donc impérativement respecter les prescriptions des fabricants.

Il est notamment indispensable de respecter les longueurs de recouvrement entre les plaques et disposer régulièrement des pontets afin d'éviter les déformations des ondes ou nervures, ces dernières conférant à la couverture l'essentiel de sa rigidité et de sa résistance.

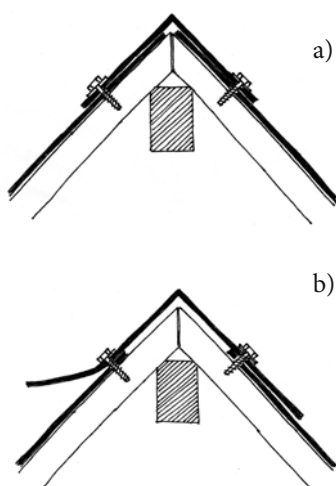


Fig. 10.6. - a) Bonnes dispositions
b) Longueur du bord libre de la tôle faitière trop importante et recouvrement insuffisant.

La fixation des tôles sur la charpente doit être réalisée à l'aide de vis ou tire-fonds. Il est primordial de limiter le diamètre de percement et d'interposer des rondelles de répartition afin de limiter le poinçonnement et l'effet de « boutonnière ». L'utilisation de clous est à proscrire, leur résistance à l'arrachement étant quasi nulle. Enfin tous les organes de fixation métalliques doivent être garantis contre la corrosion.

Les couvertures doivent pouvoir résister aux impacts de projectiles transportés par le vent. Une épaisseur minimale de 75 centièmes de mm est donc conseillée. En outre, les couvertures de type fibrociment sont déconseillées du fait de leur fragilité aux impacts.

Haubanage

La technique d'haubanage fort pratiquée dans les régions cycloniques, bien que « rustique », permet de prévenir l'arrachement des toitures fragiles.

Il faut veiller à bien disposer régulièrement les haubans sur la construction, et à les tendre de sorte qu'ils ne « battent » pas sous l'action du vent (fig. 10.5).



Fig. 10.5. - Stratégie d'urgence : haubanage.

Rives et faitages

Les rives et faitages de toitures sont généralement sujets à des dépressions de très forte intensité. En outre, leur défektivité peut entraîner une réaction en chaîne conduisant souvent à l'anéantissement total de la couverture. Il est donc primordial d'y resserrer les points de fixation à la charpente.

Le recouvrement entre faîtières et tôles de couverture doit être suffisant afin de prévenir les risques d'infiltrations. La longueur des bords libres doit être limitée afin de limiter les risques d'arrachement (fig. 10.6).

Grands débords de toiture et vérandas

Les grands débords de toiture sont sujets à des forces de soulèvement considérables du fait de la combinaison des surpressions et dépressions s'exerçant respectivement sur les faces inférieures et supérieures. Ils sont donc à proscrire au delà de 20 cm, sauf dispositions structurales particulières validées par un bureau d'études structure.

Dans le cas des vérandas, il est fortement conseillé de désolidariser leur couverture de celle du bâtiment afin d'éviter une réaction en chaîne. Les structures et leur poteaux doivent être lestés généreusement.

4.3.10. MENUISERIES

Les portes et fenêtres sont des éléments particulièrement sensibles en période cyclonique. Elles doivent offrir une bonne étanchéité à l'air et à l'eau (pluies battantes) ainsi qu'une excellente tenue au vent.

La qualité intrinsèque de produits est définie par le classement AEV (NF P20-302), les 3 lettres désignant respectivement les performances vis à vis de l'étanchéité à l'air, l'étanchéité à l'eau et la tenue au vent. Chaque lettre est suivie d'un chiffre, d'autant plus grand que la qualité est élevée. Dans les régions cycloniques, la classification minimale à respecter est : A*3 E*4 V*A4.

Bien entendu, la performance d'une menuiserie dépend autant de la qualité intrinsèque du produit que de la qualité de sa pose et de son entretien. On doit notamment veiller à la qualité des joints entre dormant et structure et respecter les hauteurs minimales réglementaires des seuils et rejingots (voir schémas). Les menuiseries en bois doivent quant à elles être régulièrement traitées contre l'humidité.

Il ne faut pas oublier que les vents cycloniques peuvent transporter des projectiles susceptibles de briser les vitrages. Il est donc judicieux de recourir à des vitrages feuilletés, des grilles scellées dans le chaînage de l'encadrement ou des volets paracycloniques. La tenue au vent de ces derniers, et notamment de leur système de fermeture, doit être validée par un bureau d'étude.

4.4. METHODES DE DIMENSIONNEMENT

4.4.1. APPROCHE RÉGLEMENTAIRE EUROCODE 1

Si les cyclones sont des phénomènes météorologiques de très forte intensité, leur structure turbulente n'est pas différente de celle des tempêtes dépressionnaires que nous connaissons en France Métropolitaine. En conséquence, leurs effets, en termes de dimensionnement au vent, sont couverts par les documents réglementaires en vigueur que sont les règles NV 65 « Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions et annexes » et la norme européenne NF EN 1991-1-4 : 2005 « Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions générales – Actions du vent », accompagnée de son Annexe Nationale (AN).

L'application des NV65 est longtemps restée de rigueur dans tous les marchés publics nationaux. Aujourd'hui, l'Eurocode 1 est utilisé couramment en alternative aux NV65 et les remplacera à terme. C'est donc la démarche de dimensionnement de l'Eurocode 1 que nous avons développée dans ce document.

4.3.1.1 CADRE GÉNÉRAL DE L'EUROCODE 1

L'Eurocode 1 permet de dimensionner la grande majorité des structures en intégrant les effets de l'orographie locale, de la rugosité et de la hauteur

du bâtiment. Seules, les structures de formes complexes, de grande hauteur ou à fort comportement dynamique peuvent justifier d'une démarche spécifique par simulation physique à échelle réduite en soufflerie atmosphérique. Le dimensionnement Eurocode 1 est associé à un risque de période de retour de 50 ans. Il définit l'action du vent soit comme une pression, soit comme une force.

L'action de pression w , supposée perpendiculaire à la surface de la construction, sauf indication contraire ; par exemple pour les forces de frottement tangentielles, est exprimée par

$$W = q_p(z_e) \cdot c_p$$

avec :

$q_p(z_e)$: pression dynamique de pointe, induite par la vitesse moyenne locale et les fluctuations rapides du vent, intégrant les effets de rugosité du terrain, d'orographie à la hauteur z_e au dessus du sol.

$C_p = C_{pe} - C_{pi}$: différence algébrique des coefficients de pression extérieure et intérieure.

L'action de la force F_w exercée sur la structure ou sur un élément de structure peut être déterminée de deux manières :

- soit directement par l'application d'un coefficient de force c_f :

$$F_w = c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

où c_f est le coefficient de force, $q_p(z_e)$ est la pression dynamique de pointe à la hauteur de référence z_e et A_{ref} , l'aire de référence de la construction ou de l'élément de construction à considérer.

- soit en calculant la force résultante par cumul des pressions agissant sur l'enveloppe de la structure :

$$F_w = \Sigma q_p(z_e) \cdot (c_{pe} - c_{pi}) \cdot A_{ref}$$

En raison du caractère turbulent du vent, les pressions exercées sur les différentes parties d'une construction n'atteignent pas leurs valeurs maximales simultanément, d'autant moins que la structure est de grande dimension. Ainsi, la force résultante maximale reste toujours inférieure au cumul des pressions maximales. Cette décorrélation des actions élémentaires due à l'effet de dimension peut être prise en compte par l'Eurocode 1.

Les coefficients de pression C_{pe} ou les coefficients de force C_f sont exprimés sous forme adimensionnelle. L'Eurocode 1 définit leurs valeurs pour de nombreuses formes usuelles : bâtiments à section rectangulaire, toitures à 1, 2 ou 4 versants, toitures en voûte, toitures isolées, murs isolés et, pour les différents éléments structuraux : cylindres de sections variées, treillis, profilés à angles vifs. L'Eurocode 1 fournit des valeurs de coefficient de pression externe associée à des surfaces de 1m^2 et de 10m^2 . La valeur du $C_{pe,10}$, inférieure à celle du $C_{pe,1}$, traduit la notion de non synchronisme des effets de pointe sur une surface importante.

La pression intérieure dépend de la dimension et de la répartition des ouvertures sur l'enveloppe du bâtiment. L'Eurocode 1 présente les valeurs du coefficient de pression intérieure C_{pi} en fonction de ces paramètres.

La pression dynamique de pointe $q_p(z_e)$ est définie par :

$$q_p(z_e) = C_e(z_e) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$$

avec :

$C_e(z_e)$ est le coefficient d'exposition qui permet de passer de la pression dynamique moyenne de référence, à 10 m du sol, en rase campagne, à la pression dynamique de pointe, à la hauteur z_e , dans le site de construction.

ρ est la masse volumique de l'air, égale à 1,225 kg/m³

V_b est la vitesse moyenne du vent de référence, à 10 m du sol, en site « rase campagne », de période de retour égale à 50 ans. Parce que les cyclones sont des phénomènes peu fréquents et difficiles à mesurer, la vitesse de référence V_b a été déterminée sur la base d'études par simulation numérique prenant en compte les caractéristiques générales observées des cyclones tropicaux telles que la trajectoire, la vitesse de déplacement, les dimensions, la dépression dans l'œil du cyclone, etc.). Pour la Guadeloupe, la Martinique et la Réunion, l'AN de l'Eurocode 1 a retenu :

	Guadeloupe	Martinique	Réunion
V_b (m/s)	36	32	34

A noter que ces valeurs sont nettement plus fortes que celles applicables en France métropolitaine, qui sont comprises entre 22 et 28 m/s, selon le département.

Le coefficient d'exposition $C_e(z_e)$ est donné par :

$$C_e(z_e) = C_r^2(z) \cdot C_0^2(z) + 7 k_i k_r C_r(z) C_0(z)$$

$C_r(z)$ est le coefficient de rugosité à la hauteur z donné par

$$C_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ pour } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

$$C_r(z) = C_r(z_{\min}) \text{ pour } z \leq z_{\min}$$

où la longueur de rugosité z_0 et la hauteur minimum z_{min} dépendent de la nature du terrain et sont données dans le tableau ci-dessous :

Catégorie de terrain		Z_0 [m]	Z_{min} [m]
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5km	0,005	1
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	0,05	2
IIIa	Campagne avec des haies ; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0,20	5
IIIb	Zones urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0,5	9
IV	Zones urbaines dont au moins 15% de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	1,0	15

$C_o(z)$ est le coefficient d'orographie intégrant les effets du relief, (par exemple, colline ou falaise). Les effets d'orographie peuvent être négligés tant que la pente du terrain reste inférieure à 3°.

k_i est le coefficient de turbulence, égal à 1 pour les sites à faible rugosité.

k_r	est le facteur de terrain dépendant de la longueur de rugosité Z_0 , calculé à l'aide de la formule suivante
	$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{Z_0}{Z_{0,II}} \right)^{0,07} \quad \dots (4.5)$
où	
$Z_{0,II}$	= 0,05 m (catégorie de terrain II, Tableau 4.1 (NA) ;
Z_{min}	est la hauteur minimale définie dans le Tableau 4.1 (NA) ;
Z_{max}	doit être considérée comme étant égale à 200 m ;
Z_0, Z_{min}	dépendent de la catégorie de terrain et sont donnés dans le Tableau 4.1 (NA) pour cinq catégories de terrain représentatives.

L'action du vent ainsi déterminée est dite quasi-statique, c'est-à-dire que la réaction de la structure est égale à chaque instant à l'effort exercé par le vent. Les structures élancées, telles que les ponts, les tours, les cheminées, les structures treillis doivent être également calculées de façon à résister aux effets dynamiques dus à la mise en vibration par le vent. L'Eurocode 1 définit également les règles générales d'évaluation de ces effets dynamiques.

4.4.2. APPROCHES DE SIMULATION

4.4.2.1. SIMULATION À ÉCHELLE RÉDUITE

4.4.2.1.1. SIMULATION DE LA COUCHE LIMITE ATMOSPHÉRIQUE

Jusqu'au début des années 60, les effets du vent sur les constructions ou ouvrages d'art étaient étudiés dans les souffleries de type aéronautique qui produisent des écoulements sans turbulence. Les actions maximales étaient donc déduites des effets constants issus de conditions d'essais uniformes. Beaucoup de réglementations, dont les règles NV65, ont été construites sur la base des résultats d'essais menés dans ces conditions peu réalistes.

Depuis cette époque, les souffleries à couche limite se sont développées. Elles ont pour principe de recréer artificiellement la couche limite turbulente du vent au moyen de rugosités et de blocs distribués en amont de la maquette étudiée (fig. 10.7). Ainsi, les évolutions temporelles instationnaires des actions, effets des fluctuations de vitesse de l'écoulement turbulent sur l'enveloppe, peuvent être directement mesurées et leurs propriétés statistiques notamment, moyenne, écart-type et valeurs extrêmes, peuvent être extraites.

