

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 104 (1978)  
**Heft:** 19

**Artikel:** Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds: vagues de bise sur le Léman (Petit-Lac) - Campagne de mesures 1974-1978  
**Autor:** Bruschin, Jacques / Schneiter, Louis  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73551>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Caractéristiques des vagues dans les lacs profonds<sup>1</sup>

## Vagues de bise sur le Léman (Petit-Lac) — Campagne de mesures 1974-1978

par JACQUES BRUSCHIN et LOUIS SCHNEITER

*L'année 1978 marque le 125<sup>e</sup> anniversaire de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, souligné par diverses manifestations. On se souviendra que notre périodique lui a consacré son numéro 12 du 8 juin dernier.*

*C'est dire que l'Ecole peut s'enorgueillir d'une longue tradition dans la formation des ingénieurs, spécialement du génie civil. Cette vocation d'enseignement ne peut être dissociée d'un effort soutenu dans le domaine de la recherche. Le Bulletin technique a souvent eu l'occasion de présenter les travaux des chercheurs de l'EPFL, entre autres ceux effectués au sein du Laboratoire d'hydraulique, consacrés notamment à une meilleure connaissance des phénomènes qui caractérisent un plan d'eau comme le lac Léman.*

*Nous avons un plaisir particulier à relever que le Laboratoire d'hydraulique de l'EPFL célèbre également un anniversaire, puisqu'il a été créé voilà cinquante ans. Le Bulletin technique est heureux de s'associer à ce jubilé par la publication qui suit et présente ses félicitations pour les travaux remarquables fournis par le Laboratoire durant ce demi-siècle; il souhaite à ses responsables et à ses collaborateurs plein succès dans leurs tâches futures, toujours au service de la collectivité. Pour tenir mieux compte des exigences de notre environnement, nous devons sans cesse approfondir les connaissances que nous en avons. Parmi les éléments de cet environnement, les cours et les plans d'eaux jouent un rôle essentiel dans la vie de l'homme. C'est donc une tâche également essentielle qui incombe aux chercheurs du Laboratoire d'hydraulique.*

Rédaction.

### 1. Introduction

Nous avons fait état dans nos publications précédentes des préoccupations et du travail effectué au Laboratoire d'hydraulique dans le domaine de l'hydraulique maritime et lacustre en général et plus spécialement, ces dernières années, dans celui de la prévision des vagues en mer et dans les lacs. En 1974 nous avons conclu [1, 2]<sup>2</sup> à la possibilité d'utiliser les modèles de prévision élaborés primitivement pour l'Atlantique Nord, adaptés par la suite, compte tenu du confinement du plan d'eau aux lacs profonds [3, 4, 5]. Une vérification expérimentale s'imposait à nos yeux pour deux raisons au moins :

- aucune observation systématique des vagues dans les lacs de tailles et profondeurs comparables aux grands lacs suisses n'avait encore été faite ;
- des mesures de vent à 10 ou 19,5 m du plan d'eau (hauteurs normalisées) sur ou pour le moins au voisinage immédiat de nos lacs, n'ont jamais été faites, à notre connaissance, dans le cadre du réseau météorologique suisse. Il n'était donc pas possible de relier utilement aux vents générateurs les quelques rares observations fiables relatives aux seules vagues.

Nous devons dès lors trouver un site approprié à l'installation d'une station de mesure. Son adéquation aux buts poursuivis était, sans doute possible, un élément déter-

minant du succès de l'opération. Comme cela arrive souvent, il nous a fallu toutefois accepter un compromis entre des exigences telles que géométrie relativement simple du plan d'eau, bathymétrie connue et caractéristique, existence d'un vent très nettement dominant sur un fetch suffisant d'une part et distance raisonnable de Lausanne, accès facile, courant électrique sur place, intérêt et collaboration des autorités locales, etc., d'autre part. Si le lac de Neuchâtel était certainement une alternative tentante, la présence d'une station météorologique active depuis 1950 pratiquement en bout de fetch (mais à 54 m au-dessus du lac), des conditions matérielles très favorables et l'appui assuré des pouvoirs publics pour l'installation et le service de la station, nous ont amenés à Genève.

Le Petit-Lac, avec sa forme quasi rectangulaire, ses fonds en cuvette qui atteignent assez rapidement des profondeurs de 50 m, est balayé sur toute sa longueur de 22 km par un seul vent générateur de fortes vagues sur tout le plan d'eau — la bise. Seul inconvénient important au premier abord : le fetch de bise déborde très largement le Petit-Lac vers une région du Léman où les conditions d'écoulement du vent sont beaucoup plus complexes, alors que les observations y sont plutôt sporadiques.

Le choix de principe effectué, il s'agissait de déterminer l'endroit précis d'implantation et l'équipement de la station de mesure, décisions liées entre elles et conditionnées, cela va de soi, par les moyens financiers, fonction eux, entre autres, du but limité de cette opération.

<sup>1</sup> Summary on p. 8 — Zusammenfassung auf S. 8.

<sup>2</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

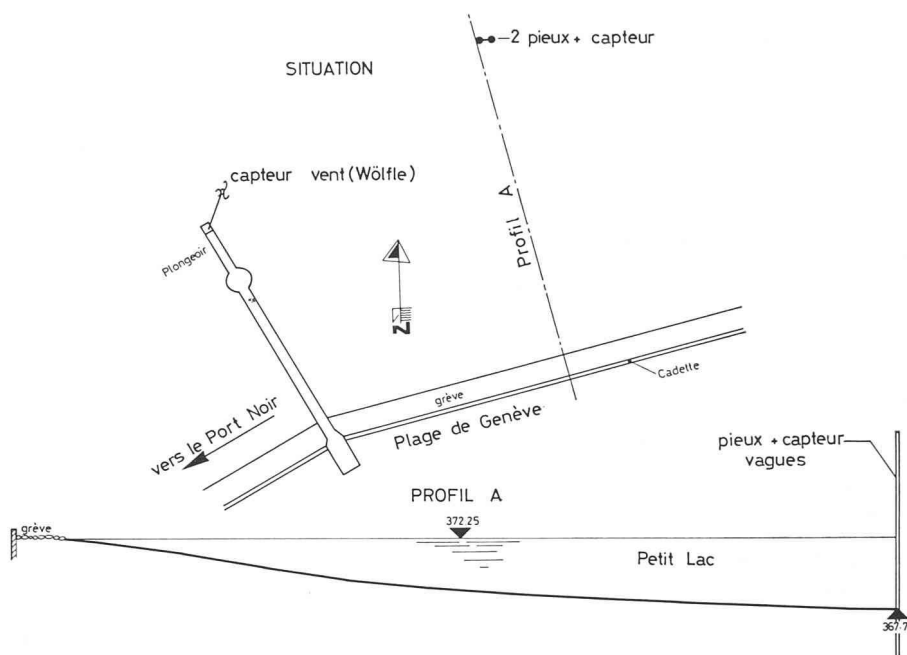


Fig. 1. — Station de mesure : situation et fonds.

