

DÉTERMINATION DES VENTS EXTRÊMES À L'AIDE D'ANALYSES STATISTIQUES ET DE MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES DANS UNE TOPOGRAPHIE ACCIDENTÉE EN SUISSE

Jean-Michel FALLOT et Jacques-André HERTIG

Résumé

Les constructions en Suisse et en Europe doivent être dimensionnées pour subir sans dommages des vents extrêmes (rafales) avec une période de retour d'au moins 50 ans. Des analyses de Gumbel ont donc été effectuées sur des séries de mesures d'une vingtaine d'années à 67 endroits de la Suisse, afin de déterminer les vitesses extrêmes des vents pour différents courants régionaux. Elles ont abouti à de bons résultats pour la majorité des endroits. Mais ces vitesses extrêmes ne peuvent être extrapolées linéairement aux autres régions dans une topographie aussi accidentée que la Suisse. Un modèle numérique tridimensionnel des écoulements non hydrostatique a été expérimenté pour calculer les champs de vent extrêmes en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km et une période de retour de 50 ans. Ces modélisations ont permis de reproduire de manière satisfaisante ces vents extrêmes pour l'ensemble du pays. Toutefois, elles sous-estiment leurs intensités sur les reliefs jurassiens et alpins, comparativement aux vallées alpines et au Plateau Suisse.

Mots-clés

Vents extrêmes, topographie accidentée, analyse de Gumbel, modélisation tridimensionnelle des écoulements

Abstract

Buildings in Switzerland and Europe have to resist to extreme wind gusts with a return period of 50 years. Gumbel analyses have been carried out on time series about 20 years span at 67 locations in Switzerland, in order to assess extreme speeds for several regional winds. These analyses provide good results at most locations. But these extreme values can not be linearly extrapolated to other regions in a complex terrain as Switzerland. A non-hydrostatic three-dimensional numerical model has been tested for calculating extreme wind fields with a 2 km horizontal resolution and for a return period of 50 years. This model is able to reproduce enough well these extreme winds for the whole country. However, extreme wind speed over Jura and Alps mountains are underestimated on the model in comparison to alpine valleys and Swiss Plateau.

Keywords

Extreme wind, complex topography, Gumbel analysis, threedimensional airflow modelling

INTRODUCTION

Les vents extrêmes retiennent l'attention des météorologues et des climatologues, car ils peuvent provoquer des dommages considérables aux forêts et aux constructions humaines (bâtiments, ponts, ...) et perturber également de nombreuses activités socio-économiques. Le nombre d'événements météorologiques extrêmes et les dommages occasionnés tendent à augmenter ces dernières années en relation avec le réchauffement du climat.

Contrairement à d'autres régions du monde, la fréquence des tempêtes aurait diminué en Suisse au Nord des Alpes de 1864 à 1994 en saison froide (Schiesser *et al.*, 1997). En particulier, la période avant 1940 aurait été en moyenne plus venteuse que les décades suivantes. Malgré une augmentation de la fréquence des situations cycloniques

d'Ouest depuis 1980 liée à un changement de phase dans l'oscillation nord-atlantique, les tempêtes n'ont pas vu leur nombre augmenter en Suisse. Cela provient du fait que le renforcement de l'activité cyclonique sur l'Atlantique Nord s'est également accompagné d'un déplacement vers le Nord de la circulation d'Ouest rapide des moyennes latitudes. De par sa position plus méridionale, la Suisse serait de moins en moins souvent touchée par des tempêtes d'Ouest. Seul, le creusement de dépressions secondaires profondes dans une circulation d'Ouest rapide peut générer des vents tempétueux, voire même des ouragans, à l'image de ceux de Viviane le 27 février 1990 et de Lothar le 26 décembre 1999.

La fréquence des tempêtes aurait également diminué aux Pays-Bas de 1962 à 2002 selon une étude effectuée sur la base des mesures *in situ* du vent effectuées à 10 m/sol à 13 endroits de ce pays (Smits *et al.*, 2005).

Ceci contredit les résultats obtenus par d'autres études (Yan *et al.*, 2002) à partir de réanalyses des données du vent des centres de recherche américains (NCEP-NCAR : National Center for Environmental Prediction et National Center for Atmospheric Research) et européen (ECMWF : European Center for Medium-Range Weather Forecasts). Les inhomogénéités détectées dans ces données réanalysées pourraient expliquer ces divergences au niveau des tendances.

Le réchauffement global du climat devrait s'accompagner d'une hausse de la fréquence des événements extrêmes comme les intempéries ou les vents forts dans certaines régions de la Terre (IPCC, 2007). Les modélisations régionales du climat effectuées dans le cadre du projet PRUDENCE montrent que la vitesse des vents extrêmes devrait effectivement augmenter d'ici à la fin du 21^e siècle entre 45° et 55°N en Europe, sauf dans les Alpes et au Sud de celles-ci. Une telle hausse résulterait d'une fréquence plus grande des tempêtes sur la Mer du Nord consécutivement à une baisse globale de la pression au niveau de la mer dans cette région (Beniston *et al.*, 2007). En outre, la fréquence des vents forts d'Ouest à Nord-Ouest devrait s'accroître en hiver au détriment de ceux d'Ouest à Sud-Ouest ; ce qui pourrait favoriser une probabilité plus grande d'ouragans tels que Viviane et Lothar.

Les vents forts constituent aussi un facteur météorologique important pour le dimensionnement des constructions (bâtiments, ponts, ...). Les charges exercées par le vent sur ces dernières sont définies dans la norme SIA 261 (SIA, 2003) en Suisse et dans l'Eurocode EC1 en Europe (Eurocode, 2003). Des cartes de vents extrêmes ou de pressions dynamiques extrêmes pour les rafales ou les vitesses moyennes sur 10 minutes ont été établies depuis longtemps dans la plupart des pays sur la base de mesures météorologiques effectuées en quelques endroits représentatifs. Mais la topographie accidentée de la Suisse rend plus difficile l'établissement de telles cartes à partir de mesures *in situ*. Les crêtes du Jura et des Alpes sont exposées à des vents violents, alors que les régions habitées du Plateau Suisse et les vallées alpines sont relativement abritées grâce à ces chaînes de montagnes. Cela se traduit par des charges exercées par le vent bien différentes d'une région à l'autre du pays.

Une première étude menée à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) a établi les rapports existant entre les rafales et les vitesses maximales moyennées sur 10 minutes pour le Plateau Suisse (rapport non publié). Une autre étude (Jungo *et al.*, 2001) a permis de déterminer les rapports existant entre les rafales maximales et les vitesses moyennes journalières du vent en Suisse pour trois grandes classes de situations météorologiques (advectives, convectives et mixtes selon la classification de Schuepp) et un certain nombre de sites (fond de vallée, sommet, ...) ou régions. Ces rapports suivent la distribution lognormale de Weggel (1999) applicable aux USA. Il serait dès lors possible de déterminer la rafale maximale du vent dans

une topographie aussi accidentée qu'en Suisse à partir des prévisions du vent moyen journalier calculées par les modèles météorologiques, en particulier le modèle régional COSMO-2 à 2 km de MétéoSuisse opérationnel depuis 2008. Mais il convient pour cela de connaître les particularités de chaque site en Suisse au niveau des rapports entre les rafales et les vents moyens journaliers, car ils n'ont été déterminés qu'à une soixantaine d'endroits du pays là où on dispose de mesures *in situ* des vents. Ce nombre est insuffisant pour prendre en compte toutes les influences de la topographie locale et régionale sur la vitesse des vents extrêmes en Suisse.

D'où la nécessité de développer d'autres méthodes à partir de modèles numériques tridimensionnels pour déterminer avec la précision la meilleure les vents forts dans une topographie aussi accidentée. Un modèle climatique régional canadien avec un degré de résolution horizontale de 20 km, de 5 km et de 1 km a été expérimenté pour calculer les rafales des vents extrêmes en Suisse (Goyette *et al.*, 2003). Ce modèle a permis de bien reproduire les caractéristiques générales des tempêtes ou des ouragans (Viviane, Lothar) en Suisse, mais pas l'ampleur exacte des rafales dans les différents endroits du pays. La plupart des modèles ont souvent de la peine à simuler correctement les particularités de la couche limite planétaire pour les épisodes tempétueux, car ces épisodes atteignent rarement un état stationnaire et des conditions d'équilibre atmosphérique pour lesquels ces modèles ont été développés.

Les modèles météorologiques numériques basés sur l'hypothèse hydrostatique ne permettent pas de tenir compte de manière satisfaisante des effets hydrodynamiques dans une topographie accidentée. Pour cette raison, un modèle numérique tridimensionnel non hydrostatique a été développé et expérimenté pour calculer les vents extrêmes en Suisse.

Les normes de constructions se basent depuis une trentaine d'années sur les rafales associées à une période de retour de 30 et de 50 ans. Ceci est défini par la rugosité obtenue dans les normes (Hertig, 2003). Or, le réseau de MétéoSuisse ne mesure en continu la direction, la vitesse et la rafale des vents que depuis la fin des années 1970 à 67 endroits du pays. Auparavant, la force du vent était estimée à partir de l'échelle de Beaufort ou de mesures *in situ* ponctuelles. Nous avons d'abord procédé à des analyses statistiques afin d'évaluer l'intensité des vents extrêmes à ces endroits pour une période de retour de 50 ans à partir de séries de mesures ne couvrant qu'une durée de 20 à 25 ans (cf. II). Puis, les champs de vents extrêmes ont été calculés à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel non hydrostatique de manière à déterminer leur intensité sur l'ensemble du territoire à une échelle aussi fine que possible et pour une période de retour de 50 ans (cf. III). Une augmentation de la vitesse des vents extrêmes dans le futur telle que prévue par certains modèles climatiques régionaux (Beniston *et al.*, 2007) se traduirait par une hausse des charges de dimensionnement pour les constructions,

d'où la nécessité de considérer une période de retour suffisamment longue. Le présent article constitue une extension de l'étude présentée en septembre 2007 lors du 20^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC) à Tunis (Fallot *et al.*, 2007).

I. CADRE GÉOGRAPHIQUE ET DONNÉES

Située au cœur de l'Europe, la Suisse se compose d'une vaste dépression densément peuplée, le Plateau Suisse, qui s'étend du Sud-Ouest (Genève) au Nord-Est du pays (Güttingen n° 54 : figure 1). Son altitude moyenne avoisine 500 m et il est bordé par 2 grandes chaînes de montagnes : le Jura au Nord-Ouest et les Alpes au Sud-Est. Les plus hauts sommets du Jura culminent à une altitude de 1 700 m, alors qu'ils dépassent 4 000 m dans les Alpes (4 634 m au Mont Rose). La ligne de faite séparant les versants Nord et Sud des Alpes va du massif du Mont Blanc à celui de la Bernina, en passant par le massif du Mont Rose et le col du Gothard. Le versant Sud des Alpes ne couvre qu'une petite surface en Suisse (Tessin et Sud des Grisons) et s'étend jusqu'à la plaine du Pô à une altitude de 200 m.