La maquette est placée dans son environnement proche (reliefs, bâtiments ou structures voisines, végétation importante) qui perturbe et module le vent incident à proximité de l'ouvrage. En jouant sur la taille et la distribution des rugosités, il est possible de simuler différents types de vent (mer, campagne, ville, ...) à différentes échelles. En reproduisant à la fois le vent moyen (gradient vertical) et les caractéristiques de la turbulence exprimées sous leur forme réduite (intensités de turbulence, densités spectrales normalisées par la variance, coefficients de cohérence), on définit ainsi l'échelle de simulation du vent qui doit être la même que l'échelle géométrique de l'ouvrage étudié.



Fig. 10.7. - Rugosités simulant le vent en amont de la maquette d'étude

A Nantes, le CSTB possède deux souffleries de ce type dont les veines mesurent environ 4 m de large et 3 m de hauteur (fig. 10.8). Elles permettent l'étude du dimensionnement des ouvrages, du confort piétonnier dans les ensembles bâtis, de la dispersion d'effluents et de polluants, de la ventilation naturelle.

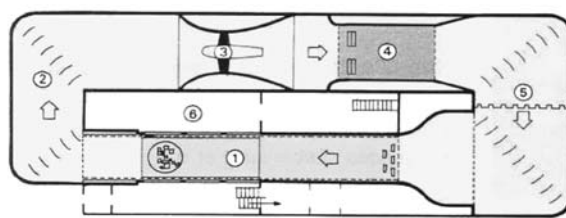


Fig. 10.8. - Figure : Plan de la soufflerie atmosphérique du CSTB :

1. la veine principale
2. l'écoulement de retour
3. le propulseur
4. zone diffuseur
5. l'échangeur thermique
6. le caisson de mesures

Le comportement d'une construction raide peut être simulé par une maquette rigide et celui d'une structure considérée souple par une maquette dite « aéroélastique », c'est-à-dire dynamiquement semblable. Toutefois il est possible d'étendre le champ d'action des maquettes rigides à certaines constructions souples tant que le déplacement de la construction sous l'action du vent n'interagit pas avec le champ aérodynamique induit par le vent. Cette interaction éventuelle, phénomène de galop ou de flottement, quelquefois de détachement tourbillonnaire, est la conséquence de la forme géométrique de la structure mais aussi de ses caractéristiques modales. C'est sur la base des caractéristiques modales que l'on choisira de construire :

- une maquette rigide permettant la mesure des forces aérodynamiques. La réponse de l'ouvrage est alors calculée, en particulier par méthode spectrale.
- une maquette dynamique semblable reproduisant à échelle réduite le caractère vibratoire de l'ouvrage considéré.

4.4.2.1.2 LES SIMILITUDES

Les similitudes sont des passerelles physiques permettant de transcrire les phénomènes vraie grandeur à l'échelle du modèle.

• SIMILITUDE GÉOMÉTRIQUE

On concevra si possible la maquette à l'échelle du vent simulé. Toutefois, les souffleries à couche limite, malgré des dimensions de veines conséquentes, ne permettent qu'une gamme d'échelles de simulation restreinte, de l'ordre du 1/50 au 1/1000. Il est donc souvent plus difficile d'étudier en

soufflerie des structures de taille modeste que celles de dimensions exceptionnelles car les maquettes, trop petites, sont entachées d'imperfections géométriques et d'effet de nombre de Reynolds. L'étude sur maquette demande une reproduction fidèle de la géométrie du prototype. Les dimensions des maquettes sont limitées par celles de la veine d'expérience, notamment à cause de l'effet de blocage qui apparaît si le maître-couple de la maquette dépasse 5 % à 10 % de la section de veine.

• **Similitude de Reynolds**

La nature des écoulements qui se développent au contournement des obstacles et, en particulier, dans la zone de sillage, ainsi que la distribution associée des pressions autour de l'obstacle, sont liés à la valeur du nombre de Reynolds :

$$Re_D = \frac{\overline{UD}}{\nu}$$

Où D est une dimension caractéristique de l'obstacle et ν la viscosité cinématique du fluide ($\nu \cong 15 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'air). La similitude théorique demande l'égalité des nombres de Reynolds entre le modèle et la vraie grandeur. Comme, en vraie grandeur, les valeurs obtenues sont de l'ordre de 10^7 à 10^8 , il faudrait « souffler » à des vitesses supersoniques compte tenu de l'échelle de réduction des maquettes. Cette condition ne peut donc pas être satisfaite.

Dans le cas des formes à angles vifs, le processus de décollement (couche de cisaillement) est déclenché par la présence des arêtes. La distribution des pressions autour de l'obstacle est indépendante du nombre de Reynolds et le problème de sa reproduction ne se pose donc pas. Par contre, dès que les formes sont arrondies, le décollement, l'expansion et la largeur du sillage, le champ de pression, la traînée, etc... sont largement gouvernées par le nombre de Reynolds comme le schématisent les figures 10.9. Dans la couche limite atmosphérique, les structures correspondent à des nombres de Reynolds de 10^6 à 10^7 (régimes supercritiques) et même $>10^7$ (régime hypercritique) alors qu'en soufflerie on se situe généralement entre 10^4 et quelques 10^5 , ce qui pose tout à fait le problème de la reproduction en soufflerie des grands nombres de Reynolds sur les formes rondes.

Il a été montré que la rugosité de surface vient se conjuguer à l'influence du nombre de Reynolds. Ainsi, plus la rugosité de paroi sera importante, plus

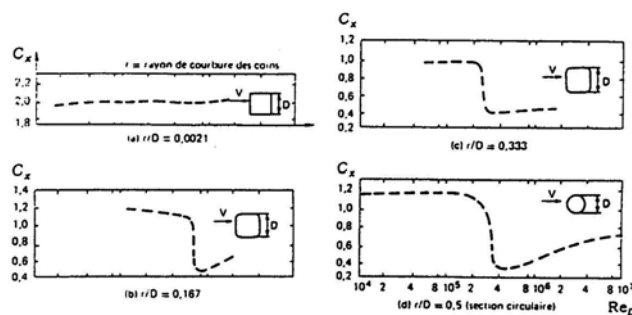


Fig. 10.9. - Influence du nombre de Reynolds et de la forme sur le coefficient de traînée d'un obstacle lisse et bidimensionnel (d'après FAGE A. et WARSAP J.H. - 1930)

le nombre de Reynolds correspondant au régime critique sera faible. Tout se passe comme si la présence de rugosité augmentait le nombre de Reynolds effectif. C'est ce principe qui est utilisé pour la simulation du nombre de Reynolds dans le cas des formes rondes. Ainsi pour les formes arrondies, on dispose sur le modèle à échelle réduite des rugosités de surface d'épaisseur « e » (fils de transition, sablage), pour augmenter artificiellement le nombre de Reynolds effectif en approchant les régimes vraie grandeur alors que l'écoulement correspond à des nombres de Reynolds plus faibles. On a pu montrer en soufflerie que, pour un nombre de Reynolds basé sur

la rugosité $\frac{\bar{U}.e}{\nu}$ équivalent à 400, les régimes sont bien de même nature

que ceux obtenus en vraie grandeur. Il ne demeure pas moins que les rugosités artificielles (ou les fils de transition) ne doivent pas devenir trop importantes vis-à-vis de la dimension caractéristique du modèle D et doivent

être tels que $\frac{e}{D} < 10^{-2}$ si l'on veut que les effets instationnaires sur la ma

quette soient correctement représentés.

La dépendance du nombre de Reynolds se retrouve aussi au niveau des maquettes topographiques à petite échelle. Une sous-couche visqueuse laminaire peut apparaître au niveau de la paroi du modèle, notamment si cette dernière est lisse. Les phénomènes physiques reproduits alors ne seront plus conformes à ceux existant dans la réalité puisque en vraie grandeur les régimes d'écoulement au niveau du sol sont dits « aérodynamiquement rugueux » et vérifient la condition :

$\frac{U.z_0}{\nu} > \approx 2.5$

Sur modèle, la condition d'indépendance du nombre de Reynolds de l'écoulement sera donc satisfaite par introduction, si nécessaire, de rugosités de surface. Cette intervention doit uniquement « casser » la sous-couche visqueuse et ne doit pas interférer avec la rugosité (bois, bâtiment, etc.) géométrique du site. Dans la pratique une fine pulvérisation de sable sur les zones lisses des maquettes (maquette au 1/1000 au 1/1500 par exemple) permet le compromis (fig. 10.10).



Fig. 10.10. - Similitude du nombre de Reynolds
 – Maquette de la tour phare (Paris – La Défense) équipée de ses rugosités de surface (bandes noires collées sur la forme arrondie de la maquette)

• Similitude de Strouhal

La similitude de Strouhal fixe la relation entre les échelles de longueur, de vitesse et de temps. Le nombre de Strouhal, St , se définit par :

$$St = \frac{n \cdot L}{\bar{U}} = \frac{L}{T \cdot \bar{U}}$$

où L est une dimension caractéristique de l'obstacle, orthogonale à la direction de la vitesse moyenne \bar{U} , n est la fréquence et T , le temps.

La réalisation de la similitude de Strouhal demande l'égalité du nombre de Strouhal entre soufflerie (noté indice s) et vraie grandeur (noté indice vg). On obtient donc la relation entre l'échelle géométrique, l'échelle des vitesses et l'échelle des temps :

$$\frac{L_{vg}}{L_s} = \frac{T_{vg}}{T_s} \times \frac{\bar{U}_{vg}}{\bar{U}_s}$$

Ainsi, fixer l'échelle géométrique et l'échelle des vitesses conduit à déterminer l'échelle de temps. La vitesse dans la soufflerie étant du même ordre que la vitesse vraie grandeur, l'échelle des temps est donc très proche de

l'échelle géométrique. A titre d'exemple, si $\frac{L_{vg}}{L_s} = 100$ et $\frac{\bar{U}_{vg}}{\bar{U}_s} = 1$, on obtient

$\frac{T_{vg}}{T_s} = 100$. Dans ce cas, une heure vraie grandeur est équivalent à

36 secondes en soufflerie.

L'observation de la similitude de Strouhal permet d'associer un évènement de pointe à une notion de durée. Les relevés météorologiques définissent le vent « vraie grandeur » sur la durée standard de 10 minutes, les actions du vent et ses grandeurs statistiques associées (valeurs de pointe), sont donc elles aussi associées à cette durée de 10 minutes.

4.4.2.1.3. EXTRAPOLATION DES MESURES A LA VRAIE GRANDEUR

L'observation de la similitude de Reynolds conduit à des comportements aérodynamiques identiques, à l'échelle de la soufflerie et à la vraie grandeur. Dans ces conditions, les actions du vent, définies sous la forme de coefficients aérodynamiques, sont égales à l'échelle de la soufflerie et à la vraie grandeur.

Les coefficients de pression C_p , de force C_f et de vitesse C_v issus de la soufflerie s'expriment par :

$$C_{pj} = \frac{p_j}{q_{ref}}, \quad C_f = \frac{f}{a \cdot q_{ref}}, \quad C_v = \frac{v}{v_{ref}}$$

où p est la pression au point j , f est la force exercée sur un élément d'aire a , v est la vitesse au point i , q_{ref} et v_{ref} sont respectivement la pression dynamique et la vitesse de référence en soufflerie.

Les valeurs vraie grandeur sont extrapolées en appliquant aux coefficients issus de la soufflerie, la valeur de la pression dynamique vraie grandeur :

$$P_j = C_p \times \bar{q}_{\text{ref vraie grandeur}}$$

$$F = C_f \times A \cdot \bar{q}_{\text{ref vraie grandeur}}$$

$$V = C_v \times \bar{V}_{\text{ref vraie grandeur}}$$

où P est la pression vraie grandeur au point j , F est la force exercée sur l'élément de surface A , V la vitesse au point i , q_{ref} vraie grandeur et V_{ref} sont respectivement la pression dynamique et la vitesse de référence vraie grandeur. Pour les approches de dimensionnement, q_{ref} vraie grandeur prend la valeur de la pression dynamique de période de retour cinquante ans.

La même démarche s'applique pour les grandeurs statiques de moyenne écart-type, maximum ou minimum de l'échantillon.

4.4.2.1.4. METROLOGIE

En mécanique des fluides, les mesures peuvent être effectuées directement dans le fluide ou sur les corps avec lesquels ce fluide réagit.

Dans le premier cas, ce sont des visualisations, des mesures de vitesse locale, de pression statique, de température, etc. Sur un corps solide en contact avec du fluide, on s'attachera à mesurer le champ de pression, le torseur d'efforts engendré par le fluide ou bien le transfert de chaleur entre le corps solide et le fluide.