## 2. Equipement et site — Station de Genève-Plage

Le problème que nous avons à résoudre consistait à mesurer simultanément vent et vagues lors des tempêtes de bise. Il existe sur le marché des instruments fiables pour la mesure des vagues au large (tout au moins sont-ils utilisés sur une échelle assez grande par divers services nationaux en mer du Nord et Atlantique) comme par exemple les bouées accéléro-métriques. Le vent est mesuré à partir de stations littorales, bateaux équipés dans ce but ou plate-formes océaniques. Ces deux dernières solutions permettent une concentration des mesures vents-vagues, mais

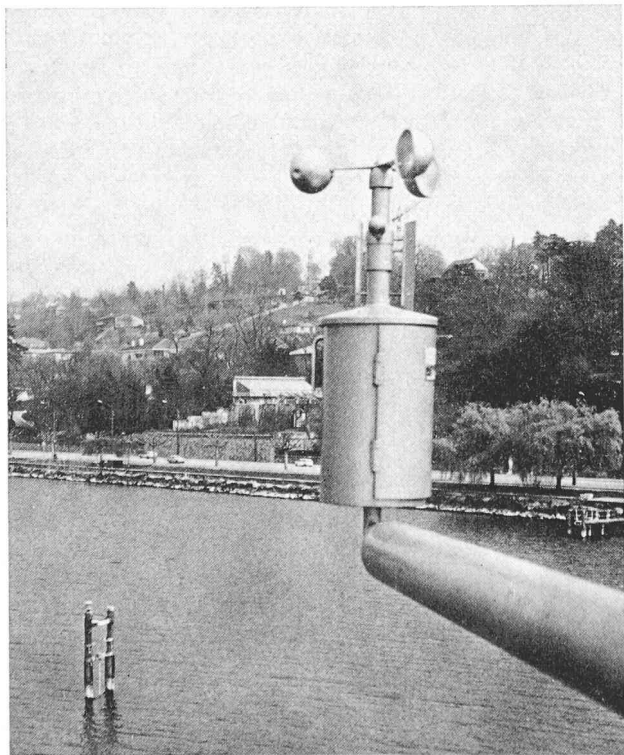


Fig. 2. — Anémomètre à coupelles (Wölfle) et capteur de vagues.

elles devaient être exclues d'emblée, si ce n'est qu'en raison de leur coût, hors de toute proportion avec nos moyens. Les bouées présentaient à leur tour et dans les conditions du lac, quelques désavantages marquants :

- protection difficile contre la navigation et les curieux ;
- problèmes considérables pour assurer une bonne transmission des données à terre par ondes herziennes dans une région aussi « chargée » que la région genevoise ;
- nécessité de prévoir en tout cas une station de réception des signaux et une station anémométrique à terre ;
- accès et entretien difficiles ;
- coût élevé.

Alors même que l'option mesure du vent à la rive et des vagues à proximité de celle-ci, sur les plus grands fonds encore possibles, apparaissait déjà comme la seule ouverte, nous apprenions que des sondes capacitatives suspendues — analogues à celles dont notre laboratoire était doté de longue date — avaient été construites aux dimensions correspondantes et même utilisées pour la mesure des vagues dans un lac américain. En effet, des sondes de 1 m de longueur avaient fonctionné pendant deux ans sur le lac Hefner (USA) et d'autre part le CCIW de Burlington (Canada) s'appropriait à installer une plate-forme munie de 12 sondes — réalisée depuis — sur le lac Ontario. Non seulement la maison américaine nous offrait gratuitement ses sondes — il est vrai trop courtes pour le Léman — mais une entreprise spécialisée genevoise nous assurait la construction de sondes de 2,5 m de longueur utile et leur entretien pendant toute la période de mesures pour un tiers du prix des bouées. Ces sondes présentaient toutefois quelques inconvénients :

- il fallait les faire porter par des pieux, ce qui nous limitait à des fonds de 6 m au grand maximum, leur assurer un accrochage en porte-à-faux et une orientation correcte par rapport aux vagues à mesurer. De plus, la bathymétrie locale devait être telle que la réfraction soit négligeable et les réflexions à la rive exclues. On imagine facilement que l'ensemble de ces conditions est plutôt difficile à satisfaire sur le même site ;

- une liaison par câbles à la rive était inévitable pour alimenter la sonde, la chauffer en hiver pour éviter la formation de givre, assurer la signalisation, etc. ;
- la présence d'algues ou autres déchets pouvant s'accrocher aux fils de la sonde risque de fausser les mesures. Quoique le lac est plutôt propre en hiver — période des fortes bises — une surveillance continue et d'éventuels nettoyages pouvaient s'imposer.

Comme de plus, pour la mesure du vent, il fallait un endroit à découvert, de préférence en saillie par rapport à la rive, sur lequel il fallait hisser un mât de 10 m et construire une cabine climatisée pour abriter l'instrumentation, la recherche d'un emplacement adéquat s'est révélée ardue.

Finalement, en décembre 1974, la station de mesure (voir fig. 1, 2, 3 et 4) était opérationnelle à Genève-Plage. Elle se composait des éléments suivants :

- un capteur de vagues (sonde capacitive de 2,5 m) porté par deux pieux en bois fichés sur des fonds à 367,75 m environ. Le niveau moyen du lac oscille autour de 372,25 m ;
- un groupe anémométrique formé d'un capteur NEZ auquel nous avons ajouté par la suite un deuxième capteur type Wölfle (équipement standard des stations météorologiques suisses), montés à la cote 382,25 m, soit 10 m au-dessus du niveau moyen du lac ;
- une station d'alimentation électrique ;
- un système de saisie des données permettant de transcrire sur bande perforée les caractéristiques du vent et des vagues, ainsi que la date et l'heure exacte des enregistrements.