Les séries de mesures *in situ* proviennent du réseau automatique ANETZ de MétéoSuisse (Institut Suisse de Météorologie) qui enregistre en continu les vents (direction et vitesse moyennes sur 10 minutes, rafale maximale durant les 10 minutes) et d'autres paramètres météorologiques depuis 1978 ou 1979 à 67 endroits du pays. Certaines stations automatiques ont été mises en service plus tardivement. La figure 1 et le tableau

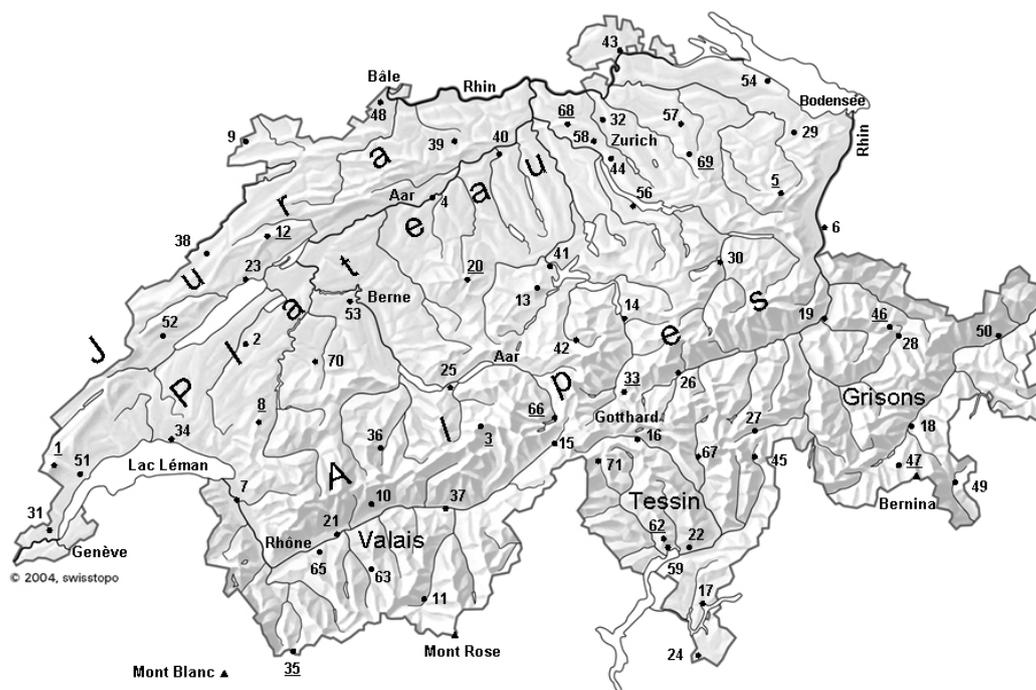
1 permettent de localiser les 67 stations étudiées. Les principales caractéristiques du site et l'influence de la topographie locale sur les mesures du vent sont décrites en détail pour chaque station dans un rapport de l'EPFL (Ehinger *et al.*, 1990). Selon les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), les mesures du vent devraient se faire à 10m au-dessus du sol. On constate que cette hauteur n'est pas respectée à plusieurs endroits. Certains anémomètres sont juchés sur les toits de bâtiments, ce qui explique des hauteurs plus grandes par rapport à la surface du sol. Il convient de tenir compte de ces particularités dans l'estimation des vitesses des vents forts, car elles augmentent avec la hauteur au-dessus du sol dans la couche limite planétaire.

Les données des radiosondages effectués 2 ou 4 fois par jour au-dessus de Payerne et en d'autres endroits proches des Alpes (Milan, Stuttgart) ont été utilisées pour déterminer les conditions initiales moyennes à introduire dans le modèle numérique pour calculer les champs de vent extrêmes. Ces données sont publiées quotidiennement dans les bulletins météorologiques suisses (MétéoSuisse) et européens.

II. ANALYSES STATISTIQUES DE GUMBEL

A. Méthode

Il existe plusieurs méthodes statistiques pour déterminer la vitesse des vents extrêmes à partir d'une série de données (Palutikof *et al.*, 1999). La méthode de Gumbel est une des plus souvent utilisées en météorologie pour



Nombres soulignés : stations situées sur un sommet ou un col.

Figure 1. Localisation des stations de mesures du réseau automatique de MétéoSuisse

Tableau 1. Noms et principales caractéristiques des stations de mesures du réseau automatique de MétéoSuisse

Numéro station	Nom de la station	Altitude m	Site	Hauteur m/sol	Numéro station	Nom de la station	Altitude m	Site	Hauteur m/sol
1	La Dôle	1670	s	10.5	35	Grand St Bernard	2472	c	26.5
2	Payerne	490	p	10	36	Adelboden	1320	v	17
3	Jungfraujoch	3580	c	10	37	Visp	640	v	10
4	Wynau	422	p	11.5	38	La Chaux-de-Fonds	1018	v	19
5	Saentis	2490	s	10	39	Rünenberg	610	v	15
6	Vaduz	460	v	10	40	Buchs-Aarau	387	p	13.5
7	Aigle	381	v	10	41	Luzern	456	p	50
8	Moléson	1972	s	10	42	Engelberg	1035	v	20
9	Fahy	596	p	10	43	Schaffhausen	437	p	54
10	Montana	1508	ve	30	44	Zürich SMA	556	p	31
11	Zermatt	1638	v	10	45	San Bernardino	1639	v	11
12	Chasseral	1599	s	60	46	Weissfluhjoch	2690	s	8
13	Pilatus	2106	s	8	47	Corvatsch	3315	s	20
14	Altdorf	449	v	51	48	Basel-Binningen	316	p	18.3
15	Ulrichen	1345	v	10	49	Robbia	1078	v	10.5
16	Piotta	1007	v	13.5	50	Scuol	1298	v	10
17	Lugano	273	p	49.6	51	Changins/Nyon	430	p	12
18	Samedan-St Moritz	1705	v	11.5	52	La Frétaz	1202	ve	13.5
19	Chur-Ems	555	v	22	53	Bern-Liebefeld	565	p	11.7
20	Napf	1406	s	15	54	Güttingen	440	p	11.4
21	Sion	482	v	10	56	Wädenswil	463	p	30
22	Locarno-Magadino	197	p	28	57	Tänikon	536	p	14.4
23	Neuchâtel	485	p	20	58	Zürich Reckenholz	443	p	13
24	Stabio	353	p	10	59	Locarno-Monti	366	ve	21
25	Interlaken	580	v	7.8	62	Cimetta	1672	s	11.5
26	Disentis	1190	v	10	63	Evolène-Villa	1825	ve	10
27	Hinterrhein	1611	v	10	65	Fey Basse-Nendaz	737	ve	10
28	Davos	1590	v	13.5	66	Grimsel-Hospiz	1980	c	10
29	St Gallen	779	p	22	67	Comprovasco	575	v	10
30	Glarus	515	v	12	68	Lägern	868	ve	10
31	Genève-Cointrin	420	p	9.8	69	Hörnli	1144	s	10
32	Zürich-Kloten	436	p	14.1	70	Plaffeien-Oberschrot	1042	ve	10
33	Gütsch/Andermatt	2287	c	11	71	Robiei	1898	v	10
34	Pully	461	p	11.7					

p = plaine ou plateau s = sommet c = col v = vallée ve = versant

Les numéros des stations correspondent à ceux retenus par MétéoSuisse et mentionnés dans la figure 1
Les stations n°55, 60, 61, 64 et 72 ne mesurent pas les vents; elles n'apparaissent donc pas dans ce tableau

rechercher les valeurs extrêmes pour les précipitations ou les vents. Elle a été confrontée avec la méthode de Weisbull pour déterminer les vitesses des vents extrêmes en Suisse pour la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA). La comparaison entre ces 2 méthodes statistiques a révélé que celle de Gumbel aboutit à de meilleurs résultats, car elle ne retient que les valeurs extrêmes pour un intervalle de temps donné (mois, année) et non pas toutes les valeurs comme la méthode de Weisbull. Dans un premier temps, l'intensité des vents extrêmes a été déterminée à 67 endroits de la Suisse pour une période de retour de 50 ans à partir d'analyses statistiques de Gumbel effectuées sur des séries de mesures disponibles de 20 à 25 ans pour les rafales et pour les vitesses du vent moyennes sur des intervalles de 10 minutes (réseau automatique ANETZ). Les analyses de Gumbel permettent d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition des événements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue (par exemple 50 ans) que

la série de mesures disponible. Cet ajustement se fait à partir d'une double loi exponentielle selon une méthode décrite dans Gumbel (1958). Pour une série de mesures de vents donnée, on retient la valeur maximale (rafale et vitesse du vent moyenne sur 10 minutes) mesurée durant chaque année ou chaque mois. Ces valeurs maximales sont ensuite classées par rang pour lequel on calcule la fréquence d'apparition en fonction de la double loi exponentielle de Gumbel u :

$u = -\ln(-\ln(1-1/T))$, avec T = période de retour exprimée en années ou en mois

On peut ensuite ajuster une droite de régression linéaire en fonction des valeurs u obtenues et des valeurs maximales annuelles ou mensuelles mesurées.

B. Évaluation des analyses de Gumbel pour les vents extrêmes en Suisse

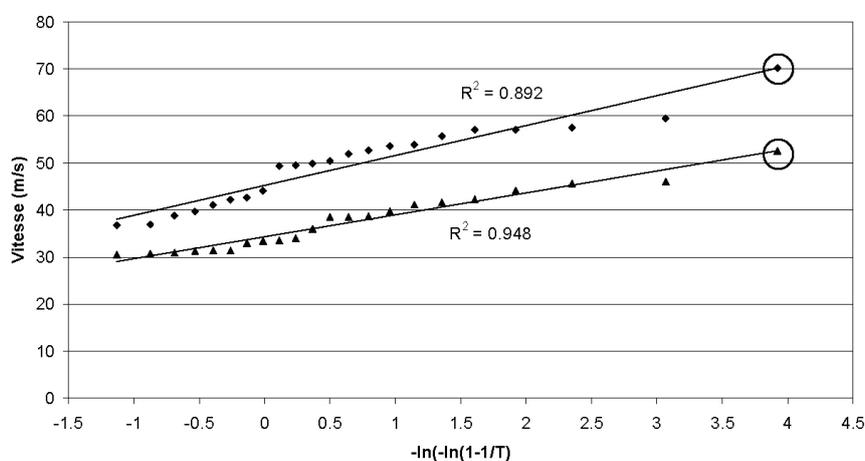
Les figures 2 et 3 présentent à titre d'exemple les droites de régression obtenues pour les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles et

mensuelles de tous les vents au Chasseral, un sommet bien dégagé du Jura, avec les vitesses extrapolées pour une période de retour de 50 ans (= valeur cinquantennale : point entouré d'un cercle). Les valeurs extrapolées à partir des vitesses mensuelles (Figure 3) sont plus précises que celles qui sont extrapolées à partir des valeurs annuelles (Figure 2), car elles comportent davantage de valeurs. On constate que les droites de régression de Gumbel obtenues à partir des valeurs maximales annuelles pour une période de 20 ans expliquent déjà bien les variations de ces valeurs d'une année à l'autre ($R^2 > 0.89$, soit plus de 89% des variations expliquées). Elles permettent par conséquent une bonne estimation des rafales et des vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantennales à cet endroit. On peut faire les mêmes constatations pour les autres séries de mesures en Suisse, sauf en quelques

endroits où elles contiennent des valeurs erronées ou suspectes.