Nous présentons ci-après quelques-unes des techniques les plus courantes.

• La visualisation des écoulements

Les techniques de visualisation consistent à ensemençer le fluide par des traceurs permettant de visualiser les trajectoires fluides. Pour suivre les trajectoires fluides, ces traceurs doivent avoir des propriétés convenables, en particulier, si les vitesses d'écoulement sont faibles, il faut que la masse volumique du traceur soit proche de celle du fluide afin que les forces de gravité interviennent peu dans les trajectoires suivies.

Dans l'eau, on peut utiliser des colorants, de minuscules bulles d'air, ou des particules d'aluminium. Dans l'air, on utilise fréquemment des fumées, des

Fig. 11.0. - Visualisation pariétale montrant, en vue de dessus, les recirculations à la surface d'un bassin d'eau. Les filets blancs représentent les trajectoires de l'écoulement à la surface de l'eau. Les zones sombres montrent les zones de vitesse faible, sièges possibles d'accumulation d'objets flottants.



particules blanches ou des bulles d'hélium. On utilise parfois des brins de laine accrochés en de nombreux points d'un obstacle pour visualiser l'ensemble du flux contournant l'obstacle.

Les progrès continuels de l'informatique et du traitement d'image permettent de plus en plus de tirer de ces visualisations des informations quantitatives et non plus seulement qualitatives ou à visée pédagogique (fig. 11.0).

• Les mesures anémométriques

Les anémomètres à hélice sont généralement trop encombrants pour être utilisés en soufflerie ou en canal hydraulique ; on préfère utiliser des anémomètres à fil ou film chaud (fig. 11.1) : un fil chauffé, placé dans un flux d'air et inséré dans une des branches d'un pont de Wheastone, voit sa résistance varier par convection forcée en fonction de la vitesse. Lorsque cette vitesse fluctue, un courant de chauffe rétablit instantanément l'équilibre du pont. Les fluctuations de tensions aux bornes du fil deviennent, après étalonnage, une image instantanée des fluctuations de vitesse. L'anémométrie à fil chaud est particulièrement performante, en particulier pour la mesure de la turbulence : très faible volume de mesure, réponse en fréquence élevée (20 kHz). Cependant, l'anémomètre ne peut mesurer que la composante de vitesse normale au fil. La mesure des trois composantes du vecteur nécessite l'utilisation de sonde à trois fils et de trois chaînes anémométriques associées.

Son emploi est délicat dans les zones à forte turbulence (sillage, décollement, recirculation) car, elle ne permet pas d'identifier le sens de l'écoulement.

Plus récemment a été développée l'anémométrie laser basée sur des principes d'interférométrie en lumière cohérente. Des particules ensemençant l'écoulement croisent un réseau de franges d'interférences créé à l'intersection de deux faisceaux laser. Un compteur et une électronique associée comptent les particules et les temps de transit, ce qui permet de calculer leur vitesse. L'avantage de ce type d'anémométrie est de permettre la mesure à distance sans perturbation de l'écoulement et d'être indépendant de la température et de la masse volumique du fluide. Sa mise en œuvre est délicate, notamment dans les souffleries de grandes dimensions où les faisceaux laser doivent accéder à la zone de mesure par des fibres optiques.

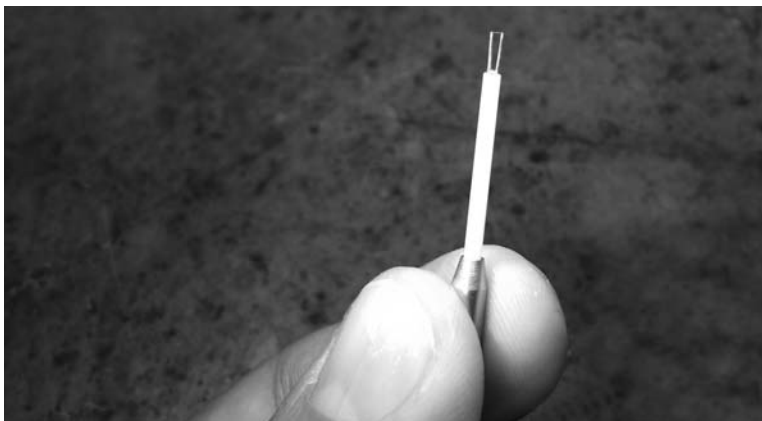


Fig. 11.1. - Sonde anémométrique à fil chaud

• Les mesures de pression

Les pressions induites par un écoulement sur un corps solide sont mesurées par des prises de pression distribuées sur sa surface. Ces prises de pression sont des orifices de très petit diamètre (< 1 mm) soigneusement usinés et connectés par l'intermédiaire de liaisons pneumatiques souples à des capteurs de pression.

Les liaisons pneumatiques ne modifient pas le signal de pression moyen mais introduisent une distorsion (résonance pneumatique) sur les pressions fluctuantes. Cette distorsion peut être corrigée par différentes méthodes : amortissement mécanique par des pertes de charges introduites dans le circuit pneumatique, correction électronique du signal analogique grâce à des filtres et enfin, correction numérique après mesure de la fonction de transfert de l'ensemble du système de mesures.

Les manomètres à liquide utilisés par le passé sont aujourd'hui remplacés par des capteurs électriques très sensibles (sensibilité de l'ordre du Pascal). Ceux-ci sont généralement constitués d'une membrane sensible à la différence des pressions exercées sur chacune de leurs faces. L'une des faces est connectée à la prise de pression, sur l'autre face on applique la pression statique locale relevée sur la prise statique d'un tube de Pitot. Jusqu'à une période récente, les capteurs de pression ont été associés à des commutateurs électromécaniques (scanivalves) permettant de scruter successivement jusqu'à 48 prises de pression avec le même capteur. Le non synchronisme des mesures ne permettant pas l'intégration spatiale de ces pressions, ce dispositif était réservé à l'étude des actions locales (à l'échelle de quelques mètres carrés).

Dans les années 1990 sont apparus de nouveaux capteurs piézo-résistifs multiplexés multivoies très compacts sous forme de modules de 16, 32 ou 64 voies (fig. 11.2). L'emploi de plusieurs modules permet l'acquisition synchrone d'un grand nombre de voies de pression (plusieurs centaines) (fig. 11.3) la limitation étant, en dehors des problèmes de coût, essentiellement liée aux capacités de stockage et de traitement de données du système informatique associé. Puisque les pressions mesurées sont synchrones, on peut avoir accès aux actions locales et, par combinaisons spatiales des différents signaux, aux actions globales instantanées.



Fig. 11.2. - Module de capteurs de pression multivoies

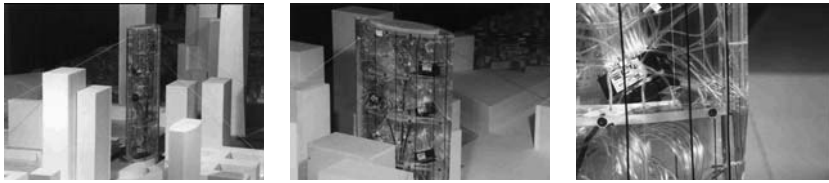


Fig. 11.3. - Maquette de la tour Hines (Paris - la Défense) – Modules de capteurs de pressions multivoies

• Les mesures de force

Comme nous venons de le voir, les actions d'ensemble peuvent être calculées par combinaison linéaire instantanée des mesures de pressions synchrones. Cette technique est le plus souvent utilisée pour estimer les actions d'ensemble des éléments de structures (tronçons courants des tabliers de ponts, portiques, panneaux de façades,...), mais plus rarement sur l'ensemble d'une structure tridimensionnelle de géométrie complexe. On préfère dans ce dernier cas, la « pesée » aérodynamique à l'aide de balances dynamométriques (fig. 11.4).



Fig. 11.4. - Balance dynamométrique à 6 composantes

C'est une technique couramment utilisée en soufflerie aéronautique et même dans l'industrie automobile (coefficient de traînée C_x d'une voiture). Il existe cependant une différence fondamentale : dans une soufflerie aéronautique, la vitesse de l'écoulement est uniforme et constante pendant l'essai et il en résulte des efforts aérodynamiques généralement constants eux aussi. En soufflerie à couche limite atmosphérique, on cherche à mesurer la valeur temporelle de l'action d'ensemble pour en déduire ses propriétés statistiques, notamment connaître ses valeurs extrêmes. Il est donc nécessaire que la fréquence modale du système maquette-balance soit supérieure à la bande de fréquence des efforts mesurés. Un tel système peut être réalisé en fixant une maquette très légère et très raide, constituée par exemple d'une âme de fibre de carbone habillée de mousse de polyuréthane et de contreplaqué fin, sur une balance raide et sensible. Afin de réduire les effets d'inertie, la balance peut être intégrée à l'intérieur même de la maquette.

La balance est un ensemble mécanique constitué de barreaux dynamométriques (jauges de contraintes) sensibles à une composante (force ou moment) et découplés les uns des autres par l'intermédiaire de lames fines. On peut avoir ainsi des balances à 1, 2, voire 6 composantes (3 forces, 3 moments).

Si la fréquence modale du système maquette-balance reste trop proche de

la bande de fréquences des efforts aérodynamiques, il est encore possible de corriger, après acquisition, les signaux temporels d'efforts de l'effet d'amplification dynamique par des méthodes spectrales.

A titre d'exemple, nous présentons ci-après une application pratique pour l'étude en soufflerie (1/300ème) du projet de la tour sans Fins dans l'environnement de la Défense : la maquette rigide est réalisée en fibres de carbone et la balance de pied, très raide permet de positionner le premier mode de vibration de la maquette bien au-delà de la gamme de fréquences des efforts aérodynamiques (fig. 11.5 et 11.6).

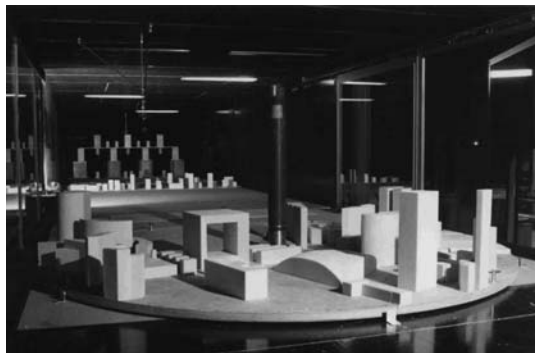


Fig. 11.5. - Maquette rigide au 1/300 de la Tour sans Fins dans son environnement



Fig. 11.6. - Balance de pied de la maquette de la Tour sans Fins

4.4.2.1.5. SIMULATION DES EFFETS DYNAMIQUES ET MÉTROLOGIE ASSOCIÉE

Ce problème concerne essentiellement les structures souples et élancées (cheminées, hauts mâts, tabliers de ponts, ...). L'étude directe en soufflerie est la seule méthode qui permette de tenir compte de l'influence très complexe et parfois très marquée de l'environnement de la construction. Le comportement dynamique des structures soumises au vent est fortement dépendant de leur géométrie, mais aussi de leur masse, de leur raideur et de leur amortissement.

On peut distinguer deux types d'approches en soufflerie :
L'étude sur maquette rigide associée à un calcul dynamique : cette méthode peut être utilisée lorsque les déplacements sont suffisamment faibles pour ne pas interagir de manière significative avec le champ de pression créé par le vent. On utilise les efforts aérodynamiques mesurés sur maquette rigide et « l'admittance aérodynamique » introduite de manière

analytique permet de passer de la force aérodynamique au déplacement. Bien que limitée aux cas sans interaction, cette méthode est très souple d'emploi car elle permet de faire varier facilement les paramètres structurels (fréquences, amortissements) sans qu'un réglage de maquette et une série d'essais en soufflerie soient nécessaires pour chaque cas.

L'étude sur modèle dit « aéroélastique » (fig. 11.7 et 11.8) : la construction étudiée est représentée par un modèle dynamiquement semblable, c'est-à-dire qui reproduit les caractéristiques de fréquences modales, de masses généralisées et d'amortissement des premiers modes d'ensemble. Les échelles de longueurs et de vitesses de l'écoulement étant choisies, celle des temps est fixée par la similitude de Strouhal. Les fréquences propres du modèle doivent alors respecter cette échelle. Quelquefois, les forces de gravité sont présentes, il s'ajoute une condition de Froude liant l'échelle des vitesses à l'échelle géométrique. Le coefficient d'amortissement doit être respecté lui aussi. Il peut être très difficile, techniquement, et également inutile, de reproduire fidèlement tous les modes propres de la structure, tout en gardant le contrôle de l'amortissement de chacun de ses modes. C'est pourquoi on se contente généralement de simuler les principaux modes, par exemple les deux modes fondamentaux de flexion. Souvent même, on admet que les déformées de ces deux modes sont linéaires, le modèle se ramène alors à une maquette rigide de la construction, montée à la base sur un pivot élastique, convenablement réglé pour respecter les fréquences propres fixées par la similitude et équipé d'amortisseurs réglables.