Avec cet équipement la mesure des grandeurs physiques observées est continue, alors que la saisie procède par échantillonnage. La consigne de fonctionnement adoptée fut la suivante :

- les caractéristiques du vent mesurées au capteur NEZ sont intégrées et moyennées par séquences de cinq minutes. Si la vitesse moyenne du vent dépasse une valeur de consigne, un cycle de prise de mesures est déclenché ;
- un cycle de mesures consiste à porter sur bande perforée l'horodatage, le signal du capteur de vagues échantillonné à 2 Hz pendant cinq minutes et les caractéristiques du vent pour six séquences de cinq minutes à commencer avec la première où la consigne avait été dépassée. Le cycle couvre ainsi 30 minutes avec les vagues mesurées entre la cinquième et la dixième minute ;
- la vitesse moyenne du vent de la dernière séquence est à nouveau comparée à la consigne et la prise de mesures s'arrête ou continue selon le cas.

Ce mode de fonctionnement assure en même temps une autonomie suffisante de la station et permet de préserver les principales caractéristiques du signal. Les bandes perforées sont ensuite récupérées et traitées par les moyens du Centre de calcul EPFL.

Les résultats, en ce qui concerne le vent, sont confrontés avec les observations effectuées simultanément aux Centres météorologiques de Cointrin (CMC) et de Payerne (SMP). Plus récemment, deux stations anémométriques supplémentaires ont été installées à Céligny et à Corsier-Port.

Nous n'avons pas procédé à un relevé bathymétrique détaillé qui aurait dû atteindre des fonds de 20 m sur une

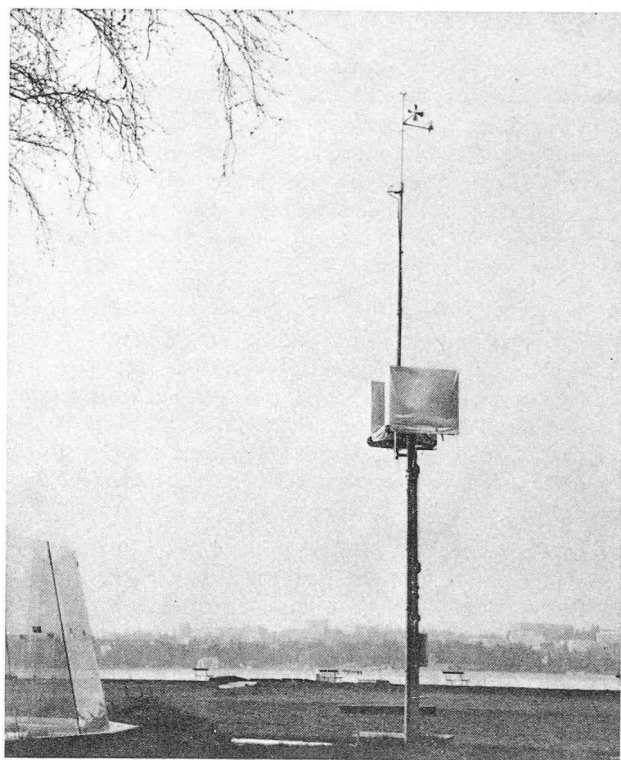


Fig. 3. — Capteur de vent NEZ. A gauche, les vitres protégeant les bassins.

zone assez étendue, le coût en aurait été trop élevé. Sur la base des quelques profils existants, des cartes au 1 : 25 000 et des observations de plans de vagues faites au droit du Port-Noir, nous avons évalué à environ 15 % l'écrêtement par réfraction possible des vagues significatives par bise de  $17 \text{ ms}^{-1}$  (valeur atteinte une seule fois pendant notre campagne). Les autres facteurs pouvant modifier les caractéristiques des vagues — déferlements, réflexions, courants, navigation — étaient sans influences significatives sur l'emplacement choisi.

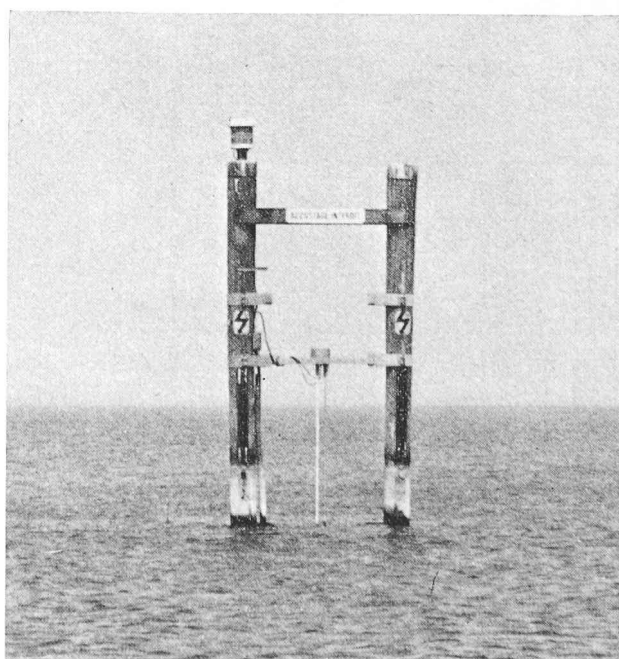


Fig. 4. — Capteur de vagues : les fils entre les pieux.

### 3. Résultats

De décembre 1974 et jusqu'en avril 1978 nous avons observé huit tempêtes de bise dont deux ont duré plus d'un jour. C'est ainsi que nous avons pu sélectionner, pour une analyse détaillée, dix séquences d'enregistrements d'une durée allant de deux à quatorze heures environ.