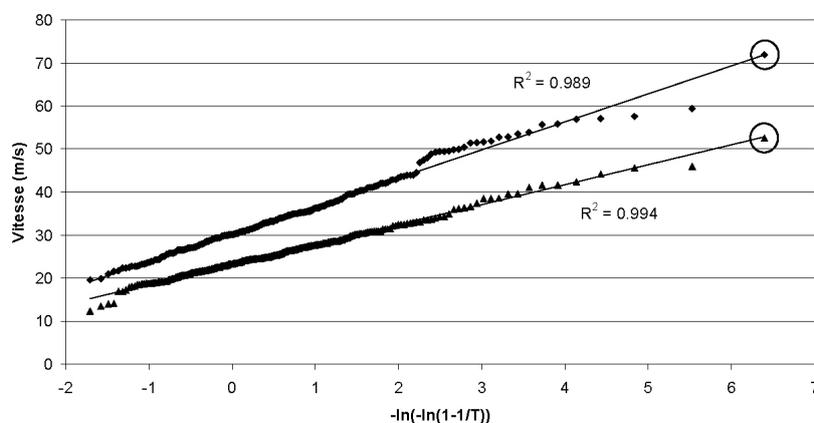
Ces analyses de Gumbel ont ensuite été effectuées pour des intervalles de direction de 30° , de manière à identifier les secteurs et les flux régionaux les plus critiques au niveau des vents extrêmes. Comme précédemment, on a retenu la valeur maximale (rafale et vitesse moyenne sur 10 minutes) pour chaque année ou chaque mois. En Suisse, 5 vents différents peuvent générer de fortes rafales :

- le vent d'Ouest qui souffle du Sud-Ouest au Nord-Ouest en Suisse selon les endroits et la direction générale des flux au-dessus des Alpes,
- la bise qui équivaut à un courant général du Nord à l'Est au Nord des Alpes,
- le foehn du Sud qui dévale les vallées du Nord des Alpes



Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantennales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 2. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles du vent mesuré au Chasseral (sommet jurassien) de 1981 à 2001 tous secteurs confondus



Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantennales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 3. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales mensuelles du vent mesuré au Chasseral (sommet jurassien) de 1981 à 2001 tous secteurs confondus

en cas d'afflux d'air général du Sud-Ouest au Sud-Est au voisinage de la chaîne alpine,
 - le foehn du Nord qui descend les vallées du Sud des Alpes en cas d'afflux général du Nord-Ouest au Nord-Est au voisinage de la chaîne alpine,
 - les vents locaux d'orages.

Ces vents sont fortement canalisés par la topographie régionale et locale des Alpes et du Jura. En particulier, ils remontent ou redescendent les vallées alpines suivant la direction générale des flux en altitude et certains vents régionaux soufflent du même secteur. Ainsi, les vents d'Ouest et la bise remontent la plupart des vallées du Nord des Alpes et leur direction varie en fonction de l'orientation de ces dernières.

Les figures 4 à 7 présentent les droites de régression obtenues pour les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles pour les vents de secteur 285 à 315° et 75 à 105° au Chasseral, avec les vitesses extrapolées pour une période de retour de 50 ans. Ces 2 secteurs coïncident avec les vitesses les plus élevées mesurées respectivement pour les vents d'Ouest et la bise. Les courants les plus forts soufflent généralement du secteur 285 à 315° au Chasseral, si bien que les figures 4 et 5 ressemblent beaucoup aux figures 2 et 3. La distribution des rafales et des vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles ou mensuelles pour le secteur 285 à 315° est régulière selon la double loi exponentielle de Gumbel (comme pour les cas avec tous secteurs de vent confondus : figures 2 et 3). Ceci permet une bonne estimation des valeurs cinquantenales à partir d'une droite de régression pour ce secteur-là, aussi bien à partir des valeurs maximales annuelles que mensuelles.

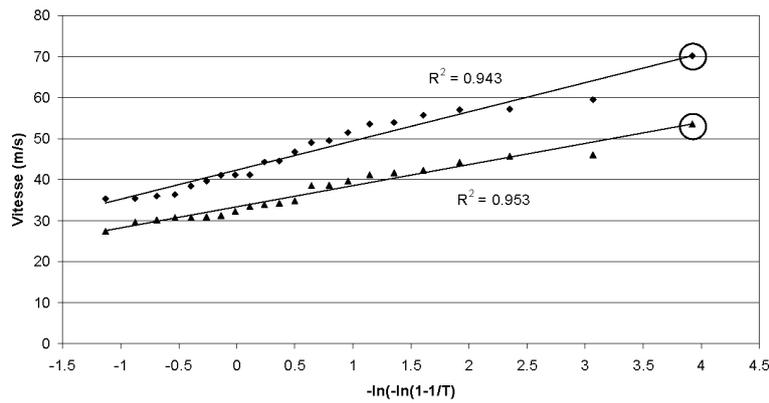
Il n'en va pas de même pour le secteur 75 à 105° au Chasseral (Figures 6 et 7) où la distribution est moins régulière selon la double loi exponentielle de Gumbel, notamment pour les rafales. Les courants soufflant de ce secteur-là sont plus rares et plus irréguliers. Ainsi, on a mesuré des rafales nettement plus élevées (51-52 m/s) pour ce secteur lors de 2 épisodes survenus durant 2 années différentes. De telles rafales pour ce secteur ne sont pas impossibles à cet endroit. Ces 2 valeurs très élevées influencent davantage les analyses de Gumbel à l'échelle annuelle que mensuelle, car le nombre de valeurs retenues est plus petit. Les droites de régression obtenues à partir des valeurs maximales annuelles et mensuelles diffèrent ainsi sensiblement, de même que les rafales cinquantenales extrapolées pour ce secteur-là : ces dernières atteignent respectivement 52 m/s et 44 m/s lorsqu'on les estime à partir des valeurs maximales annuelles et mensuelles. Dans ce cas-là, les rafales cinquantenales extrapolées à partir des valeurs mensuelles sont plus réalistes. De tels cas se rencontrent aussi ailleurs pour certains secteurs.

Mais les séries de mesures du vent comportent également des erreurs avec des vitesses manifestement trop élevées qui influencent quelquefois fortement les

analyses de Gumbel. Les figures 8 et 9 illustrent un tel cas pour le secteur de vent 15 à 45° à St. Gallen. Cette station avait mesuré une rafale de 47.4 m/s pour ce secteur le 19 mai 1982 entre 8h40 et 8h50, alors que la vitesse moyenne pour ces 10 minutes n'atteignait que 1.4 m/s. La rafale mesurée était visiblement erronée, d'autant qu'il s'agissait d'une situation anticyclonique sans orage. D'ailleurs, les autres rafales les plus élevées mesurées pour ce secteur à St. Gallen de 1981 à 2001 ne dépassent pas 15 m/s. Cette rafale de 47.4 m/s n'a pas été enlevée dans la série de mesures de la figure 8, contrairement à la figure 9. Cela se traduit par de grandes différences dans les droites de régression de Gumbel et dans la valeur cinquantennale de la rafale extrapolée pour ce secteur-là. Celle-ci atteint 31.5 m/s avec la valeur erronée du 19 mai 1982 (Figure 8) et seulement 18.1 m/s sans cette valeur erronée (Figure 9). Dans ce cas, celle-ci a pu être supprimée sans problème de la série de mesures pour les raisons citées plus haut.

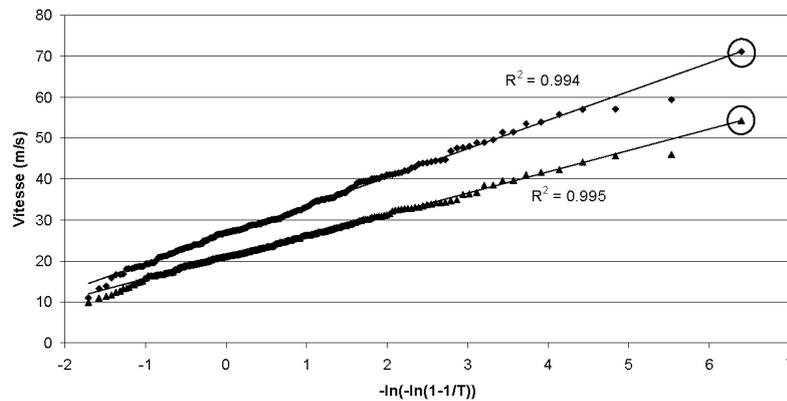
Les données avec de telles vitesses ont été supprimées dans les séries de mesures lorsqu'elles ont coïncidé avec des situations météorologiques peu ventilées et sans orage. Pour d'autres stations, les séries de mesures n'ont pas pu être corrigées, lorsque les vitesses du vent très élevées ont coïncidé avec des situations météorologiques bien ventilées (tempêtes) ou avec des orages. Ce cas est illustré à la figure 10 pour le secteur 345 à 15° au sommet alpin du Corvatsch. La série de mesures pour ce secteur à cet endroit contient 4 valeurs annuelles très élevées, comparativement aux autres années, pour les vitesses moyennes sur 10 minutes (et dans une moindre mesure pour les rafales). Ces valeurs ont coïncidé avec des épisodes avec des vents forts ou tempétueux, mais elles ne sont pas suffisamment élevées pour être considérées comme erronées et être retirées de la série de mesures. Ces valeurs élevées influencent néanmoins fortement les droites de régression de Gumbel et les valeurs cinquantenales extrapolées. La valeur cinquantennale obtenue pour la vitesse moyenne sur 10 minutes pour le secteur 345-15° au Corvatsch semble manifestement trop élevée malgré un coefficient R^2 de 0.754.

Des problèmes analogues ont également été découverts pour certains secteurs de vent pour 3 autres stations sur les sommets ou cols alpins (Moléson, Grimsel, Grand St Bernard) et pour 3 stations dans les vallées alpines (Fey Basse Nendaz, Visp et Samedan-St Moritz). Si on excepte ces cas, les vitesses maximales annuelles ou mensuelles des vents mesurées en Suisse se répartissent de manière régulière le long d'une droite avec la double loi exponentielle de Gumbel pour la majorité des stations et des secteurs de vents étudiés. Les coefficients R^2 dépassent assez souvent 0.9, si bien que ces analyses de Gumbel permettent une bonne estimation des vitesses maximales du vent avec une période de retour plus longue que les séries de mesures disponibles pour la plupart des stations en Suisse.