L'instrumentation des maquettes élastiques est généralement constituée de capteurs de déplacements et d'accéléromètres. La connaissance des déplacements permet de calculer l'état des contraintes dans les matériaux constituant la structure.

Pour la mesure des déplacements, les capteurs inductifs et capacitifs à faible friction sont largement utilisés. Les mesures optiques (émission : rayon laser-réception : photomultiplicateur) présentent le gros avantage d'être réalisables à distance sans perturber la maquette, seule une cible est nécessaire sur cette dernière.

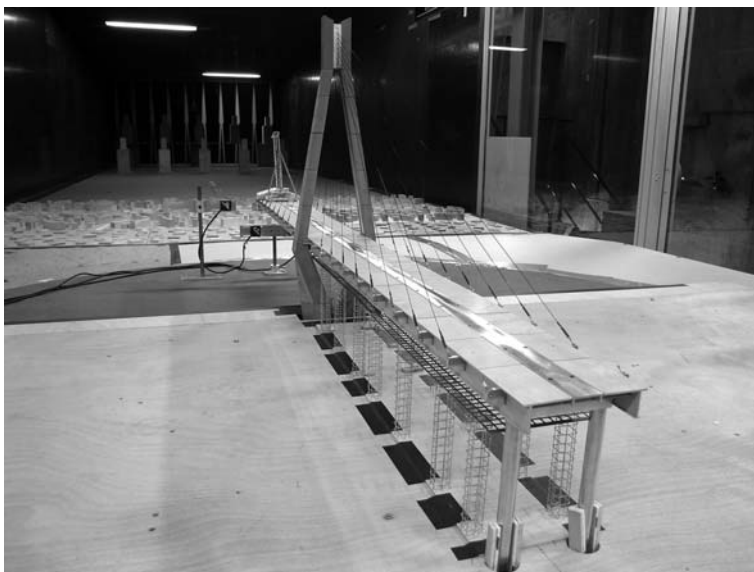


Fig. 11.7. - Maquette aéroélastique d'un pont à haubans en phase de construction

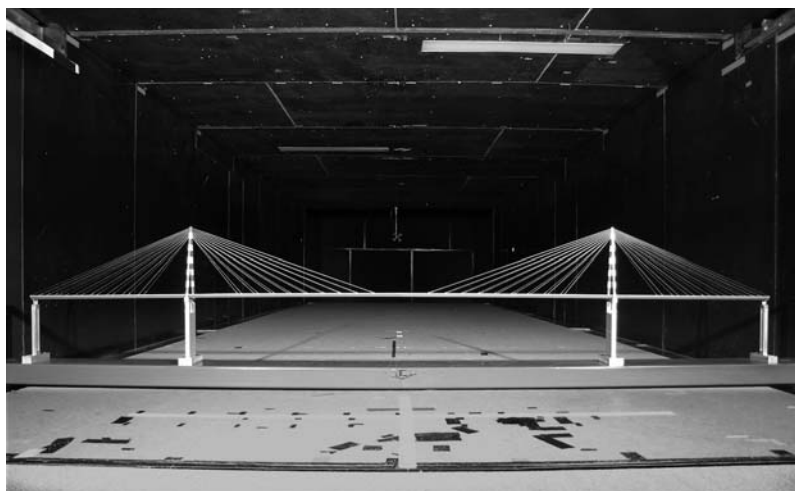


Fig. 11.8. - Maquette aéroélastique d'un pont à haubans

• Simulation échelle 1

Il n'est pas toujours possible de reproduire les phénomènes physiques à échelle réduite. On donnera pour exemple, le comportement aérodynamique des éléments de petites dimensions (composants du bâtiment, petites structures, etc.), le comportement des structures poreuses (filets composés de mailles), le transport des particules (pluie, neige, sable), les phénomènes d'étanchéité (pluie, sable), etc.

Il est préférable d'étudier ces comportements directement à l'échelle 1, sous réserve d'assurer la maîtrise des conditions d'essais et de simulation des sollicitations climatiques. Les résultats obtenus à l'échelle 1 sont directement assimilables à la vraie grandeur.

A Nantes, le CSTB possède une soufflerie de très grandes dimensions permettant de traiter, à l'échelle 1, les comportements aérodynamiques impliquant des paramètres climatiques tel le froid, le givre, la chaleur et le transport d'aérosols tels que la pluie, la neige, les poussières ou encore le sable (fig. 11.9 et 11.10).



Fig. 11.9. - Tenue au vent d'éléments de couverture

• **Simulation numérique**

Les méthodes de simulations numériques des écoulements progressent rapidement. Le principe général de ces méthodes consiste à résoudre les équations de la mécanique des fluides dans chacune des cellules composant le maillage du domaine spatial incluant la structure à dimensionner. Les vitesses instantanées en accord avec les caractéristiques statistiques du vent naturel turbulent peuvent être injectées comme conditions limites aux frontières du domaine. Les vitesses de l'écoulement et les pressions peuvent ainsi être déterminées dans chaque cellule du maillage. Dans le cas de simulation d'une géométrie à trois dimensions, le domaine spatial peut contenir plusieurs centaines de milliers de cellules (fig. 11.10).

La résolution numérique directe des équations repose sur une discrétisation très fine de l'espace et du temps et, de ce fait, reste très largement hors d'atteinte des possibilités informatiques actuelles lorsqu'il s'agit de traiter de géométries complexes (fig. 12.0).

La modélisation statistique des équations simplifie les calculs en considérant des équations moyennées dans le temps. Les grandeurs calculées ont donc sens de moyennes temporelles. Cette méthode doit être utilisée avec prudence dans le cadre des approches de dimensionnement car l'extrapolation des valeurs de pointe à partir de leur valeur moyenne peut conduire à des sous-estimations.

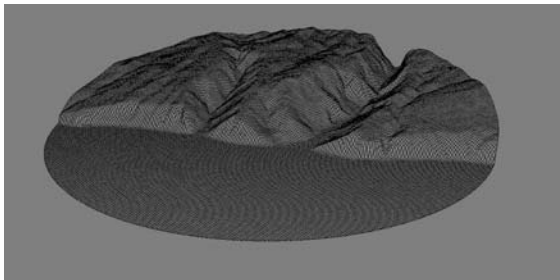


Fig. 11.10. - Simulation numérique
 – maillage d'un relief
 topographique

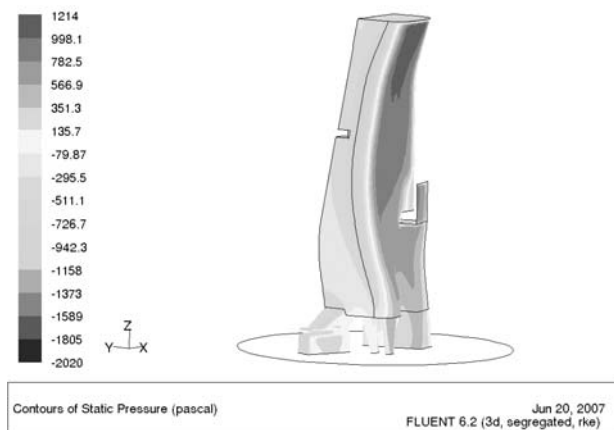


Fig. 12.0. - Simulation numérique –
 champ de pression sur
 l'enveloppe d'une tour

4.4.3. ÉVALUATION DES CHARGES CYCLONIQUES

Ce paragraphe a pour but de fournir, de façon indicative, un ordre de grandeur des charges locales exercées sur les maisons individuelles et le petit collectif de 10 mètres. Ces résultats peuvent également s'appliquer à des juxtapositions de parallélépipèdes (bâtiments en forme de L). Différentes formes de toiture, telles que toiture terrasse, toiture à un versant, deux et quatre versants, de pente de 5, 15 et 30 degrés, ont été considérées. Pour chaque configuration, les zonages ont été définis sur les murs et les versants de toiture de façon aussi simple et systématique que possible dans le respect des règles et dans l'esprit d'une forfaitisation des charges. Les charges dimensionnantes d'enfoncement (positives) et d'arrachement (négatives) sont exprimées, toutes directions confondues, en daN/m^2 (fig. 12.1 à 13.1).

Pour la pression interne sur les murs verticaux, nous avons retenu l'hypothèse d'une perméabilité faible et uniformément répartie sur les différentes façades, ce qui se traduit par $C_{pi} = -0,25$. Pour la toiture, nous avons considéré l'hypothèse conservatrice pour les forces d'arrachement d'un comble séparé du volume d'habitation et non ventilé avec $C_{pi} = 0$.

Nous avons considéré un cas d'exposition correspondant à un site en bord de mer, sans effet orographique. Dans ces conditions, le coefficient d'exposition $C_e(Z_e)$ à dix mètres de hauteur est égal à :

$$C_e(10m) = 2,9$$

La pression dynamique de pointe $q_p(10m)$ associée à une vitesse moyenne du vent de référence, à 10 m du sol, en site « rase campagne », de période de retour 50 ans, V_b , de 34 m/s est donc égale à :

$$q_p(10m) = 205 \text{ daN/m}^2$$

Des extrapolations à d'autres vitesses sont possibles en considérant que les charges évoluent proportionnellement au carré de la vitesse.

Nous rappelons que les valeurs présentées correspondent à des actions locales intéressant des éléments d'enveloppe de l'ordre du mètre carré. L'évaluation forfaitaire des charges globales se fait par intégration des charges locales sur l'enveloppe, sachant que cette démarche présente un caractère conservatif.

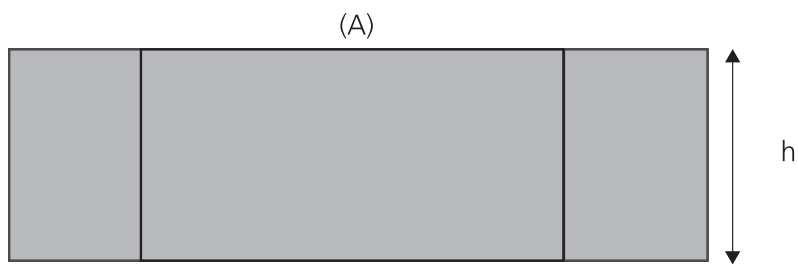
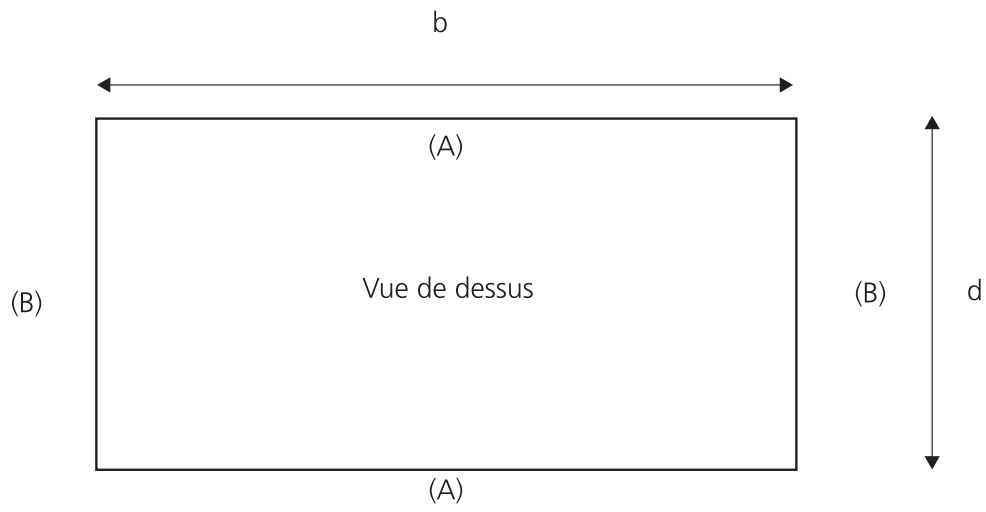


Figure 12.1 – Charges forfaitaires d'écrasement sur les façades verticales, $h \leq 10 \text{ m}$