Les principaux résultats obtenus sont donnés au tableau 1. Sa compréhension exige les quelques explications et commentaires suivants :

- les caractéristiques du vent sont indiquées par leur moyenne pour la durée donnée aux colonnes 2 et 3 et l'écart type correspondant. Pour les océans le vent est considéré constant si sa direction ne varie pas de plus de 15° et la vitesse de plus de 2,5 ms<sup>-1</sup> [5, vol. I, p. 3-27 et suivantes]. On peut remarquer que les écarts observés lors de nos mesures sont très nettement plus faibles ;
- le capteur de vent NEZ s'est avéré peu fiable par fort vent (avaries, vitesses manifestement erronées). Nous l'avons doublé par un anémomètre Wölflle à partir de l'été 1976 (même type que ceux des CMC et SMP). Les chiffres entre parenthèses de la colonne 12 sont obtenus par interpolation ;
- les vagues ont été analysées par séquences de cinq minutes, réunies ensuite pour toute la durée de l'enregistrement (colonnes 2 et 3). Réunir des mesures séparées d'une demi-heure, peut paraître à première vue artificiel. Toutefois, les faibles écarts-types correspondant aux vagues significatives (colonnes 18 et 19) prouvent que cela est raisonnable ;

— pour notre analyse une vague est définie de deux manières différentes, consacrées par l'usage. Pour le calcul des amplitudes et périodes propres  $T$  une vague est un sommet entre deux creux. Pour le calcul des périodes moyennes  $\bar{T}_z$  une vague est définie par deux dépassements consécutifs du niveau moyen du plan d'eau (zero-crossing) ;

— les longueurs d'onde  $L_0$  sont données à titre indicatif. Elles ont été calculées pour les vagues significatives ( $\bar{H}_{1/3}$ ) en eau profonde.

Un examen du tableau 1 révèle rapidement que :

- les directions du vent mesurées sur le lac diffèrent de 30° environ de celles mesurées à Cointrin ;
- la vitesse du vent  $U_{10}$  sur le lac est, comme nous l'avions prévu [2], inférieure à celle au CMC. Pour le même capteur l'écart se situe entre 5 et 12 % ;
- les périodes des vagues concordent bien avec les mesures de Forel, faites, il est vrai, par fort vent du S-O [6, vol. 2, p. 237]. Par contre, les vagues peuvent être beaucoup plus fortes que celles qu'il avait observées.

Le fait sans doute le plus marquant concerne la direction du vent, élément déterminant dans le calcul du fetch. Après avoir longtemps douté de nos mesures (ou de leur représentativité pour le lac), consulté de nombreux météorologues, navigateurs, capitaines CGN et autres connaisseurs du lac, nous sommes arrivés aux conclusions suivantes, confirmées sur certains points par nos mesures récentes à Céligny et Corsier-Port :

TABLEAU 1

N° crt	Enregistrement			Caractéristiques du vent (bise)											Caractéristiques des vagues								
	Date	Heures		Direction [°N]				Vitesse [ms <sup>-1</sup> ]							Nombre	$\bar{T}_z$	$\bar{H}_{1/3}$		$L_0$	$\bar{H}_{1/10}$	$H_{max}$	$H_{rms}$	
		de	à	Genève-Plage		CMC		Genève-Plage				CMC					moy	$\sigma$					
			moy	$\sigma$	moy	$\sigma$	Wölflle		moy	$\sigma$	moy	$\sigma$	moy	$\sigma$	Wölflle								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
1	20.02 1975	9.50	17.20	26	4			60	7	8,5	1,0	(10,2)		11,5	2,9	1098	4,1	0,76	8	26	1,01	1,69	0,52
2	09.04 1976	13.30	0.30	35	4			60	—	8,7	1,7	(11,7)		12,4	2,2	1541	3,4	0,64	9	18	0,86	1,72	0,42
3	28.04 1976	14.50	20.10	30	5			55	4	7,6	0,7	(9,0)		9,5	0,7	1178	2,8	0,43	5	12	0,58	1,40	0,32
4	23.05 1976	10.25	18.30	18	4			60	—	8,1	1,0	(9,0)		9,4	1,6	2125	2,4	0,43	3	9	0,52	1,66	0,32
5	19/ 20.11 1976	23.40	5.10	33	4	40	—	70	—	8,3	0,6	11,7	0,3	12,4	1,6	1146	4,0	0,99	13	25	1,26	1,81	0,67
6	20.11 1976	9.50	17.45	35	3	36	5	70	—	11,0	1,8	15,3	2,2	16,0	2,0	1615	4,8	1,34	16	36	1,70	2,23	0,90
7	04.01 1977	16.00	19.15	34	3	40	—	55	3	7,4	0,4	10,2	0,4	11,6	1,3	725	3,6	0,83	7	20	1,06	1,62	0,57
8	29.03 1977	10.50	17.50	avarie		40	—	60	—	avarie		17,2	1,5	16,8	0,5	1404	3,9	0,93	11	—	—	—	—
9	29.03 1977	18.50	20.50	avarie		40	—	60	—	avarie		15,8	0,4	17,0	—	323	5,0	1,45	13	39	1,79	2,38	0,98
10	12/ 13.01 1978	9.55	6.30	30	3,3	37	6,7	45	—	8,9	1,4	12,1	1,8	13,2	1,5	1458	3,9	1,01	9	24	1,30	2,08	0,70



- par forte bise le vent est orienté sensiblement plus au nord sur le Léman à l'ouest de Cully qu'à Cointrin et Payerne. Dans le cas du CMC la mesure pourrait être influencée par le courant de la vallée du Vengeron ;
- par bises jusqu'à  $10\text{--}12\text{ ms}^{-1}$  les thermiques peuvent avoir une influence significative et même prépondérante. Cela fait que la direction du vent change entre le Grand-Lac et le Petit-Lac, la zone de transition se situant au sud de Rolle ;
- des effets locaux dus au relief sont sensibles le long des rives, à La Côte, entre les lignes Yvoire-Promenthoux et Coppet-Hermance, enfin au droit des monts de Coligny.

En définitive, on peut dire qu'une orientation de la bise de  $20$  à  $45^\circ$  par rapport au nord à l'ouest de Cully sur le Grand-Lac, de  $30$  à  $40^\circ$  sur le Petit-Lac, avec des changements allant jusqu'à  $20^\circ$  au passage de l'un à l'autre, correspond bien à la réalité pour les vents établis, de l'ordre de  $8\text{ ms}^{-1}$  et plus. Tout cela fait qu'un fetch ne peut pas être déterminé simplement en mesurant des distances en alignement sur une carte. Indépendamment de ceci on peut constater une bonne corrélation entre vitesses du vent à Cointrin ( $U_{CMC}$ ) et vagues significatives, une excellente cohérence entre ces dernières et les périodes correspondantes (fig. 5). Si nous avons utilisé ici des régressions linéaires, c'est qu'en effet les relations  $\bar{H}_{1/3} - U - T$  sont quasiment linéaires pour des vents entre  $20$  et  $40$  nœuds et des fetchs de  $5$  à  $15$  MN (miles nautiques) — voir [5, vol. I, p. 3-35 à 37] — ce qui encadre complètement le domaine de nos mesures.