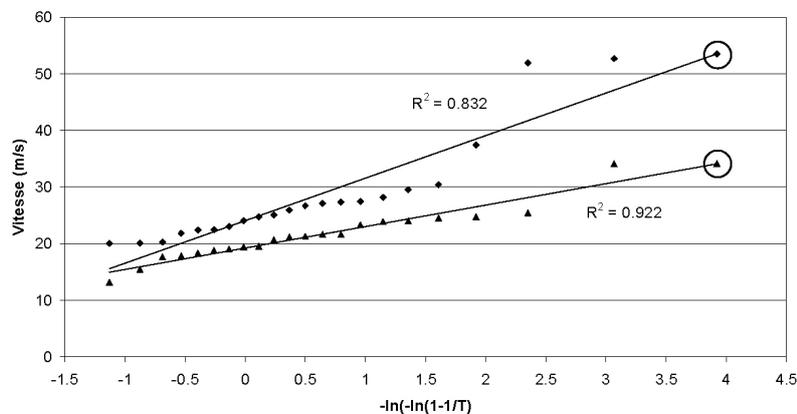
Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantenales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 4. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles de vent mesurées au Chasseral (sommets jurassien) de 1981 à 2001 pour un secteur 285 à 315°



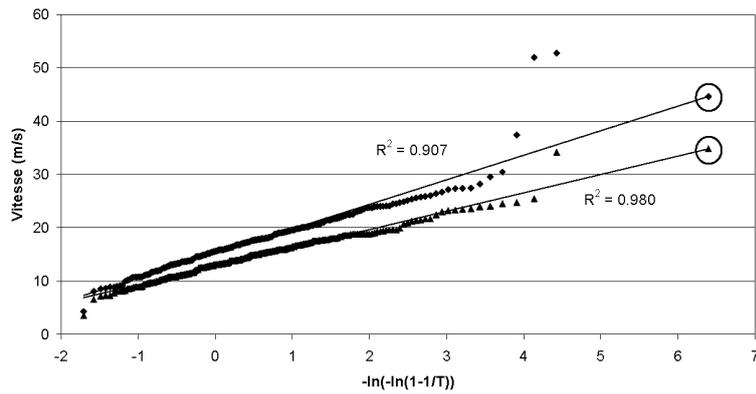
Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantenales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 5. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales mensuelles de vent mesurées au Chasseral (sommets jurassien) de 1981 à 2001 pour un secteur 285 à 315°



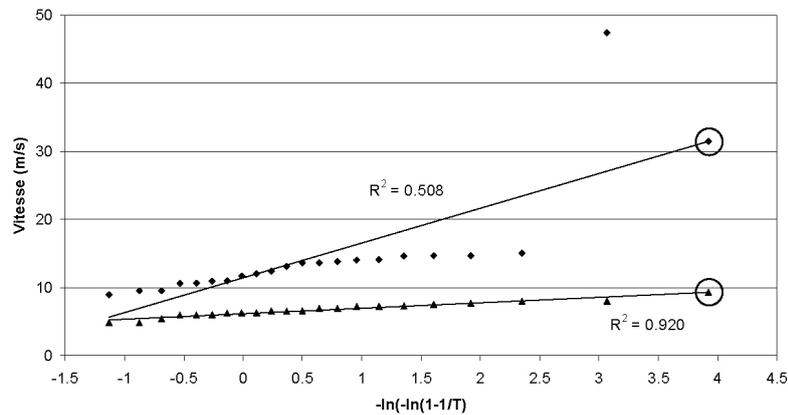
Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantenales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 6. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles de vent mesurées au Chasseral (sommets jurassien) de 1981 à 2001 pour un secteur 75 à 105°



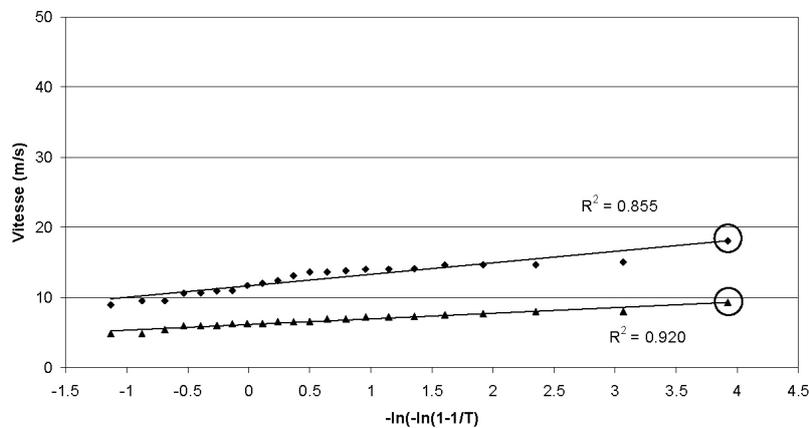
Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantesimales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 7. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales mensuelles de vent mesurées au Chasseral (sommet jurassien) de 1981 à 2001 pour un secteur 75 à 105°



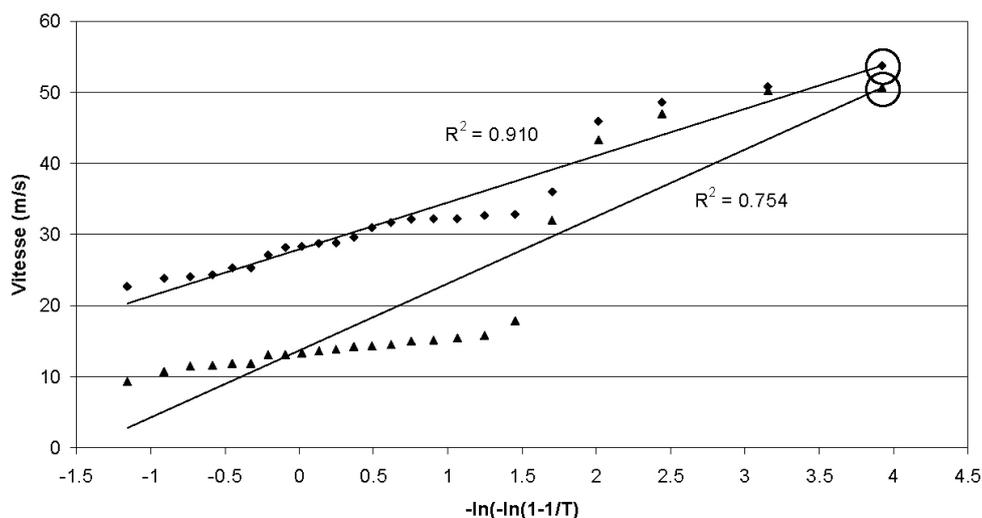
Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantesimales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 8. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles de vent mesurées à St. Gallen de 1981 à 2001 pour un secteur 15 à 45° : valeurs non corrigées



Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantesimales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 9. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles de vent mesurées à St. Gallen de 1981 à 2001 pour un secteur 15 à 45° : valeurs corrigées



Les losanges et la droite du haut correspondent aux rafales, les triangles et la droite du bas aux vitesses moyennes sur 10 minutes du vent. Les cercles correspondent aux valeurs cinquantenales extrapolées pour la rafale et les vitesses moyennes sur 10 minutes.

Figure 10. Analyse statistique de Gumbel effectuée pour les rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales annuelles de vent mesurées au Corvatsch de 1979 à 2001 pour un secteur 345-15°

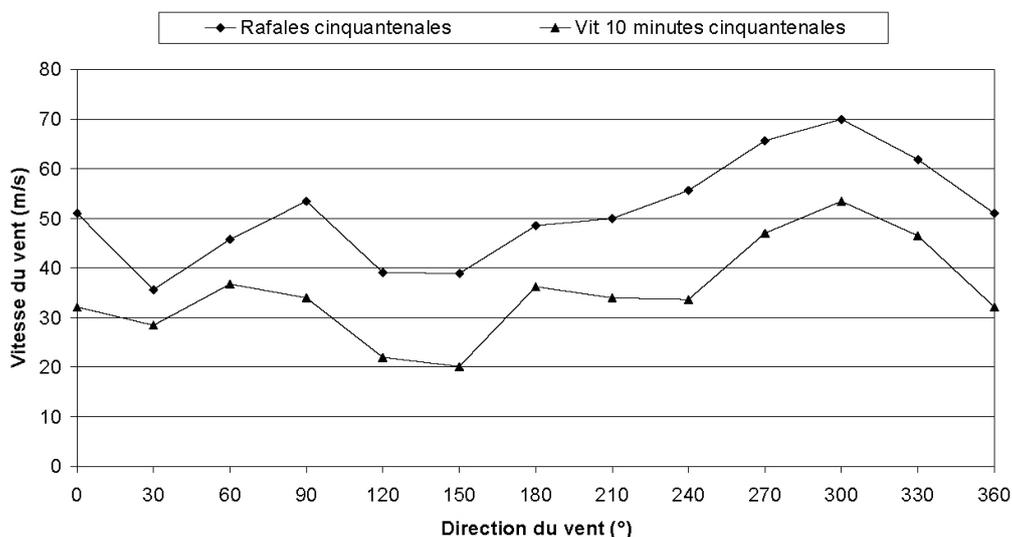


Figure 11. Rafales et vitesses du vent moyennées sur 10 minutes estimées pour une période de retour de 50 ans par secteur de vent de 30° au Chasseral à partir des analyses de Gumbel effectuées pour les valeurs annuelles maximales

La figure 11 présente à titre d'exemple les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes déterminées pour des secteurs de vent de 30° au Chasseral et une période de retour de 50 ans à partir des analyses de Gumbel. À cet endroit, les valeurs cinquantenales les plus élevées se rencontrent pour le secteur 300° (285 à 315°) qui correspond à un vent d'Ouest. Des graphiques semblables ont été dessinés pour les 66 autres stations en Suisse de manière à identifier les secteurs les plus critiques à chaque endroit.

C. Vitesses des vents extrêmes en Suisse déterminées à partir des analyses de Gumbel

La figure 12 mentionne les valeurs les plus élevées des vents extrapolées à partir des mesures *in situ* pour une période de retour de 50 ans pour les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes, tous secteurs confondus. Les valeurs suivies d'un point d'interrogation sont sujettes à caution à cause d'erreurs probables dans les mesures de la vitesse du vent qui n'ont pas pu être corrigées. Les

rafales de vent cinquanteales déterminées à partir des analyses de Gumbel atteignent :

- 60 à 90 m/s sur les reliefs (sommets et cols) alpins et jurassiens les plus exposés,
- 40 à 60 m/s dans les grandes vallées alpines exposées aux tempêtes de foehn (et 25 à 40 m/s dans les autres vallées alpines),
- 35 à 50 m/s sur la moitié Est du Plateau Suisse et dans le Jura (sauf sur les sommets),
- 30 à 40 m/s sur la moitié Ouest du Plateau Suisse, davantage protégée des vents d'Ouest forts par la chaîne du Jura plus élevée.

Les analyses de Gumbel réalisées par secteur de 30° ont permis de déterminer les valeurs cinquanteales des rafales et des vitesses moyennes sur 10 minutes pour les principaux vents régionaux en Suisse. Le tableau 2 récapitule les valeurs obtenues pour ces vents dans les différentes régions de Suisse.