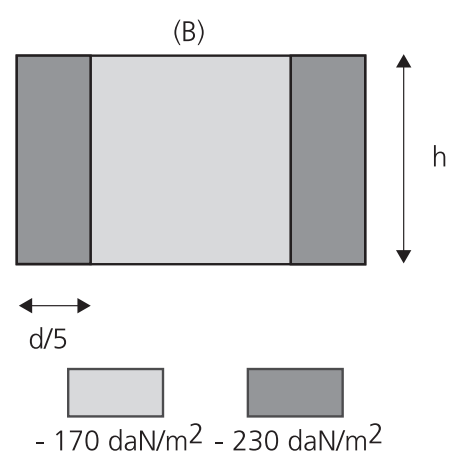
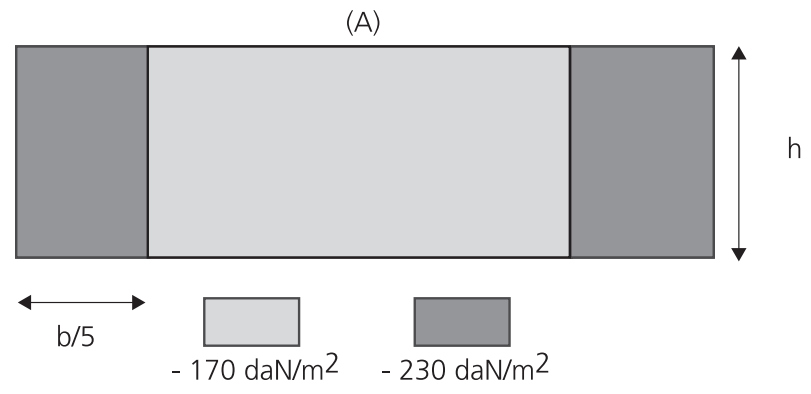
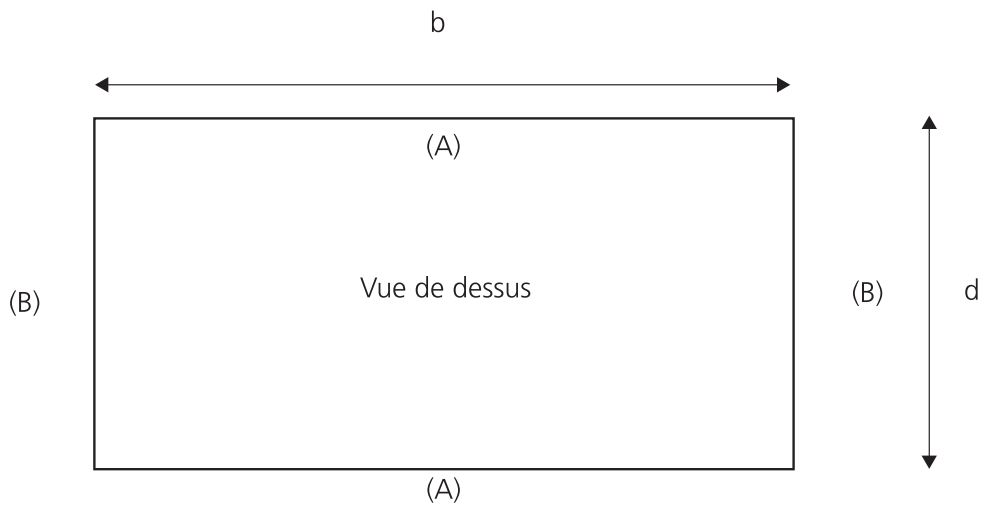


Figure 12.2 – Charges forfaitaires d'arrachement sur les façades verticales, $h \leq 10 \text{ m}$

Toiture terrasse - Pente = 0°

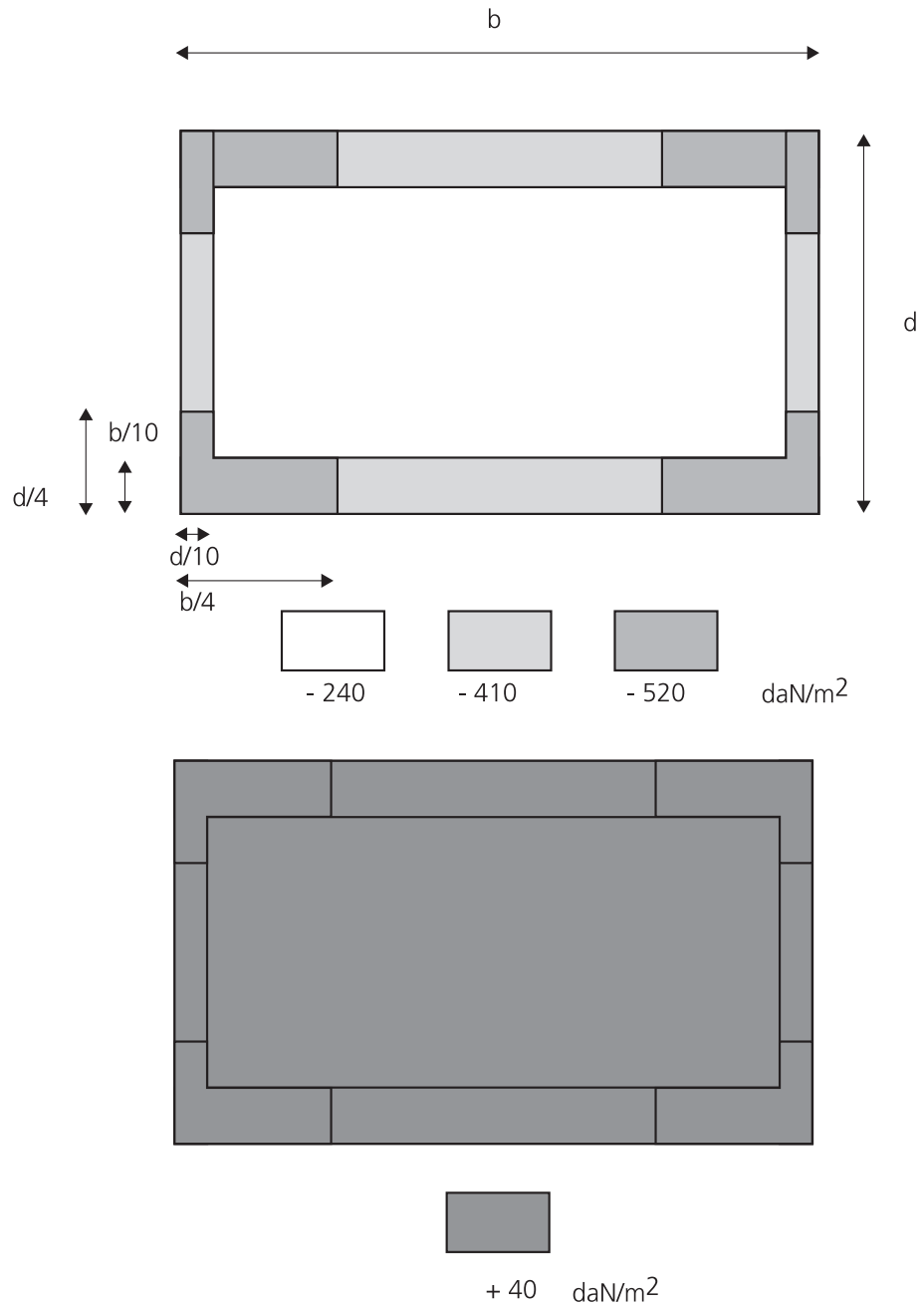


Figure 12.3 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture terrasse, $h \leq 10$ m

Toiture à un versant - Pente = 5°

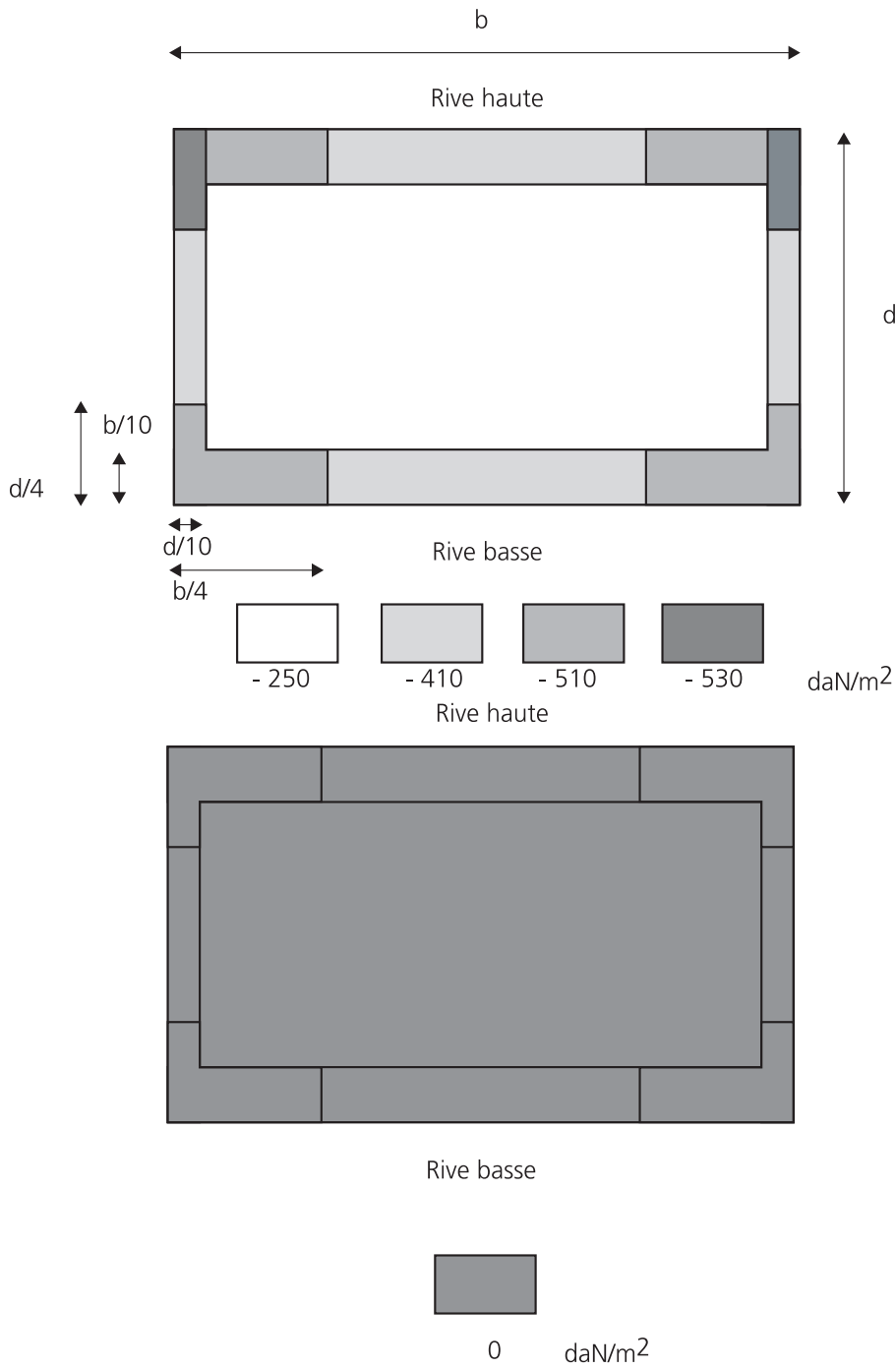


Figure 12.4 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à un versant de pente = 5° - $h \leq 10$ m