Par ailleurs, utilisant ces mêmes graphiques de prévision, on peut calculer à rebours le fetch expliquant les vagues significatives mesurées en fonction des  $U_{10}$  à Genève-Plage. Pour un fetch efficace  $F_e = 10,5$  MN ( $20$  km env.), on obtient des résultats comme ceux donnés au tableau 2 :

TABEAU 2

N° crt Mesure	Prévision méthode SMB *		Mesures à GP	
	$\bar{H}_{1/3}$ en m	$T$ en s	$\bar{H}_{1/3}$ en m	$T$ en s
5	1,02	4,02	0,99	4,0
6	1,36	4,7	1,34	4,8
7	0,89	3,7	0,83	3,6
9	1,50	4,8	1,45	5,0

\* Svedrup-Munk-Bretschneider — voir [5].

Quelques essais effectués au moyen de la méthode des vecteurs au nord de la ligne Yvoire-Promenthoux et par correction directe pour fetchs sur plans d'eau quasi rectangulaires pour le Petit-Lac [2 et 5, vol. I, p. 3-31 et 32] nous ont permis de trouver un  $F_e \approx 20$  km soit environ  $10,5$  MN, pour une bise à  $30^\circ\text{N}$  sur toute la zone concernée du Léman — résultat tout à fait satisfaisant à notre avis, dont permettent de juger les figures 6 et 7.

Un examen encore plus poussé des caractéristiques statistiques et des structures énergétiques des vagues apporte des preuves complémentaires concernant l'analogie avec les océans et donne en plus quelques renseignements intéressants.

Ainsi, une analyse faite sur la distribution statistique de  $1749$  vagues lors de la tempête du 12-13 janvier 1978 (voir figure 12) montre une très bonne concordance entre les distributions expérimentale et théorique des amplitudes normalisées  $H/H_{rms}$  (fig. 8), un ajustement moins bon — cela est toutefois aussi le cas pour l'Atlantique [7] — pour les périodes normalisées (fig. 9). Si nous ajoutons à cela le fait que le rapport  $\bar{H}_{1/3}/\bar{H}_{1,10} = 0,78$  en moyenne pour tous les enregistrements (avec un écart-type  $\sigma = 0,03$  !) alors que le rapport théorique est de  $0,8$  et que par ailleurs les prévisions théoriques du  $H_{max}$  s'approchent très rai-

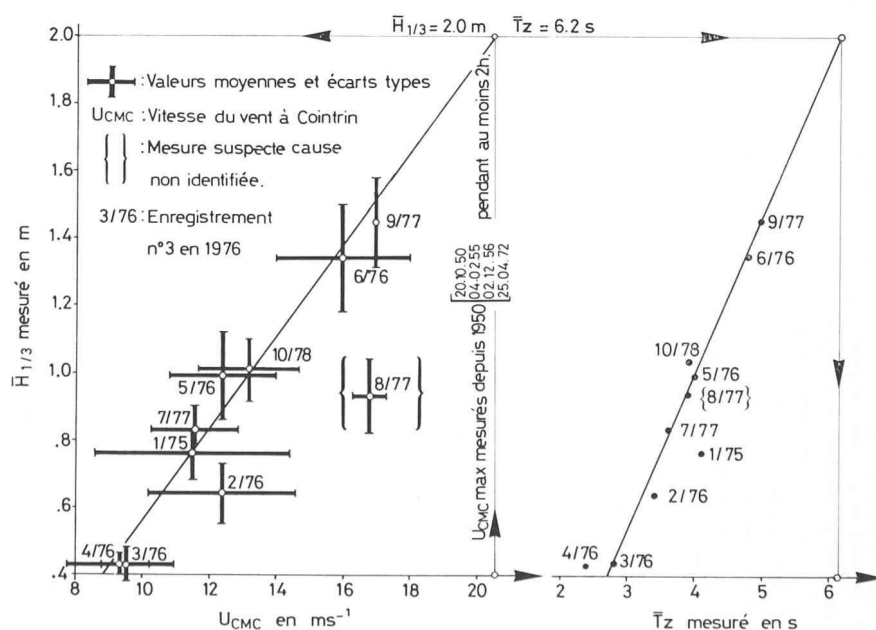


Fig. 5. — Relations vitesse de vent à Cointrin — vagues significatives — périodes.

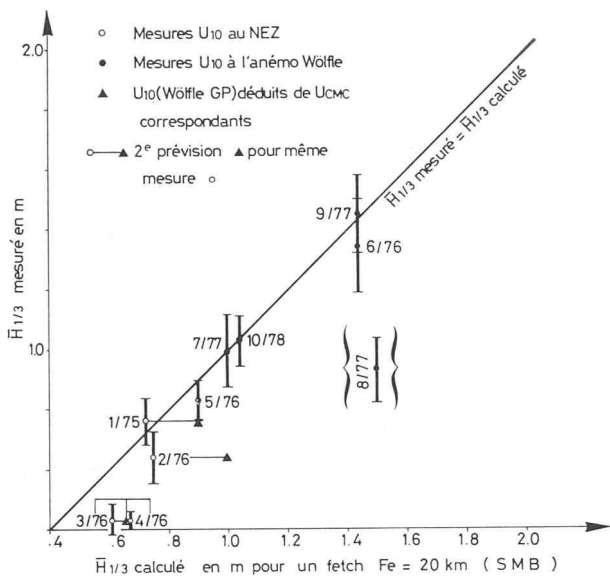


Fig. 6. — Vagues significatives : comparaison entre prévisions et mesures.