La figure 12 et le tableau 2 révèlent que les vents d'Ouest (SO à NO) sont à l'origine des rafales les plus fortes sur le Plateau, dans plusieurs vallées alpines et sur la plupart des reliefs jurassiens et alpins. Par contre, les rafales les plus violentes sont observées lors des tempêtes de foehn du Sud dans plusieurs vallées du Nord des Alpes, sur certains cols (Gothard) et sommets alpins. Cette tendance apparaît encore plus clairement pour les vitesses moyennées sur 10 minutes. De même, le foehn du Nord génère les rafales les plus violentes dans la

majorité des vallées du Sud des Alpes. La bise se signale par des rafales un peu moins puissantes que les vents d'Ouest ou le foehn du Sud au Nord des Alpes.

À titre comparatif, la figure 13 indique les rafales de vent les plus fortes mesurées durant les ouragans Viviane (26-28.2.1990) et Lothar & Martin (25-28.12.1999). Ils constituent les 2 ouragans les plus violents ayant balayé la Suisse depuis le début des mesures du vent en continu en 1978. Ces rafales restent partout inférieures aux valeurs cinquanteales extrapolées pour tous les secteurs confondus et par vent d'Ouest à partir des analyses de Gumbel, sauf à Fey Basse Nendaz. La pointe mesurée lors de l'ouragan Viviane à cet endroit paraît toutefois trop élevée. Les rafales enregistrées durant l'ouragan Lothar ont presque atteint les valeurs cinquanteales (Figure 12) en quelques endroits au Nord des Alpes (Fahy, Zurich Reckenholz, Berne, Payerne, Laegern et Saentis). À l'opposé, le Sud des Alpes et une partie des Grisons n'ont été que peu touchés par ces 2 ouragans. Globalement, l'ouragan Lothar a généré des rafales plus violentes que Viviane au Nord des Alpes, alors qu'on observe plutôt l'inverse dans les Alpes.

Comme mentionné plus haut, les vents d'Ouest et la bise soufflent généralement d'un même secteur dans les vallées alpines : ils remontent les vallées du Nord des Alpes et redescendent celles du Sud des Alpes en donnant naissance au foehn du Nord. Les courants d'Ouest génèrent des vents extrêmes plus puissants que la bise



Nombres non soulignés : vitesses maximales générées par les vents d'Ouest

Nombres soulignés : vitesses maximales provoquées par le foehn du Sud ou du Nord dans les Alpes.

Figure 12. Vitesses moyennes sur 10 minutes (1^{er} nombre) et rafales maximales du vent en m/s extrapolées pour une période de retour de 50 ans à partir des séries de mesures *in situ*



Figure 13. Rafales de vent maximales en m/s mesurées durant les ouragans Viviane (à gauche) et Lothar & Martin (à droite)

dans les vallées du Nord des Alpes. Pour cette raison, le tableau 2 ne contient que les valeurs extrêmes pour les vents d'Ouest (et le foehn du Sud) dans ces vallées. Par situation avec du foehn du Sud au Nord des Alpes, les courants remontent les vallées du Sud des Alpes et ils peuvent atteindre des vitesses très élevées qui sont mentionnées dans la colonne « foehn du Sud » du tableau 2. Ce vent chaud n'est par contre jamais perçu à basse altitude sur la moitié Ouest du Plateau.

Nous avons également calculé les rapports entre les valeurs cinquantenales des rafales et des vitesses moyennes sur 10 minutes pour les principaux vents en Suisse (Tableau 2, en bas). Ces rapports sont globalement les plus bas sur les sommets jurassiens et alpins, notamment pour la bise. Les rafales les plus fortes sur ces sommets (et cols alpins) surviennent en cas de tempêtes avec des vitesses moyennes des flux également très élevées sur 10 minutes. Ces situations coïncident avec un gradient de pression important et des vents tempétueux sur la Suisse. Ils soufflent plus faiblement et plus irrégulièrement sur le Plateau et dans les vallées alpines à cause de la topographie des Alpes et du Jura qui accroît la rugosité et le frottement près du sol. Cela se traduit par des rapports entre les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantenales plus importants, notamment pour les vents d'Ouest et le foehn.

La bise correspond souvent à une advection froide du Nord à Est qui est mieux ressentie jusqu'à basse

altitude que les autres courants lorsqu'elle souffle fortement, en raison de la plus grande densité de l'air froid. L'écoulement est moins turbulent pour la bise à basse altitude, notamment sur la moitié Ouest du Plateau davantage exposée à ce vent froid que la moitié Est. Le rapprochement des chaînes du Jura et des Alpes vers le Sud-Ouest favorise une accélération de ce vent sur le Plateau en allant vers l'Ouest. Il en résulte des rapports entre les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantenales relativement bas pour la bise sur le Plateau, notamment dans la moitié Ouest, comparativement aux autres flux.

Le foehn est un courant chaud et sec qui a plus de peine à souffler jusqu'au fond des vallées alpines et sur le Plateau, en raison de la densité plus faible de cet air chaud. Il a plus de facilité à plonger dans une grande vallée alpine que dans une petite vallée étroite. En cas de tempête, il souffle avec une force plus régulière dans les grandes vallées alpines et le rapport entre les rafales et les vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantenales varie entre 1.6 et 2. Ce rapport oscille entre 2 et 2.4 dans les vallées alpines plus petites et étroites où le foehn souffle plus irrégulièrement.

Les vents d'Ouest les plus forts en Suisse se rencontrent par temps perturbé et ils peuvent encore se renforcer au passage d'un front froid lorsque des nuages de convection produisent des orages, des grains et de brusques rafales de vent. Les vents d'Ouest soufflent ainsi avec une force moins constante que la bise, notamment à basse altitude, et cela se traduit par des rapports entre les rafales et

Tableau 2. Rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes maximales en m/s extrapolées pour une période de retour de 50 ans pour les principaux vents en Suisse*Rafales cinquantenales*

Région	Vent d'Ouest	Bise	Foehn du Sud	Foehn du Nord
Sommets du Jura	60-70 m/s	50-55 m/s	50-55 m/s	-
Sommets et cols alpins	65-85 m/s	30-55 m/s	50-75 m/s	-
Plateau Ouest	30-40 m/s	25-31 m/s	-	-
Plateau Est	35-50 m/s	20-28 m/s	20-35 m/s	-
Vallées Nord des Alpes	30-55 m/s	-	30-46 m/s	-
Vallées Sud des Alpes	-	-	20-40 m/s	28-40 m/s

Vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantenales

Région	Vent d'Ouest	Bise	Foehn du Sud	Foehn du Nord
Sommets du Jura	45-53 m/s	35-40 m/s	34-36 m/s	-
Sommets et cols alpins	42-62 m/s	25-36 m/s	30-55 m/s	-
Plateau Ouest	14-23 m/s	11-20 m/s	-	-
Plateau Est	19-26 m/s	9-15 m/s	11-20 m/s	-
Vallées Nord des Alpes	16-22 m/s	-	15-28 m/s	-
Vallées Sud des Alpes	-	-	10-20 m/s	12-21 m/s

Rapport entre rafales et vitesses moyennes sur 10 minutes cinquantenales

Région	Vent d'Ouest	Bise	Foehn du Sud	Foehn du Nord
Sommets du Jura	1.3-1.4	1.4-1.5	1.3-1.7	-
Sommets et cols alpins	1.3-1.9	1.3-1.5	1.3-1.8	-
Plateau Ouest	1.6-2.3	1.5-1.7	-	-
Plateau Est	1.6-2.3	1.6-2.1	1.6-2.0	-
Vallées Nord des Alpes	1.7-2.8	-	1.6-2.4	-
Vallées Sud des Alpes	-	-	1.8-2.8	1.7-2.2

les vitesses moyennes sur 10 minutes plus grands. Ces rapports sont même en moyenne un peu plus élevés que pour le foehn dans les vallées alpines.

III. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES VENTS EXTRÊMES

Les analyses statistiques de Gumbel ne permettent de connaître l'intensité maximale des vents extrêmes qu'en 67 endroits isolés du pays. Cette intensité varie sensiblement à l'échelle locale et régionale dans une topographie tourmentée comme celle de la Suisse, si bien qu'il n'est guère possible de l'extrapoler empiriquement en d'autres endroits comme dans les pays peu accidentés. En outre, les mesures du vent ne sont pas toujours faites à une hauteur standard de 10 mètres, ce qui peut influencer sensiblement la vitesse des flux. Des modélisations tridimensionnelles des écoulements ont donc été réalisées à l'aide du modèle non hydrostatique LASEN-CFX (Montavon, 1998a et

1998b) à une échelle horizontale de 5 km, puis de 2 km, de manière à déterminer les vitesses de vent extrêmes pour l'ensemble du territoire national à une échelle aussi fine que possible.

A. Méthode

Ce modèle numérique, décrit en détail dans Montavon (1998a et 1998b), permet de calculer les champs de vent, de turbulence et de température dans une topographie accidentée pour une situation météorologique particulière en résolvant les équations de Navier-Stokes avec un modèle de turbulence ($k-\epsilon$) et l'approximation de Boussinesq. Les performances du modèle LASEN-CFX ont été contrôlées à l'échelle régionale dans le cadre de recherches menées sur l'évaluation du potentiel éolien dans le Jura suisse (Montavon, 1998a ; Fallo *et al.*, 2002). Il a également permis de simuler avec succès un épisode tempétueux de chinook dans le Colorado aux USA, soit l'équivalent du foehn dans les Montagnes Rocheuses (Montavon, 1998b).

Pour déterminer les paramètres de base (conditions initiales et aux limites) à introduire dans ce modèle, quelques épisodes tempétueux ont été analysés pour les différents vents régionaux en Suisse. Ces analyses ont notamment permis de déterminer la vitesse des vents en altitude, les gradients verticaux de température moyens et la stabilité de l'air dans la troposphère au-dessus de la Suisse à introduire dans le modèle LASEN-CFX pour calculer les champs de vent pour différents secteurs. Ont alors été recherchés les secteurs et les vitesses les plus critiques susceptibles de générer les rafales de vent extrêmes en Suisse avec une durée de retour d'au moins 50 ans. Les résultats des modélisations ont ensuite été confrontés aux vitesses extrêmes du vent extrapolées pour une période de retour de 50 ans à partir des mesures *in situ* à quelques endroits du pays.

B. Résultats des modélisations numériques

Les figures 14 et 15 présentent à titre d'exemple les champs de vents extrêmes calculés par le modèle LASEN-CFX pour une tempête d'Ouest et de foehn du Sud dans les Alpes. Pour des questions de lisibilité, les vecteurs « vent » n'ont été dessinés que tous les 10 km, alors qu'on dispose d'une valeur tous les 2 km. Un contraste important apparaît par vent d'Ouest entre le Nord des Alpes très exposé et le Sud des Alpes relativement abrité par la chaîne alpine. Cela se traduit par des courants plus faibles avec des directions plus variables (Figure 14). Un tel contraste apparaît également sur le terrain pour les tempêtes d'Ouest, en particulier pour les ouragans Viviane et Lothar (Figure 13).