Toiture à un versant - Pente = 15°

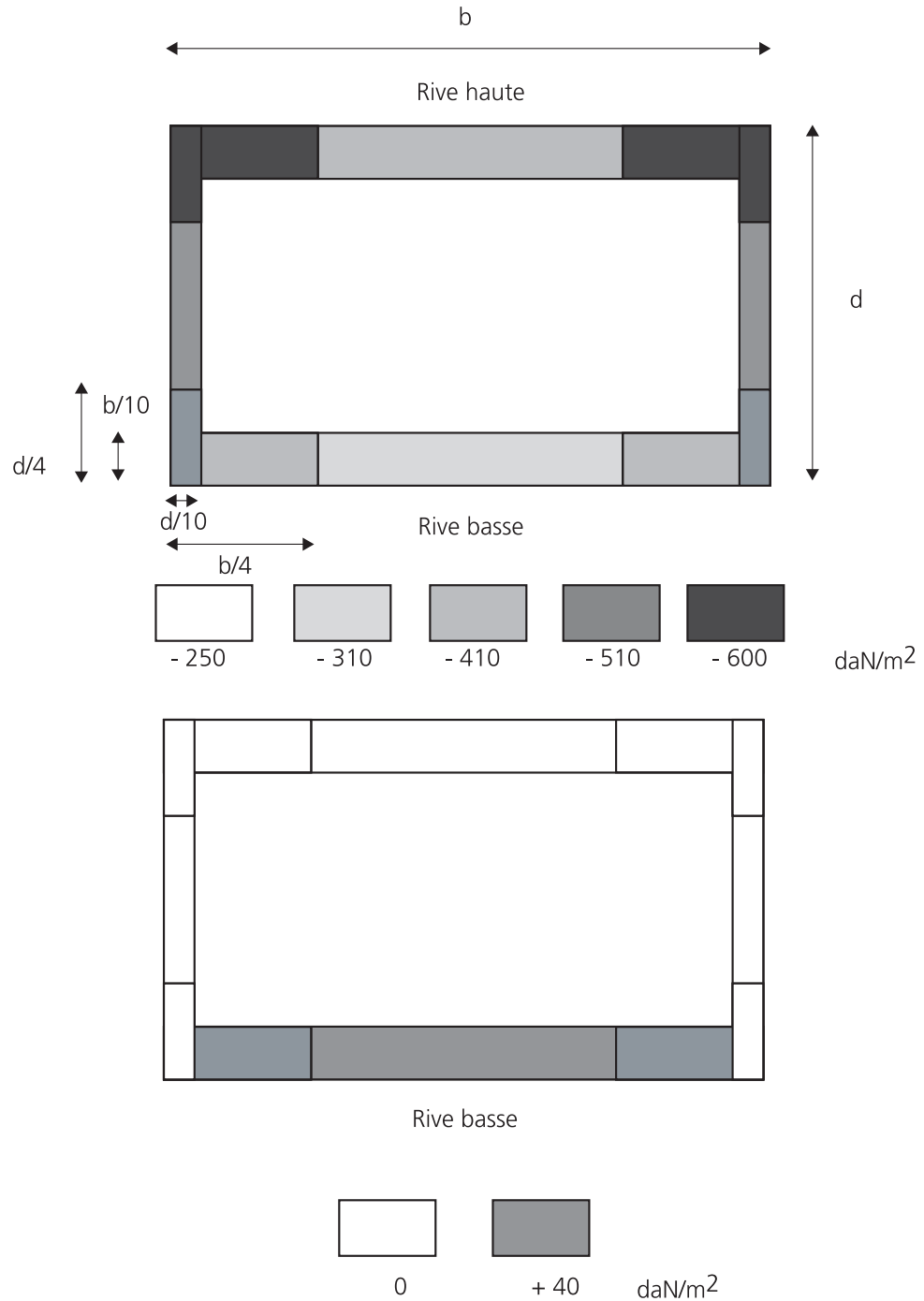


Figure 12.5 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à un versant de pente = 15° - $h \leq 10 \text{ m}$

Toiture à un versant - Pente = 30°

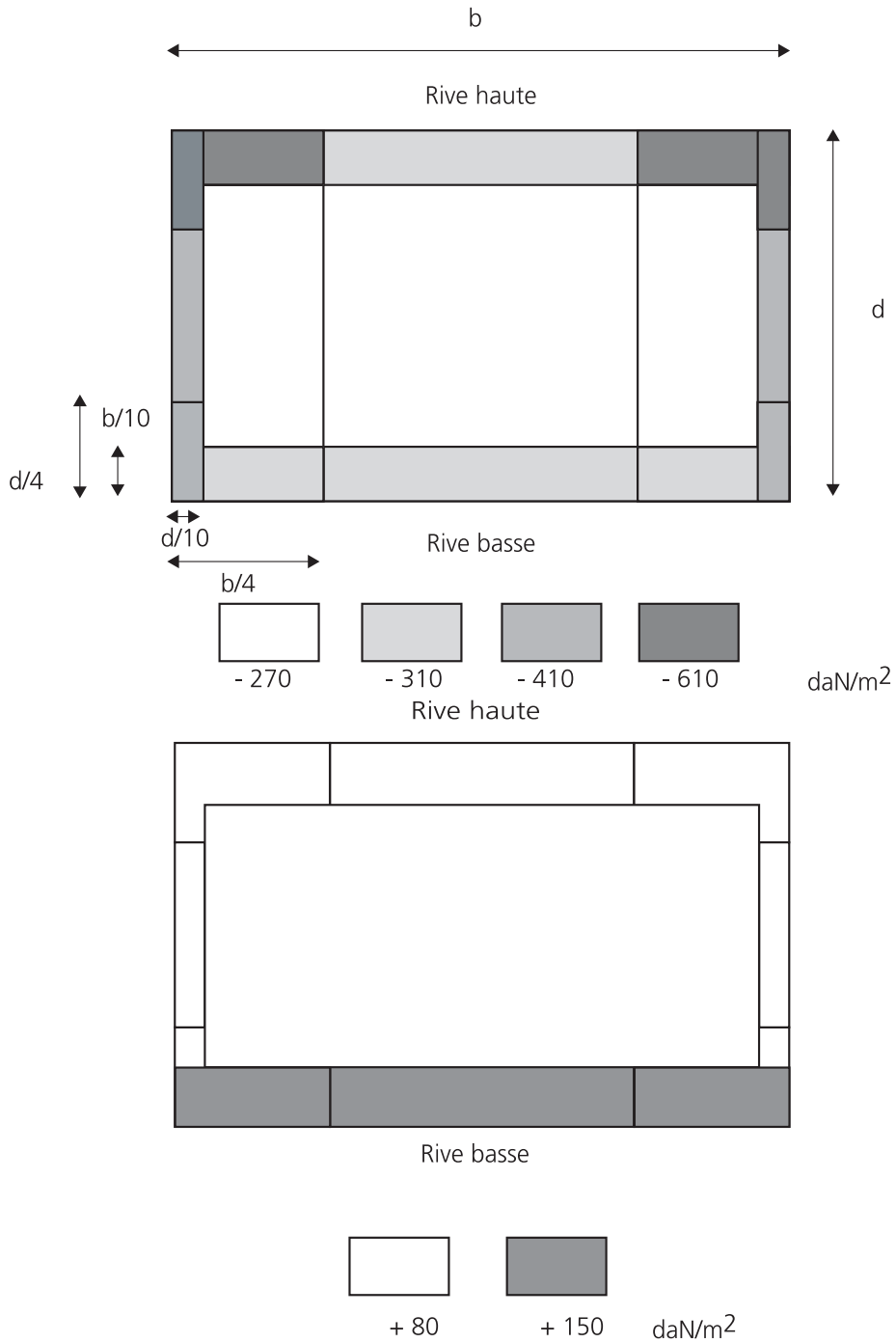


Figure 12.6 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à un versant de pente = 30° - $h \leq 10$ m

Toiture à deux versants - Pente = 5°

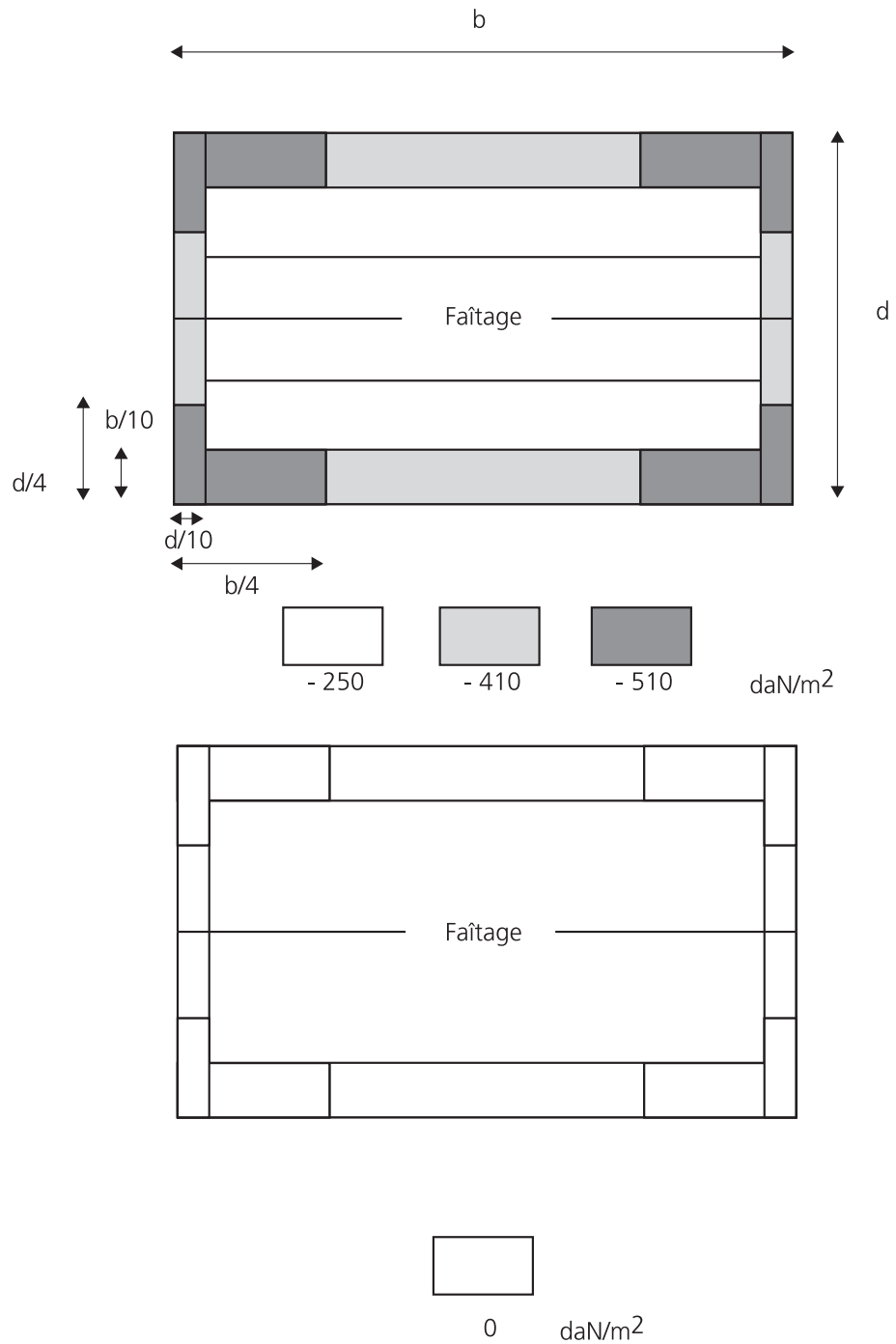


Figure 12.7 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à deux versants de pente = 5° - $h \leq 10$ m

Toiture à deux versants - Pente = 15°

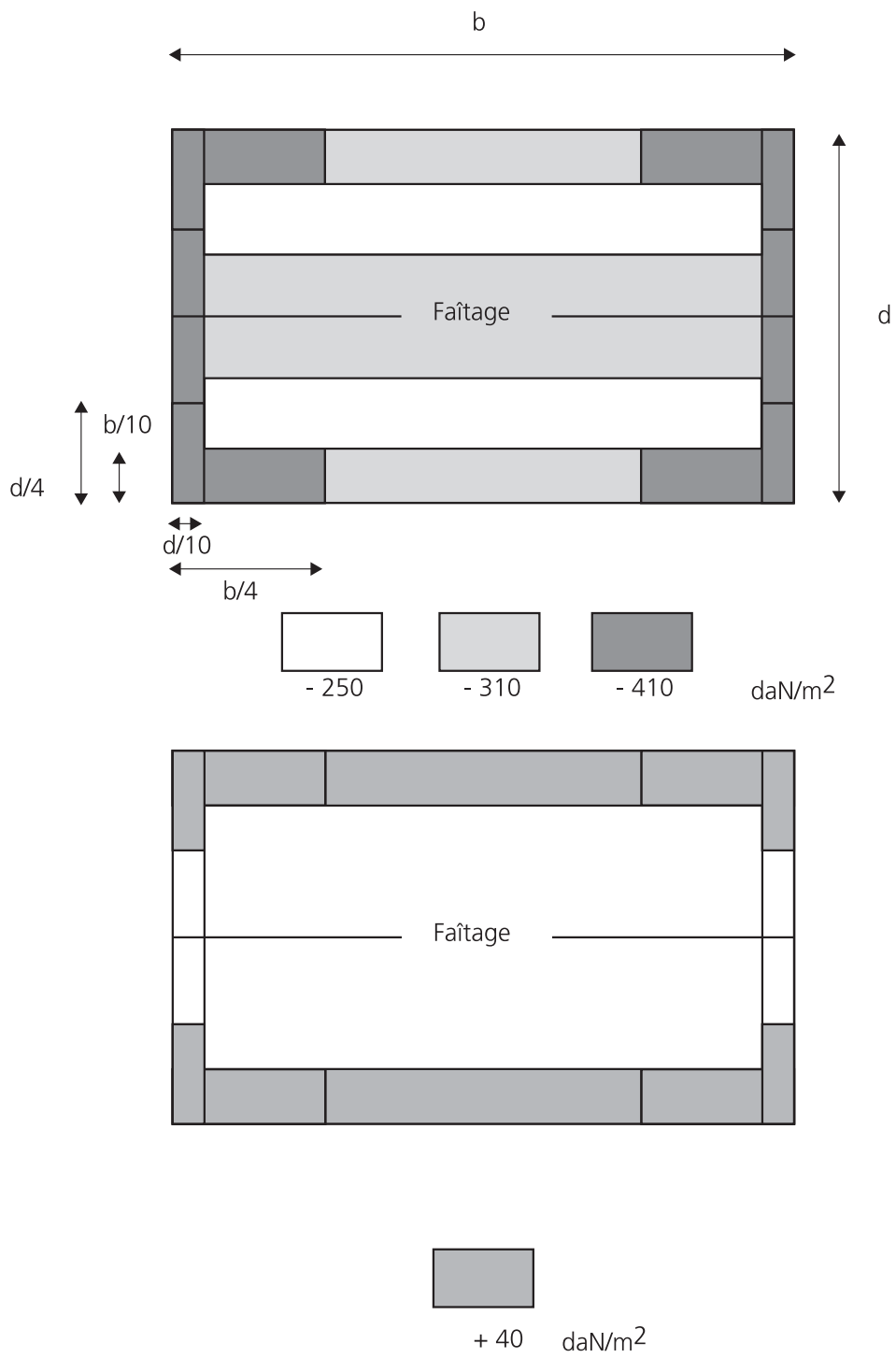


Figure 12.8 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à deux versants de pente = 15° - h ≤ 10 m