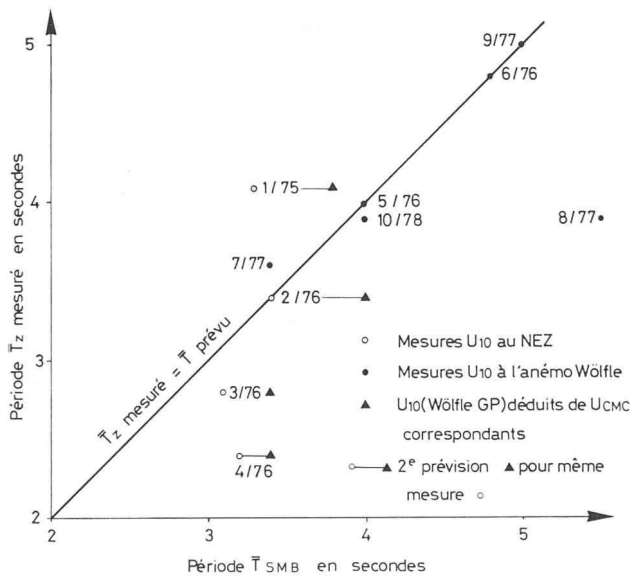


Fig. 7. — Périodes  $\bar{T}_z$  : comparaison entre prévisions et mesures.

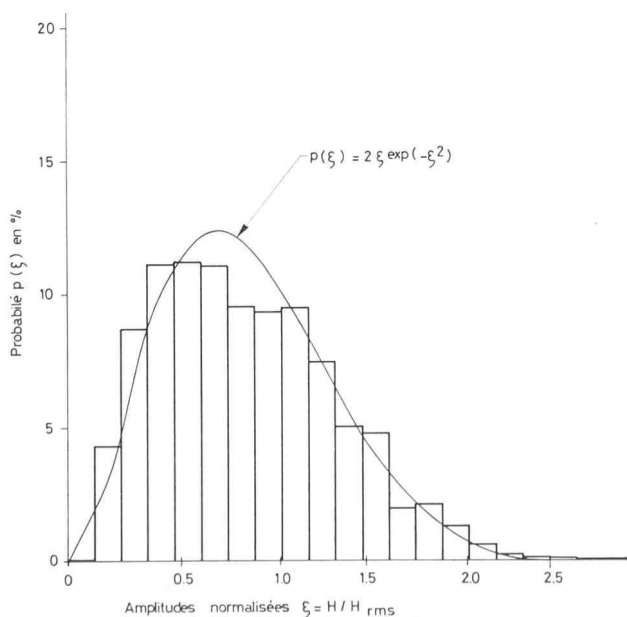


Fig. 8. — Probabilités théorique et expérimentale des amplitudes normalisées des vagues (voir aussi fig. 12).

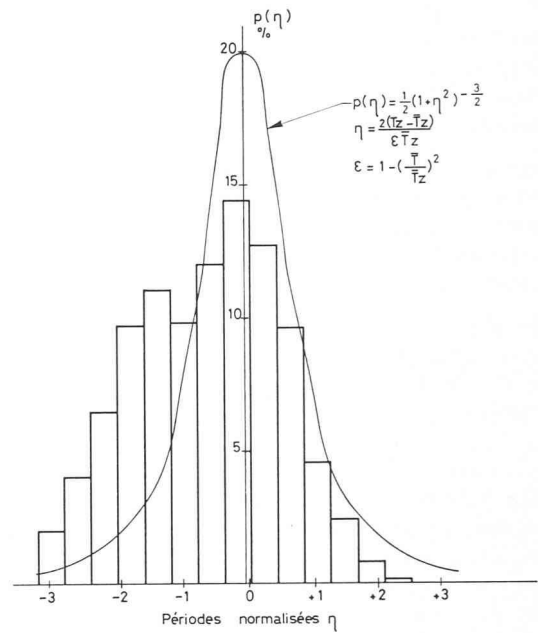


Fig. 9. — Probabilités théorique et expérimentale des périodes normalisées.

sonnablement des valeurs mesurées (fig. 10), nous pourrions conclure que dans le domaine de nos mesures la réfraction n'a pas joué le rôle de filtre que nous redoutions. Nous nous devons toutefois d'avouer un certain étonnement à cet égard et l'absence d'une explication vraiment satisfaisante. Ceci d'autant plus que les analyses correspondantes des vagues de l'Atlantique montrent que la distribution expérimentale des creux normalisés s'écarte de celle de Rayleigh plutôt dans le sens d'un tassement pour les fortes vagues [6, vol. I, fig. 3-4], mais bien entendu, il s'agit là d'autres ordres de grandeur en valeurs absolues !

Les faits étant ce qu'ils sont, nous pouvons calculer que par bise soutenue de  $20,5 \text{ ms}^{-1}$  (au CMC) pendant deux heures ou plus — sa probabilité expérimentale d'occurrence annuelle est de 15 % — nous aurons en rade de Genève :

$$\begin{aligned} \bar{H}_{1/3} &= 2,0 \text{ m} & \text{et} & & \bar{T}_z &= 6,2 \text{ s} \\ \bar{H}_{1/10} &= 2,5 \text{ m} \\ \bar{H}_{1/1000} &= 3,5 \text{ m} \end{aligned}$$

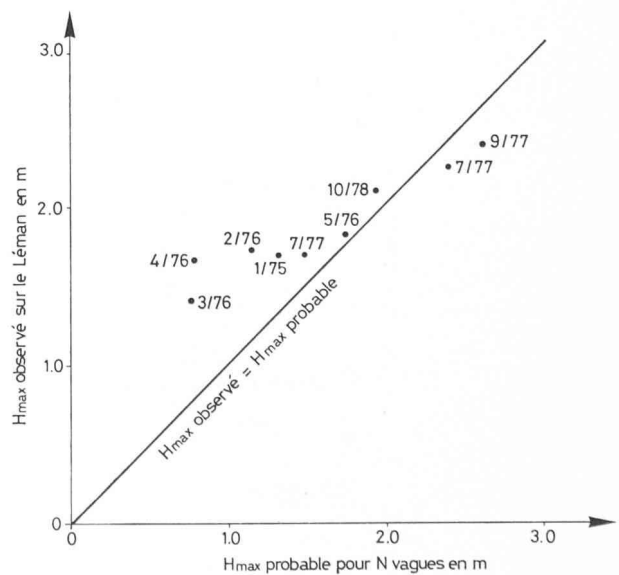


Fig. 10. — Creux maxima : comparaison entre prévisions et mesures.