Les résultats obtenus par le modèle CFX-LASEN pour le foehn du Sud contiennent plus d'approximations (Figure 15), avec notamment des vitesses de vents très élevées sur le Plateau et dans certaines vallées alpines (Rhône en Valais et Rhin). Cela peut résulter d'une simulation imprécise de la stabilité de l'air dans les basses couches de l'atmosphère. Par situation de foehn, une couche d'air plus froid issu d'une situation météorologique précédente recouvre le Plateau et les vallées alpines. Le courant chaud du foehn plonge dans cet air plus froid et il voit sa force diminuer près du sol. Dans certains cas et endroits, le foehn glisse au-dessus de cette couche d'air plus froid sans parvenir à la balayer. Ce phénomène se produit souvent sur le Plateau, surtout en hiver, et il est mal reproduit ici.

Les champs de vent calculés par le modèle LASEN-CFX montrent également que les tempêtes d'Ouest sont à l'origine des vents les plus intenses sur le Plateau Suisse, le Jura et une partie des reliefs alpins. De même, les vents les plus intenses se rencontrent pour les tempêtes de foehn (du Sud ou du Nord) dans la majorité des vallées alpines. La figure 16 présente les vitesses des flux les plus élevées calculées par le modèle LASEN-CFX à environ 50 m/sol, tous secteurs de vent confondus, avec une valeur tous les 2 km à l'échelle horizontale. Ces vitesses varient le plus souvent entre 30 et 40 m/s sur le Jura, le Plateau et sur certains reliefs alpins, alors qu'elles tombent entre 20 et 30 m/s dans la plupart des régions alpines, en particulier au Sud des Alpes.

La figure 17 compare les vitesses maximales calculées par le modèle LASEN-CFX pour le secteur de vent le

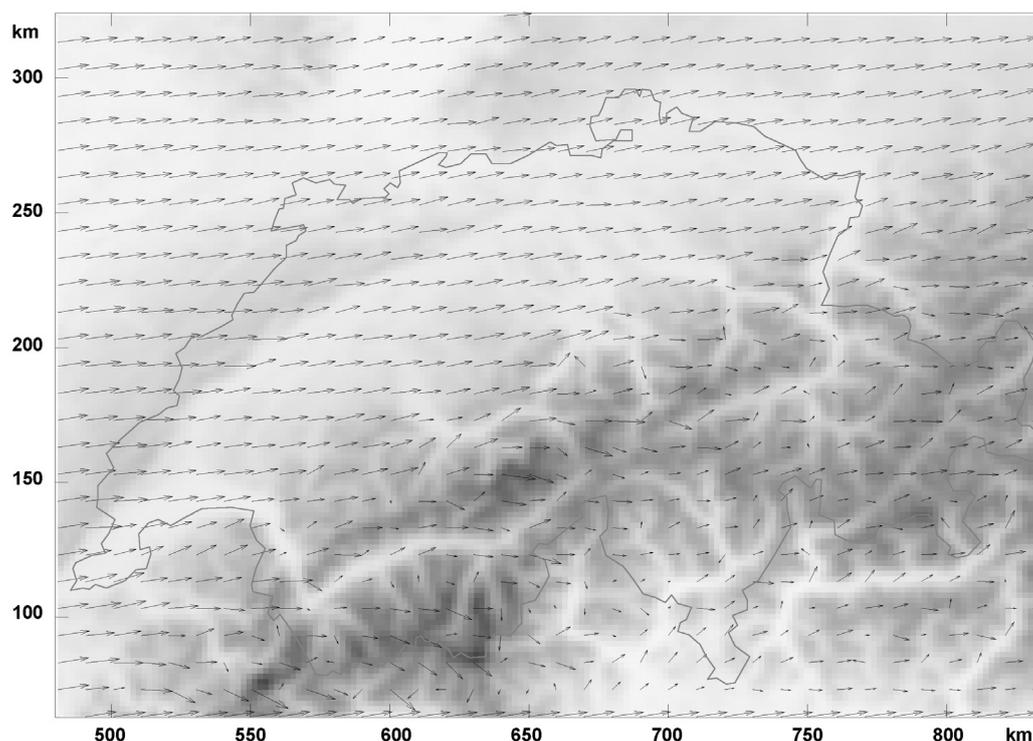


Figure 14. Champ de vents extrêmes calculé par le modèle numérique CFX LASEN pour un vent de secteur Ouest

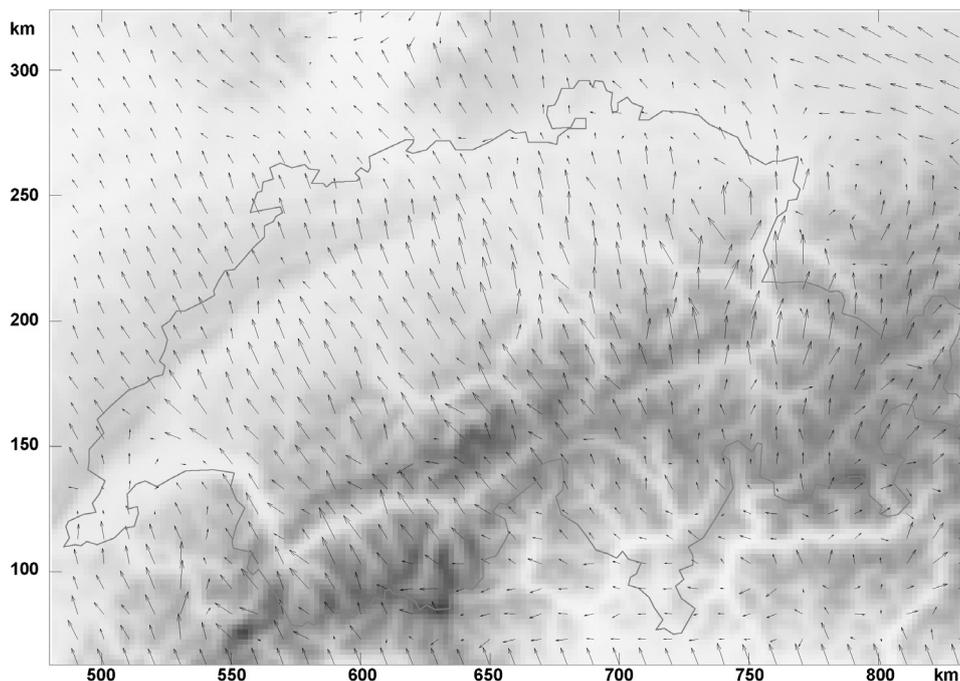


Figure 15. Champ de vents extrêmes calculé par le modèle numérique CFX LASSEN pour un vent de secteur Sud

plus critique avec les valeurs cinquantenales extrapolées pour les rafales (Rafale mes 50 ans) et les vitesses moyennes sur 10 minutes (Vit 10 min mes 50 ans) à partir des mesures *in situ* à 67 endroits du pays, tous secteurs de vent confondus. Les conditions initiales déterminées à partir d'analyses météorologiques de quelques situations tempétueuses et introduites dans le modèle se réfèrent plutôt à des vitesses du vent moyennes sur 10 minutes qu'à des rafales instantanées. D'une manière générale, les vitesses du vent maximales sur le modèle LASSEN-CFX sont :

- supérieures aux vitesses moyennes sur 10 minutes et légèrement inférieures aux rafales cinquantenales sur le Plateau Suisse,
- légèrement supérieures aux vitesses moyennes sur 10 minutes et inférieures aux rafales cinquantenales dans les vallées alpines,
- le plus souvent inférieures aux vitesses moyennes sur 10 minutes (et nettement inférieures aux rafales cinquantenales) sur les reliefs alpins et jurassiens.

Le modèle LASSEN-CFX tend à sous-estimer la force des vents extrêmes sur les reliefs jurassiens et alpins, comparativement au Plateau Suisse et dans les vallées alpines. Les approximations du modèle peuvent avoir plusieurs origines. Une résolution horizontale de 2 km est probablement encore trop faible pour reproduire efficacement tous les effets d'une topographie accidentée sur les vents forts à l'échelle locale, en particulier sur les sommets et les cols alpins. Des calculs effectués pour la région de Zermatt (Alpes valaisannes) montrent qu'il est indispensable de disposer d'une résolution horizontale de 250 m pour bien prendre en compte ces effets de la topographie. Mais une résolution plus fine

pour une surface aussi grande que la Suisse demande une grande puissance de calculs pas encore disponible actuellement.

Le modèle LASSEN-CFX semble favoriser des accélérations d'air sur certains versants sous le vent et le développement d'ondes de reliefs manifestement trop importantes pour certaines situations météorologiques, en particulier celles du Sud-Est à Sud et du Nord-Ouest à Nord avec du foehn du Sud ou du Nord dans les Alpes (Figure 15). Il en résulte des vitesses du vent très élevées en certains endroits du modèle (Sud-Ouest et centre de la Suisse) qu'on ne retrouve en principe pas dans la nature pour ces situations-là. Mais ces endroits sont souvent dépourvus de mesures sur le terrain. De tels effets résultent de la stabilité de l'air qui est un paramètre souvent difficile à reproduire avec les modèles. La carte finale (Figure 16) contient donc quelques zones avec des vitesses trop élevées au pied de certains reliefs et sur les bords du modèle.

C. Calculs d'autres paramètres extrêmes

Malgré ces approximations, une carte des pressions dynamiques (P_{dyn}) extrêmes a pu être établie à partir des vents extrêmes ainsi déterminés pour l'ensemble de la Suisse (Figure 18) à partir de la relation suivante :

$$P_{dyn} = (\rho * raf^2)/2 \text{ avec } raf = \text{rafale du vent cinquantennale et } \rho = \text{densité de l'air}$$

La pression dynamique extrême est proportionnelle à la vitesse du vent extrême au carré, ce qui augmente le risque d'erreur si cette valeur est mal estimée. Pour limiter ce risque, les pressions dynamiques extrêmes retenues pour le dimensionnement des constructions face au vent (charge prépondérante) sont multipliées par un facteur