Toiture à deux versants - Pente = 30°

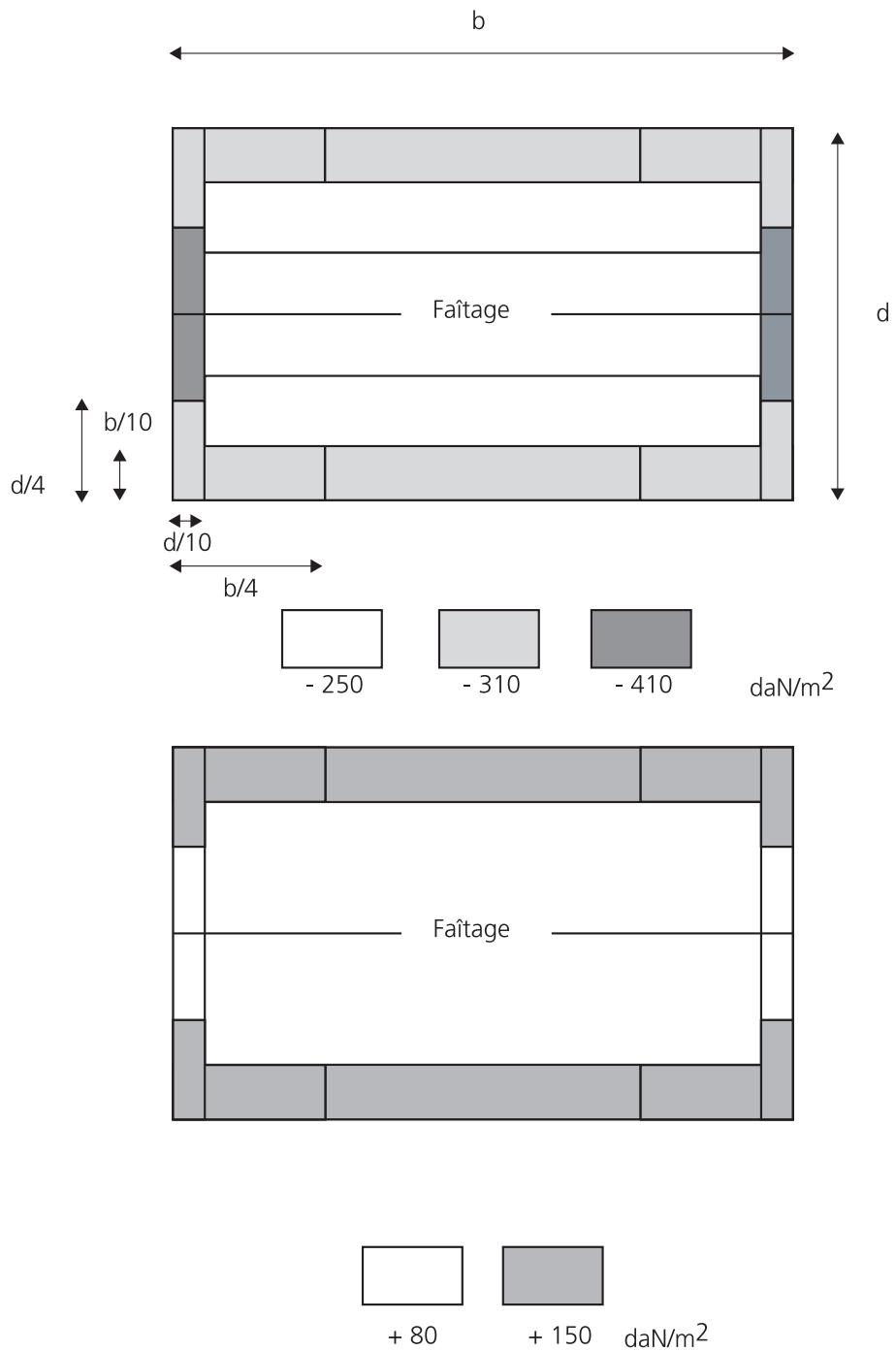


Figure 12.9 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à deux versants de pente = 30° - $h \leq 10$ m

Toiture à quatre versants - Pente = 5°

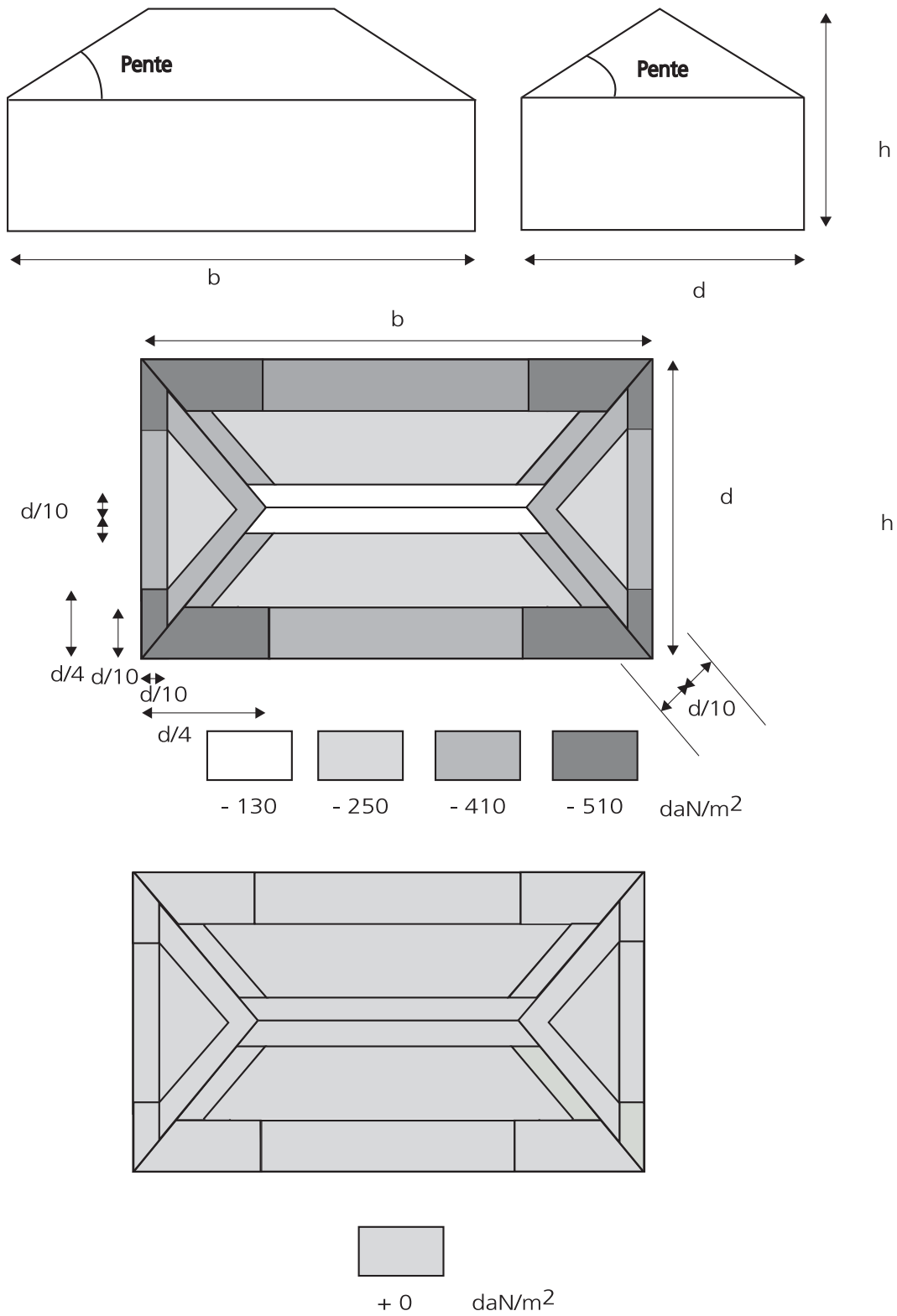


Figure 12.10 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à quatre versants de pente = 5° - $h \leq 10$ m

Toiture à quatre versants - Pente = 15°

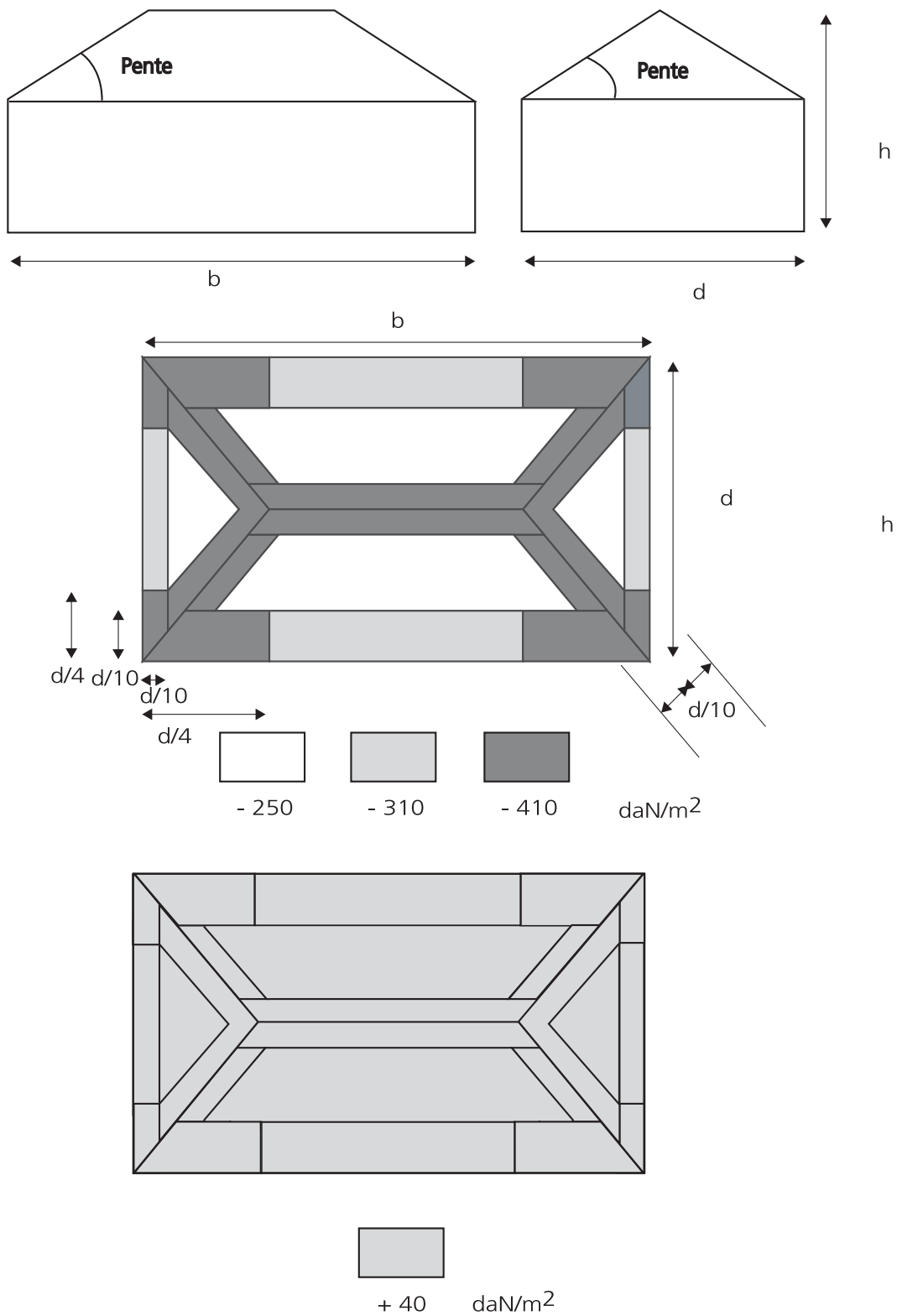


Figure 13.0 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à quatre versants de pente = 15° - $h \leq 10$ m