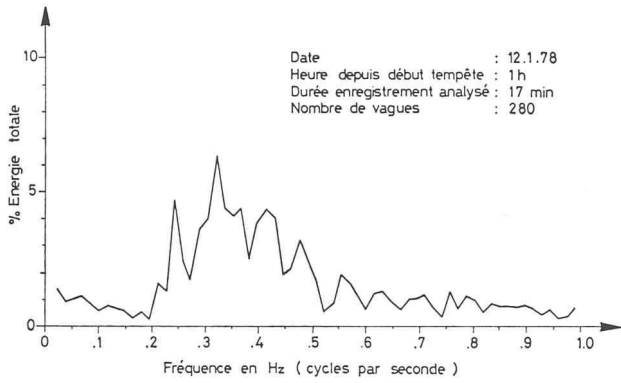


Fig. 11a

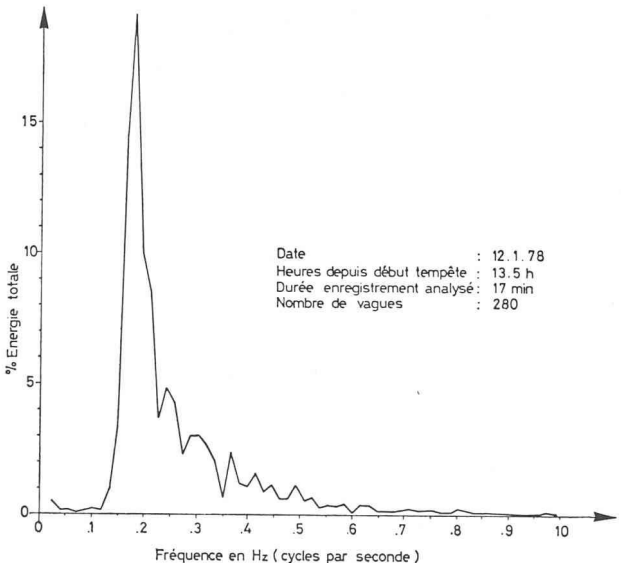


Fig. 11b

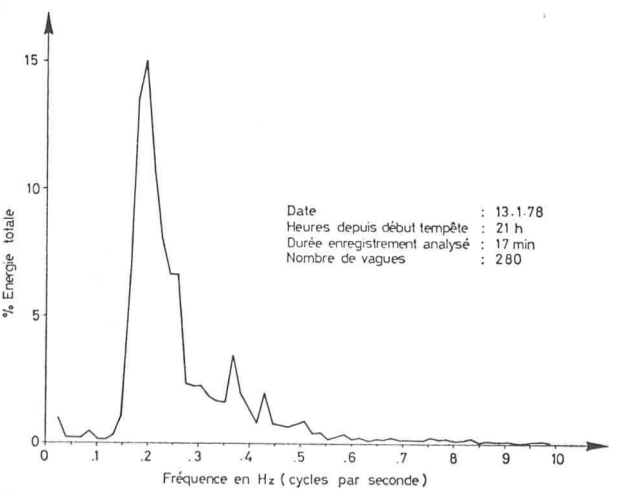


Fig. 11c

Fig. 11. — Spectres d'énergie des vagues (voir aussi fig. 12).

Si nous sommes bien au-dessus des chiffres avancés par Forel au siècle dernier, il est aussi vrai que depuis vingt ans environ on assiste à des « augmentations » semblables — pour les mers et océans partout où la mesure directe a remplacé la simple observation visuelle.

En ce qui concerne les spectres d'énergie obtenus pour la tempête déjà citée (voir figure 11), ils sont plus « purs », si l'on peut dire, que ceux des océans. Si la figure 11a montre qu'en début de tempête (voir aussi figure 12) l'énergie est passablement répartie sur un large éventail de fréquences, une fois le régime établi (fig. 11b et c), 72 % de l'énergie est concentrée entre environ 0,12 et 0,27 Hz, plus de 90 % entre 0,12 et 0,45 Hz.

Les pointes d'énergie s'établissent autour de 0,2 Hz correspondant à une période  $T = 5$  s. Notons que l'analyse statistique des périodes donne  $T_{1/3} = 4,4$  s et  $T_{1/10} = 5,3$  s — une très bonne correspondance.  $T_{max}$  (pour 1458 vagues) est dans ce cas de 7,5 s.

Enfin, le déroulement de la tempête, tel que montré à la figure 12, révèle, si l'on tient compte des différences d'échelle et des fluctuations aléatoires, un déphasage de l'ordre de une à une heure et demie entre vents et vagues pour le Petit-Lac, alors qu'il est d'au moins trois heures pour des vents de même ordre d'intensité sur l'Atlantique. A  $10-14 \text{ ms}^{-1}$  vitesse du vent, c'est le temps nécessaire pour parcourir la longueur physique du fetch.

4. Conclusions

Nous pensons que les résultats dont nous faisons état dans cette publication démontrent que pour les lacs profonds — et en Suisse un lac est profond s'il dépasse 10 à 20 m de profondeur selon les cas, sur la majeure partie de sa surface — la détermination des vagues à partir des vents est possible avec les modèles utilisés pour les océans.

La complexité des conditions topographiques terrestres et sous-lacustres n'est pas un obstacle fondamental. Elle implique cependant un bon jugement en ce qui concerne l'utilisation de données de vent disponibles ou l'implantation de stations anémométriques ad hoc. Une campagne de mesures, limitée dans le temps, telle que nous l'avons décrite, permettra de déterminer alors le fetch efficace à prendre en compte dans les calculs.

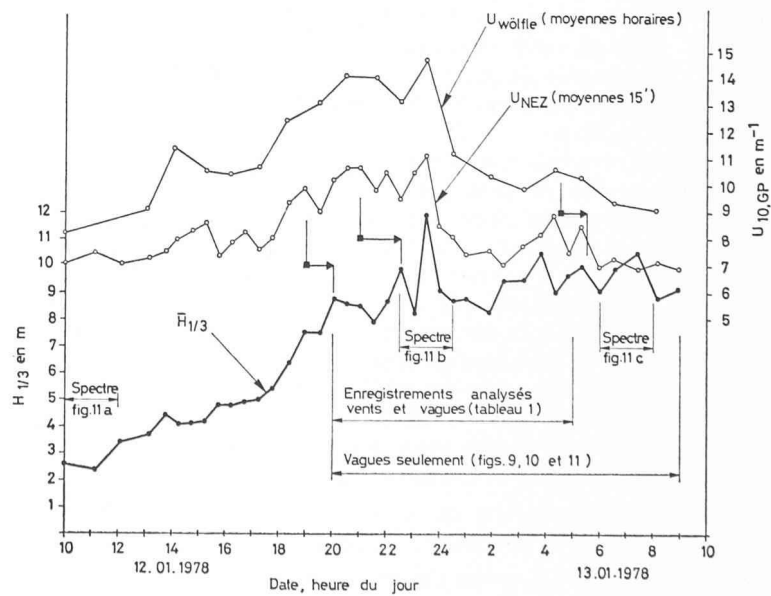


Fig. 12. — Déroulement d'une tempête de bise typique telle qu'observée en rade de Genève.