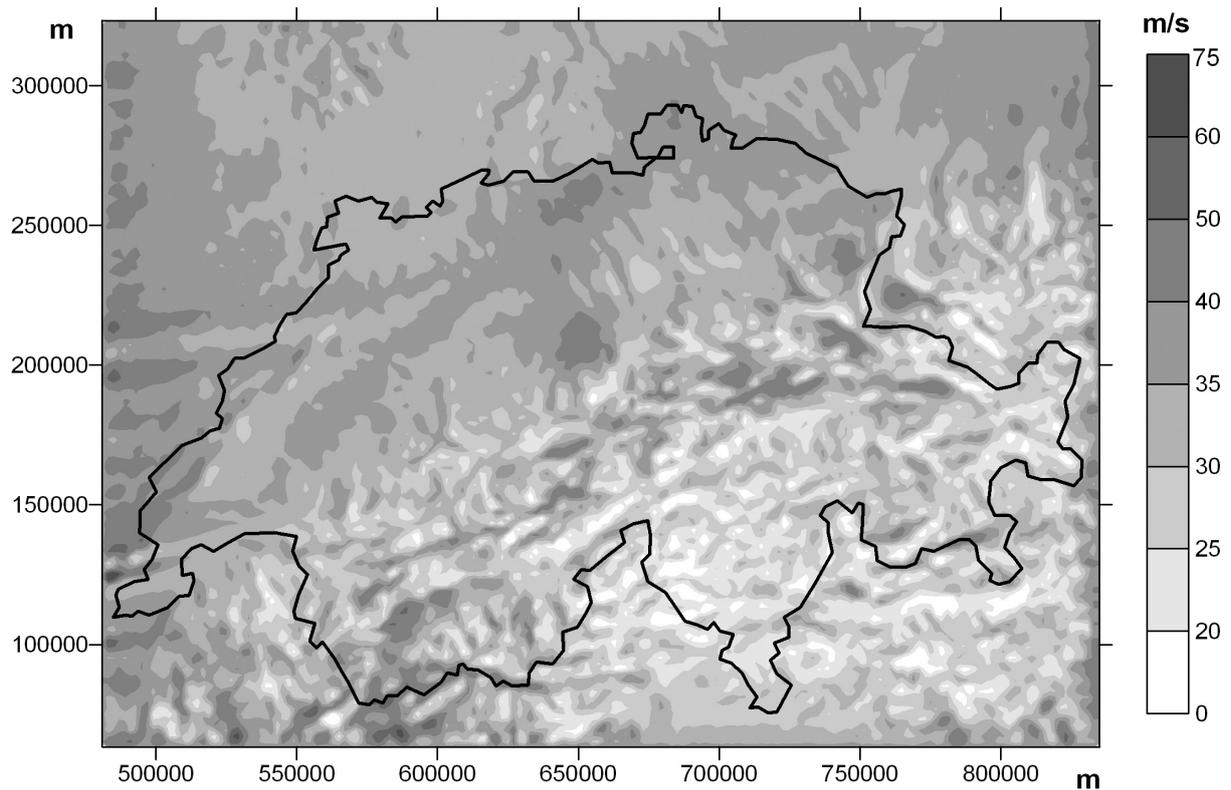


Figure 16. Vitesses maximales des vents calculées par le modèle LASEN-CFX en Suisse avec une résolution horizontale de 2 km, tous secteurs confondus

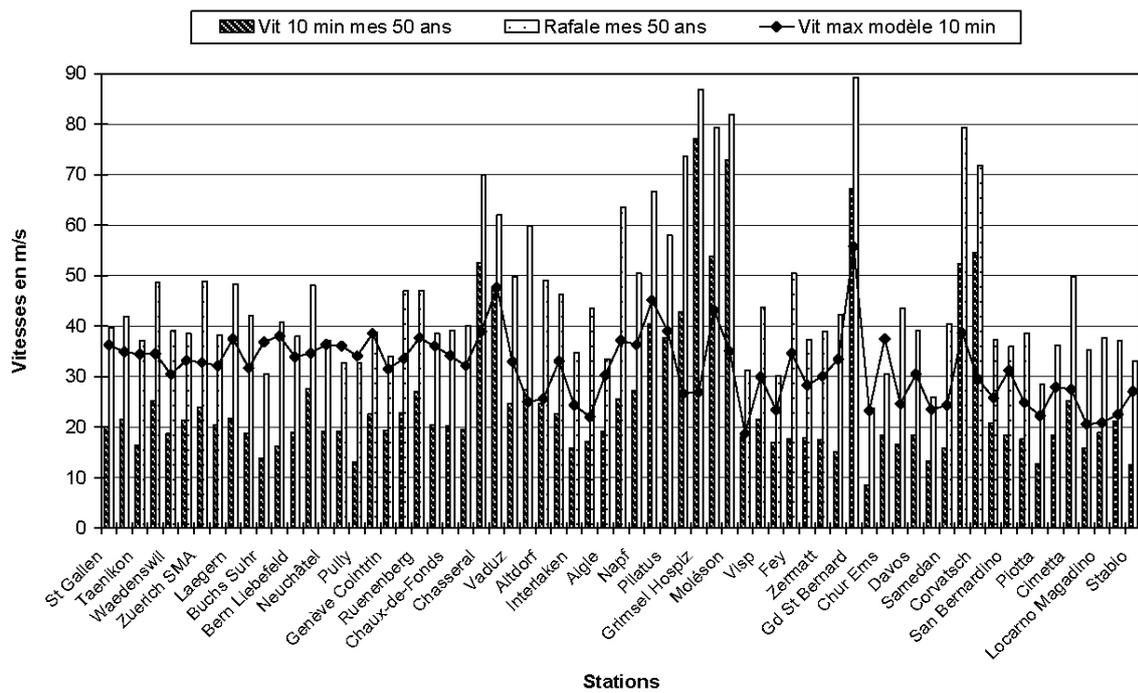


Figure 17. Vitesses maximales calculées par le modèle LASEN-CFX (Vit max modèle 10 min), vitesses moyennes sur 10 minutes (Vit 10 min mes 50 ans) et rafales (Rafale mes 50 ans) maximales extrapolées pour une période de retour de 50 ans à partir des mesures *in situ* à 67 endroits de la Suisse

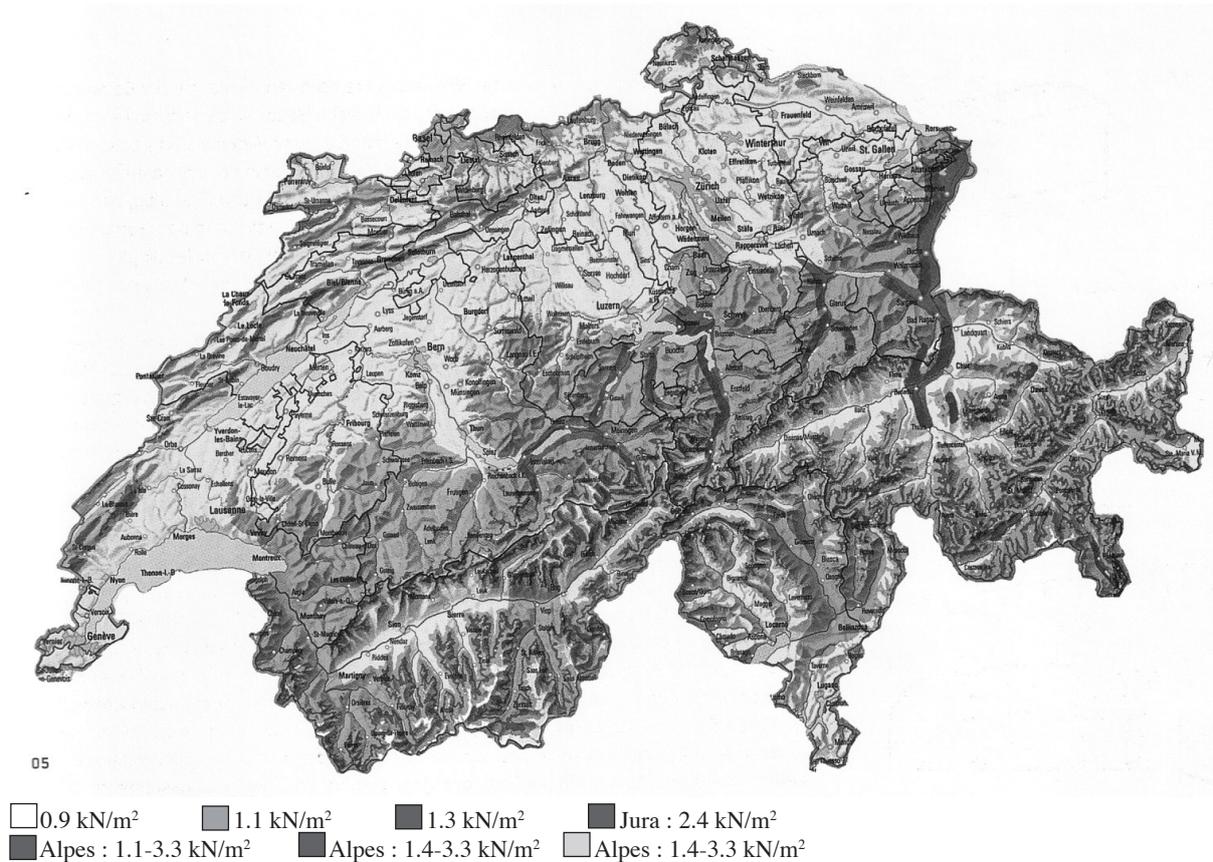


Figure 18. Carte des pressions dynamiques extrêmes en kN/m² calculées pour la Suisse (version couleur, p. 164).

de charge de 1.5. La figure 18 montre que les pressions dynamiques extrêmes sont environ 3 fois plus élevées sur les sommets alpins (3.3 kN/m²) qu'à basse altitude sur le Plateau Suisse (0.9 à 1.1 kN/m²). On observe aussi des pressions dynamiques un peu plus élevées (1.3 kN/m²) dans les grandes vallées alpines exposées aux tempêtes de foehn que sur le Plateau Suisse. Une telle carte est précieuse pour les architectes et les ingénieurs, car elle permet de déterminer avec précision le dimensionnement des constructions à retenir face aux vents extrêmes pour chaque région du pays : elle sert de référence dans le cadre de la norme SIA 261 (SIA, 2003).

Les champs de vents extrêmes calculés par le modèle CFX-LASEN ont également permis de calculer les précipitations extrêmes en Suisse à une échelle horizontale de 2 km (Audouard *et al.*, 2006). Ce modèle peut aussi être utilisé pour des études de pollution de l'air (Fallot *et al.*, 1993) ou pour évaluer le potentiel éolien et la productivité d'une éolienne dans une topographie accidentée (Fallot *et al.*, 2002).

CONCLUSION

Les analyses statistiques de Gumbel effectuées sur des séries de mesures de 20 à 25 ans ont permis de déterminer les vents extrêmes avec une période de retour de 50 ans à 67 endroits de la Suisse pour plusieurs courants régionaux. Ces analyses aboutissent à de bons résultats

pour les vents extrêmes lorsque les séries de mesures *in situ* ne contiennent pas trop de valeurs erronées ou suspectes impossibles à corriger.

Une carte des vents extrêmes pour l'ensemble du territoire national a été élaborée à une résolution horizontale de 2 km à partir de modélisations tridimensionnelles des écoulements effectuées pour quelques secteurs. Mais ces modélisations tendent à sous-estimer l'intensité des vents extrêmes sur les reliefs jurassiens et alpins où on mesure habituellement les rafales les plus violentes. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer certains défauts de ces modélisations.