Toiture à quatre versants - Pente = 30°

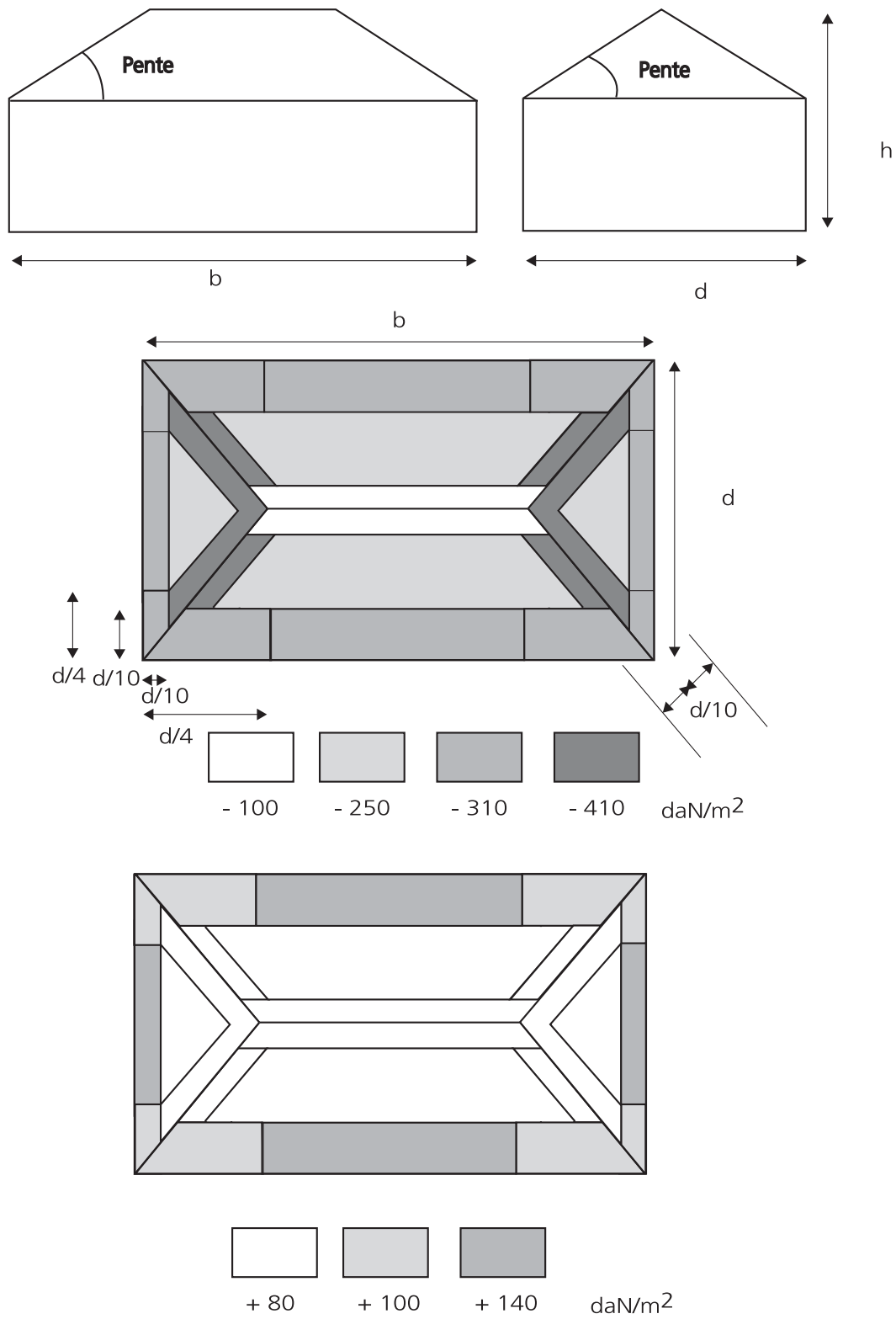


Figure 13.1 – Charges forfaitaires d'arrachement et d'écrasement sur une toiture à quatre versants de pente = 30° - h ≤ 10 m

5. STRATÉGIES COMPORTEMENTALES EN CAS D'ALERTE CYCLONIQUE

Gestion des perméabilités

Toute perméabilité de la peau extérieure de la construction localisée dans une zone potentiellement en surpression (façades, zone de toiture autre que le faîtage) doit être impérativement fermée. On s'assurera de l'obstruction des éventuelles fuites (fermeture défailante de fenêtre ou porte par exemple). Dans le cas d'une architecture conçue avec un puits de dépression, ce dernier devra impérativement être ouvert. Dans un tel cas, toutes les ouvertures internes à la construction doivent être ouvertes afin de conduire le même niveau de pression dans tous les volumes de l'ouvrage. L'objectif d'un puits de dépression est de réduire le différentiel de pression appliqué à la couverture de la construction. Aussi, si un faux-plafond est installé, on prendra bien soin de mettre en communication l'intégralité des volumes internes -combles compris- avec la dépression régnant dans le puits.

Ancrage des éléments sensibles à l'arrachement

Les éléments sensibles à l'arrachement (débords de toiture, véranda) pourront être ancrés au sol par des haubans. Il sera nécessaire de vérifier qu'aucun élément susceptible d'être porté par le vent ne reste à l'extérieur dans les jardins et sur les terrasses (mobiliers de jardin par exemple).

Protection des zones sensibles à l'impact

La sécurité de l'ouvrage est assurée par son étanchéité. Si une brèche s'ouvre dans la vêtue, qu'elle soit localisée en façade ou en toiture, le champ de pression interne est alors instantanément modifié et un déséquilibre majeur peut apparaître. Une réaction en chaîne peut alors s'amorcer et conduire à la ruine totale de l'édifice. Il convient donc de protéger les zones sensibles à l'impact que sont les baies notamment. Des volets sont donc absolument nécessaires. Si ceux-ci ne sont pas prévus d'origine, la stratégie de protection répandue dans les régions tropicales qui consiste à protéger les baies par des panneaux de bois amovibles reste parfaitement acceptable.

Gestion des pénétrations d'eau

L'étanchéité des baies étant souvent imparfaite face à de tels différentiels de pression sur les façades au vent, il est fréquent que de l'eau de pluie soit pulvérisée à l'intérieur. Ce mécanisme apparaît d'autant plus que les linéaires potentiels de fuite sont importants. C'est notamment le cas des baies à ventelles traditionnellement utilisées pour la ventilation naturelle. La réponse la plus simple consiste à éloigner des baies les équipements sensibles. Cette réponse n'est évidemment pas totalement satisfaisante mais elle est pragmatique compte tenu de l'imperfection des baies classiquement proposées sur le marché qui restent globalement peu adaptées à de telles sollicitations. Il est possible de développer des baies tropicales mieux adaptées à cette contrainte, mais il n'existe pas aujourd'hui de produit commercialisé. Les baies à la française ou les coulissants présentent une sensibilité plus faible aux pénétrations d'eau mais apportent une réponse plus discutable du point de vue du confort quotidien.

6. CONCLUSION

Les cyclones sollicitent de manière considérable les constructions. Aux effets directs des vents violents s'ajoutent ceux des pluies torrentielles et des crues qu'elles provoquent. Nombre des ouvrages construits en zone cyclonique, et notamment ceux qui relèvent de la construction domestique, sont trop mal conçus, insuffisamment dimensionnés ou réalisés avec trop peu de soins pour résister à de telles actions.

Il appartient à chacun des acteurs impliqués dans le processus de construction de mieux prendre en compte le phénomène cyclonique afin d'en réduire les risques. Conception, dimensionnement et exécution sont autant d'étapes cruciales de ce processus ; par conséquent, l'architecte, l'ingénieur et l'entrepreneur, ont tous les trois un rôle déterminant à jouer.

Les éléments qui sont donnés dans cet ouvrage permettent de mieux cerner le phénomène cyclonique, depuis les mécanismes physiques qui participent à sa formation jusqu'à ses effets sur les bâtiments. Il apparaît ainsi que les stratégies d'adaptation à l'aléa cyclonique peuvent être réparties en deux grandes familles :

1- **Réduire l'intensité des charges** par une réflexion sur l'implantation de l'ouvrage et sur son architecture.

2- **Favoriser la capacité de résistance** du bâtiment en agissant sur la qualité du contreventement et le respect des règles de l'art inhérentes aux différents procédés constructifs, de l'assise de ses fondations aux détails de sa vêtture.

L'accent est volontairement mis sur les aspects qualitatifs susceptibles d'intéresser les trois destinataires de cet ouvrage et constituer une culture scientifique et technique commune. Tous les éléments chiffrés fournis par les auteurs n'ont d'autre ambition que de renforcer ce socle commun par quelques ordres de grandeur.

Cet ouvrage ne saurait se substituer aux différentes réglementations en vigueur dans les pays concernés par le risque cyclonique. En outre, il revient aux différents acteurs de la construction de connaître les limites de leurs domaines de compétences, et, lorsque celles-ci sont dépassées, de faire appel à des bureaux d'études spécialisés dans les domaines concernés : géotechnique, ingénierie du vent, structures, etc.

Enfin, la prise en compte du risque cyclonique n'est souvent qu'une simple composante d'une stratégie plus globale qui inclut d'autres dimensions techniques tout aussi délicates à manipuler et potentiellement contradictoires : ventilation naturelle, risque sismique etc. Une bonne coordination de l'équipe de conception est alors indispensable.

7. BIBLIOGRAPHIE ET REFERENCES

1. BARNAUD, G. ; BERLIANU, I-V. : Mission du CSTB en Guadeloupe après le passage du cyclone HUGO. Rapport EN-ECA 89-13L, CSTB, 1989.
2. BARNAUD, G. ; GANDEMER, J. ; BIETRY, J. : Aérodynamique in : REEF. Vol. II , CSTB, 1980, 106p.
3. DE LA FOYE, A. : Calcul de la réponse dynamique des structures élan-cées soumises à la turbulence du vent. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2001, 183p.
4. DELAUNAY, D. : Vents extrêmes dus aux cyclones tropicaux dans les DOM-TOM. in : Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâti-ment N°2078, CSTB, 1986, 17p.
5. GANDEMER, J. : Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles – application à la conception des installations de ventilation. in : Cahiers du CSTB n°187, 1978, 34p.
6. GANDEMER, J. ; HELARY MOREAU, S. : Wind loads and architectural design – application to tropical cyclonic dwelling. In : Proceedings of the 10th International Conference of Wind Engineering Vol.2, Copen-hagen, 1999, pp .1401-1408.
7. HELARY MOREAU, S. ; GANDEMER, J. : Habitat cyclonique : concept adapté à l'auto-construction. In : Cahiers du CSTB n°3071, 1998, 15p.
8. HELARY MOREAU, S. ; GANDEMER, J. : Contribution à la conception d'éléments architecturaux et environnementaux de protection cyclo-nique. Rapport EN-AEC 98.118C. Nantes, CSTB, 1998, 34p.
9. HOLMES, J.D. : Wind pressure on tropical housing. In : Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamics 53, 1994, pp 105-113.
10. MEECHAM, D. : Wind action on hip and gable roof. Thèse de l'univer-sité de l'Ontario, 1988. Conception cyclonique – Concepts aérodyna-miques et conseils pratiques.
11. MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT : Annual review of natural catastrophes 1998, 1999, 20p.

- 12.** Moreau, S ; Gandemer, J ; Barnaud, G. : Cahiers du CSTB – Etudes et Recherches – Janvier-février 2001, cahier N°3311
- 13.** POTHIN, J. : Cyclones... Environnement – Constructions – Désordres – Remèdes. Socotec, 1992, 361p.

8. NOTES

¹ MÜNCHENER RÜCKVERSICHERUNGS-GESELLSCHAFT : *Annual review of natural catastrophes 1998, 1999, 20p*

² http://lettres-histoire.ac-rouen.fr/histgeo/katrina_evolution.htm

³ <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/breves/2004/7.htm>

⁴ DELAUNAY, D. : Vents extrêmes dus aux cyclones tropicaux dans les DOM-TOM. in : Cahiers du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment N°2078, CSTB, 1986.

IMPRESSION

Imprimerie Cusin

RÉDACTION

Christian Barré
Alexandre de la Foye
Sophie Moreau

CRÉDITS PHOTOS

Couverture : Michèle Robin-Clerc
Illustrations et photos :
Alexandre de la Foye
Sophie Moreau
Christian Barré
Illustrations Fotolia : 1.4, 2.1, 2.3 et 2.4

LES GRANDS ATELIERS DE L'ISLE D'ABEAU
Boulevard de Villefontaine BP 43, 38092 Villefontaine cedex
www.lesgrandsateliers.fr

Dépôt légal :
ISBN : 978-2-913962-13-2