C'est ainsi que nous avons pu résoudre quantitativement le problème des vagues de bise sur le Léman à l'ouest de Cully-Lausanne. Nous avons souhaité en plus obtenir des plans de vagues-levés aérophotogrammétriques. Malgré la collaboration assurée du Service topographique fédéral cela n'a pas été possible à ce jour.<sup>3</sup> Nous continuons à penser que c'est là un élément essentiel de jugement a priori et de vérification du modèle de calcul adopté.

Connaître et prévoir les vagues constitue un élément important de la sécurité de la navigation et des ouvrages. Nous avons montré que les mesures directes et les estimations qui en résultent réservent à cet égard des surprises. C'est une leçon à retenir : quelques accidents coûteux se sont produits dans nos régions ces dernières années.

Plus fondamentalement, les vagues sont avec les courants les éléments essentiels de la dynamique des lacs, des deux le plus visible et le plus facilement mesurable. Des données relatives aux vagues seront toujours plus utiles pour l'évaluation des échanges thermiques superficiels, des processus de diffusion et même indirectement pour la détermination des caractéristiques des courants de dérive.

Notre espoir est que nous avons pu fournir ici quelques éclaircissements utiles sur la nature des problèmes et les méthodes de mesure et de calcul.

\* \* \*

<sup>3</sup> Depuis la rédaction de ce texte, des levés ont été exécutés lors du coup de bise du 10 mai 1978. A l'heure de la correction des épreuves nous procédons au montage des prises de vues. Un premier examen du matériel brut confirme heureusement nos présomptions et fournit des détails d'un grand intérêt sur les directions locales des vagues.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à tous ceux, trop nombreux pour être cités, qui nous ont apporté leurs conseils, leur collaboration directe ou leur aide financière et sans lesquels cette campagne de mesures n'aurait certainement pas pu atteindre ses buts.

#### BIBLIOGRAPHIE

- [1] FALVEY, H. T. : *Prediction of Wind Wave Heights*, Journ. Waterways, Harbors and Coast. Eng. Div., ASCE, WW1, 1974.
- [2] BRUSCHIN, J., FALVEY, H. T. : *Vagues de vent sur un plan d'eau confiné*, B TSR, n<sup>o</sup> 14, 1975, et 2, 1976.
- [3] SAVILLE, T., Jr. : *Wave forecasting*, Proc. First Conf. Ships and Waves, 1955.
- [4] WIEGEL, R. L. : *Oceanographical Engineering*, Prentice-Hall, N.J., 1954.
- [5] US Army, Corps of Engineers : *Shore Protection Manual*, Coastal Eng. Research Center, Va. USA, 1975.
- [6] FOREL, F. A. : *Le Léman*, Slatkine Reprints, Genève, 1969.
- [7] SUBRATA, K. et al. : *Ocean Wave Statistics for 1961 North Atlantic Storm*, Journ. Waterways, Harbors and Coast. Eng. Div., ASCE, WW4, 1977.

Adresse des auteurs :

Jacques Bruschin et Louis Schneider  
Laboratoire d'hydraulique  
de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne  
Rue de Genève 65, 1004 Lausanne

## Le non-tissé au secours des chemins forestiers

par SERGE RUBITSCHUNG, Brougg

L'emploi d'un non-tissé est-il judicieux pour la réalisation de chemins forestiers ?

Les avis divergent à ce sujet. Il serait faux d'avoir recours au non-tissé, par principe, pour toutes les réalisations de routes forestières. On fera mieux, pour augmenter la portance de certains sols précis, tels que flysch, d'avoir recours aux moyens conventionnels comme la stabilisation à la chaux.

L'expérience démontre cependant les effets positifs du non-tissé en tant que nappe anticontaminante dans la quasi-totalité de ses applications dans des sols cohérents.

Les avantages du non-tissé observés lors de son application dans le secteur des améliorations foncières se retrouvent dans le domaine des voies forestières. Il évite l'interpénétration du matériau de fondation et du sous-sol sous l'effet de malaxage des engins de transports. D'autre part il forme écran face aux particules fines du sol migrant vers la surface sous les effets dynamiques du compactage. Outre cette double fonction économique, le non-tissé présente d'autres avantages souvent oubliés soit :

- Augmentation de la qualité finale d'où le prolongement de la durée de vie de la superstructure.
- Assure la continuité des travaux dans les terrain gorgés d'eau.
- Permet un avancement des travaux rapide et rationnel.

Les exigences posées au non-tissé mis en œuvre dans les conditions rencontrées en forêt sont très particulières. Contrairement à l'opinion généralement émise par les spécialistes en la matière, les efforts exercés sur un non-tissé posé sous une route forestière représentent un multiple des valeurs enregistrées dans le cas par exemple d'une autoroute. L'expérience a démontré qu'il ne suffit pas de choisir un non-tissé d'un fort grammage, *le poids n'étant plus le reflet des qualités mécaniques*.

Les conditions hétérogènes généralement rencontrées au niveau du fond de forme d'un chemin forestier tels galets, blocs, racines, etc., mettent sérieusement à contribution le non-tissé. Face aux conditions susnommées, le choix du produit dépendra des caractéristiques décisives suivantes :

- a) *Résistance à la rupture* : permettant de résister aux tractions extrêmes lors de la mise en place de la couche de fondation.
- b) *Résistance à la déchirure amorcée* : afin de limiter au maximum les déchirures éventuelles dues aux efforts de cisaillement.
- c) *Une certaine épaisseur* : afin d'assurer un drainage radial sous la couche de fondation. Un bon effet drainant du non-tissé permet d'évacuer certains apports d'eau peu importants.