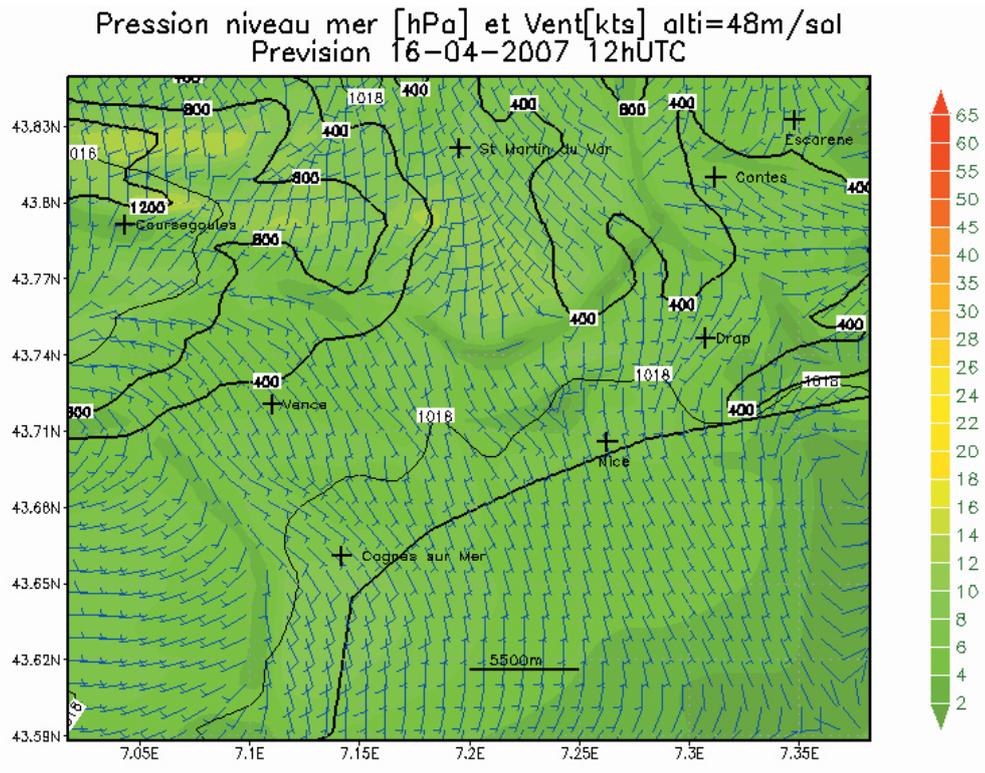
D'autre part, la structure des écoulements dans une topographie accidentée étant très complexe ; cela ne facilite pas la recherche des secteurs et des vitesses les plus critiques pour les vents au sol par la modélisation. Une augmentation de la vitesse des flux en altitude ne se traduit pas toujours par un renforcement des courants près du sol. Un changement dans la vitesse des vents en altitude ou dans la stabilité de l'air peut renforcer la turbulence et affaiblir les écoulements dans les basses couches de l'atmosphère. Des calculs et des réglages devront encore être entrepris pour remédier aux imprécisions des modélisations et pour rechercher les secteurs et les vitesses du vent les plus critiques en altitude au niveau des courants près du sol, aussi bien sur les sommets qu'au fond des vallées et des dépressions (Plateau Suisse).

BIBLIOGRAPHIE

- AUDOUARD A., HERTIG J.-A. & FALLOT J.-M. 2006. Modélisation des précipitations extrêmes pour la Suisse. Actes du 19^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Epernay, 6-9.9.2006, pp. 83-88.
- BENISTON M., GOYETTE S., STEPHENSON D.B., CHRISTENSEN O.B., FREI C., SCHÖLL R., HALSNAES K., HOLT T., PALUTIKOF J., JYLHÄ K., KOFFI B., SEMMLER T. & WOTH K. 2007. Future extreme events in Europe climate : an exploration of regional climate model projection. *Climatic Change*, 81 (s.1), pp. 71-95.
- EHINGER J., HERTIG J.-A., ALEXANDROU C., BERNEY M. & CHRISTINAT M.-O. 1990. *Analyse de l'influence de la topographie sur les conditions d'exposition des bâtiments*. Rapport LASEN n° 531.109, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Fonds National Suisse de Recherche Scientifique (FNRS). Bourse n° 20-5189.86, 204 p.
- EUROCODE. 2003. *Eurocode 1 - Actions sur les structures - Partie 1-4 : Actions générales-Actions du vent*. CEN/TC 250/SC1/N368F, prEN 1991-1-4-6 : 2002(F), 156 p.
- FALLOT J.-M., HERTIG J.-A., EFRANCEY N. & TORCHE C. 1993. Études d'impact atmosphérique et méthodologie pour le cas de projets dans une topographie tourmentée. *Cahiers de l'Institut de Géographie de Fribourg « UKPIK »* n° 9, pp. 48-73.
- FALLOT J.-M., HERTIG J.-A., HUG C. & GOULPIÉ P. 2002. Évaluation du potentiel éolien dans le Jura Suisse. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 14, pp. 311-318.
- FALLOT J.-M., HERTIG J.-A., AUDOUARD A. & BART P. 2007. Détermination des vents extrêmes en Suisse. Actes du 20^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Carthage, 5-8.9.2007, pp. 240-245.
- GOYETTE S., BRASSEUR O. & BENISTON M. 2003. Application of a new wind gust parametrization : Multiscale case studies performed with the Canadian regional climate model. *Journal of Geophysical Research*, 108, pp. 4371-4389.
- GUMBEL E.J. 1958. *Statistics of extremes*. Columbia University press.
- HERTIG J.-A. 2003. Some indirect scientific paternity of Alan G. Davenport. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, pp. 1329-1347.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007. The physical science basis. Working Group I Contribution to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge (UK) : Cambridge University Press, 996 p.
- JUNGO P., GOYETTE S. & BENISTON M. 2002. Daily wind gust speed probabilities over Switzerland according to three types of synoptic circulation. *International Journal of Climatology*, 22, pp. 485-499.
- MONTAVON C. 1998a. *Simulation of atmospheric flows over complex terrain for wind power potential assessment*. Thèse n°1855, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 153 p.
- MONTAVON C. 1998b. Validation of a non-hydrostatic numerical model to simulate stratified wind fields over complex topography. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74-76, pp. 273-282.
- PALUTIKOF J.P., BRABSON B.B., LISTER D.H. & ADOCK S.T. 1999. A review method to calculate extreme wind speeds. *Meteorological Applications*, 6, pp. 119-132.
- SIA. 2003. *Norme Suisse 505 261. SIA 261 : 2003 Bâtiment, génie civil. Actions sur les structures porteuses*. Société suisse des Ingénieurs et des Architectes (SIA), Zurich, 104 p.
- SCHIESSER H.H., PFISTER CH. & BADER J., 1997. Winter storms in Switzerland north of the Alps 1864/65 – 1993/1994. *Theoretical and Applied Climatology*, 58, pp. 1-19.
- SMITS A., KLEIN TANK M.G. & KOENNEN P. 2005. Trends in storminess over the Netherlands, 1962-2002. *International Journal of Climatology*, 25, pp. 1331-1344.
- WEGGEL J.R. 1999. Maximum daily wind gusts related to mean daily wind speed. *Journal of Structural Engineering* (April), pp. 465-468.
- YAN Z., BATE S., CHANDLER R.E, ISHAM V. & WHEATER H. 2002. An analysis of daily maximum wind speed in northwestern Europe using generalized linear models. *Journal of Climate*, 15, pp. 2073-2088.

Adresse des auteurs :

Jean-Michel FALLOT,
Institut de Géographie, Université de Lausanne,
CH-1015 Lausanne
Jean-Michel.Fallot@unil.ch
Jacques-André HERTIG,
Hertig & Lador SA, Grand Rue,
CH-1176 St Livres
hertig@hetl.ch



Source : Calculs et réalisation : C. Yohia.

Figure 13. Idem fig. 12, mais mailles de 500m pour le calcul, et mailles de 1km pour l'affichage (P. Carrega)

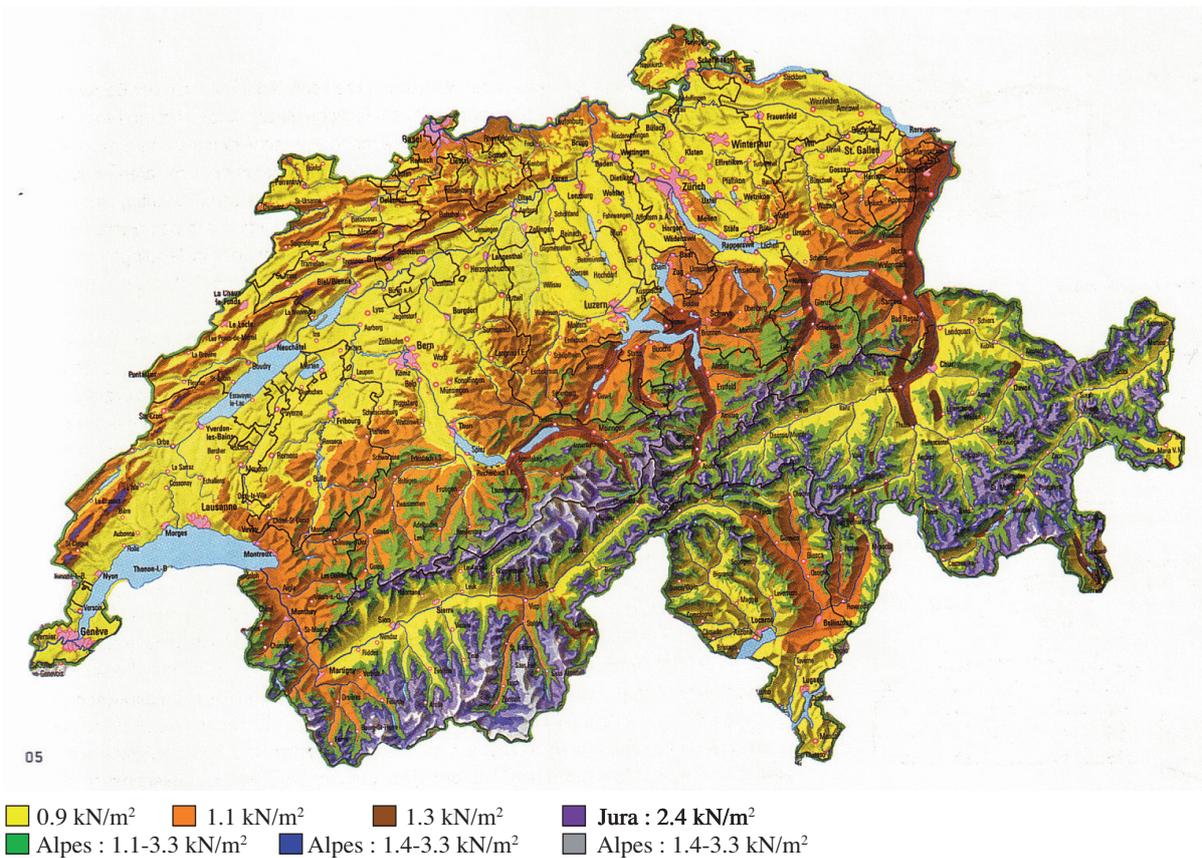


Figure 18. Carte des pressions dynamiques extrêmes en kN/m² calculées pour la Suisse (J.-M. Fallot)