

Propagation acoustique en milieu extérieur. Comment estimer un niveau acoustique à grande distance ?

Michel Bérengier,

Laboratoire central des Ponts et chaussées, centre de Nantes,
BP 19, 44340 Bouguenais

Vadim Zouboff, Etienne Séchet,

Laboratoire régional des ponts et chaussées d'Angers,
avenue de l'amiral Chauvin, BP 69, 49136 Les Ponts de Cé Cedex

Le but de cet article est de faire le point sur les différentes approches des phénomènes propagatifs, d'en cerner leurs limites respectives et de tenter d'expliquer pourquoi en un même point, avec une source identique, suivant la période, il est possible d'obtenir des écarts de niveaux de bruit supérieurs à 10 voire 20 dB(A).

Ce travail fait actuellement l'objet d'un des thèmes de recherche prioritaire du Laboratoire central des Ponts et chaussées associé à plusieurs Laboratoires régionaux.

P

révoir des niveaux acoustiques en espace extérieur n'est pas chose facile. La prévision est encore plus délicate lorsque des perturbations atmosphériques viennent se juxtaposer aux autres perturbations plus classiques liées notamment à la topographie des sites ainsi qu'aux différentes natures de sol. Pour les riverains de sites bruyants, il est cependant essentiel de faire des prévisions les plus fiables possibles. Pour cela, la connaissance approfondie de l'ensemble des phénomènes physiques pouvant influencer la prévision est indispensable. Depuis de longues années, d'importants travaux ont été conduits dans le réseau des laboratoires des Ponts et chaussées, comme par d'autres équipes françaises et étrangères sur l'impact des différents paramètres influençant la propagation du bruit en espace ouvert. C'est ainsi qu'ont été abordés les effets de sol, les effets d'écran et plus récemment les effets atmosphériques, plus précisément les effets micro-météorologiques. Les deux premiers effets peuvent être modélisés de façon déterministe, à partir d'approches analytiques ou numériques. Le dernier peut l'être également à partir d'une approche déterministe, mais celle-ci ne permettra de fournir un résultat qu'à un instant t qui peut être relativement bref. Si l'on veut tenir compte, d'une part, de la constante évolution de l'atmosphère, et d'autre part de l'imprécision relative de l'estimation spatiale de ces caractéristiques (vent et température), il devient obligatoire d'approcher les phénomènes propagatifs sous leur aspect probabiliste.

Comment acquérir et interpréter les informations météorologiques [3]?

S'il était possible de connaître l'évolution temporelle de la variation verticale de la vitesse du son en tout point de l'espace, le problème d'intégration des phénomènes atmosphériques dans les modèles de prévision des niveaux sonores serait résolu. En fait, l'ensemble des travaux réalisés jusqu'à ce jour a permis de s'en approcher. Dans la réalité, nous sommes confrontés à deux types de problèmes :

- d'une part, l'inhomogénéité des conditions micro-météorologiques entre la source et le récepteur due à la topographie, aux obstacles naturels ou artificiels, à la nature et à la densité de la végétation,...
- d'autre part, l'évolution temporelle à long terme de ces conditions météorologiques.

Pour des périodes considérées comme météorologiquement homogènes (de l'ordre d'une heure), il est possible, suivant la nature du terrain et du type de résultat recherché (prévision ou constat de mesure), d'appréhender les facteurs météorologiques suivant un degré de complexité variable. Si l'on souhaite avoir une interprétation correcte d'un niveau sonore à grande distance, cette information doit être impérativement adjointe à toute mesure acoustique.

- Au voisinage d'un terrain plan et homogène, l'atmosphère est stratifiée en couches horizontales. Dans ce cas, la prévision par la modélisation, d'un niveau acoustique, en un point donné, nécessite la connaissance de la valeur la plus exacte possible du gradient vertical de vitesse du son. Cette information doit être obtenue par la mesure locale issue d'un ensemble de capteurs de température, de vitesse et de direction de vent répartis verticalement sur un mât. Ces facteurs peuvent être, soit directement échantillonnés par des mesures à diverses hauteurs, par exemple, cinq niveaux répartis sur 25 mètres, soit interpolés à partir de mesures sur deux niveaux seulement et un modèle de calcul micro-météorologique.

Dans le cas d'un constat par la mesure, la simple caractérisation de l'état de l'atmosphère est suffisante mais néanmoins nécessaire. Elle pourra se faire par exemple, à partir d'une grille qualitative fournissant une codification par classes des conditions météorologiques qui produisent un effet acoustique donné. En effet, différentes combinaisons des conditions aérodynamiques et thermiques peuvent produire des effets acoustiques identiques.

Le tableau 1 présente cette grille à double entrée (Ti : conditions thermiques, Ui : conditions aérodynamiques) dont les conditions d'entrée Ui et Ti répondent aux critères suivants :

- U1 : Vent fort (>3 m/s à 2 m de hauteur) contraire à la propagation,
- U2 : Vent moyen à faible (1 à 3 m/s à 2 m de hauteur) contraire OU fort peu contraire,
- U3 : Vent nul OU quelconque de travers,
- U4 : Vent moyen à faible portant OU fort peu portant (env. 45°),
- U5 : Vent fort portant.

- T1 : Jour ET fort rayonnement ET surface sèche ET peu de vent,
- T2 : Jour ET [rayonnement faible OU surface humide OU vent fort],
- (si toutes les conditions reliées par des OU sont remplies, on retombe dans la classe suivante),
- T3 : Durée horaire contenant le lever du soleil OU coucher du soleil OU [temps couvert ET venteux ET surface humide],
- T4 : Nuit ET [nuageux OU vent],
- T5 : Nuit ET ciel dégagé ET vent faible.

	U1	U2	U3	U4	U5
T1		- -	-	-	
T2	- -	-	-	Z	+
T3	-	-	Z	+	+
T4	-	Z	+	+	++
T5		+	+	++	

Tableau 1

Chaque classe $U_i T_j$ permet de fournir un ordre de grandeur des effets météorologiques sur la propagation acoustique. On distingue cinq types de propagation dont les effets sont différents :

- Etat météorologique conduisant à une atténuation très forte du niveau sonore,
- Etat météorologique conduisant à une atténuation forte du niveau sonore,
- Z Effets météorologiques nuls,
- + Etat météorologique conduisant à un renforcement faible du niveau sonore,
- ++ Etat météorologique conduisant à un renforcement moyen du niveau sonore.

Les cases grises représentent des impossibilités physiques.

- Si le terrain présente une topographie perturbée, le phénomène de stratification l'est également. Ce qui produit une variation spatiale des gradients de vitesse du son très importante. Il s'en suit qu'une information ponctuelle recueillie sur un mât unique ne sera pas représentative de l'ensemble des phénomènes le long du chemin de propagation. Ceci conduit à une forte imprécision, aussi bien dans l'approche prévisionnelle que dans le constat. La valeur d'un gradient de vitesse du son représentatif est imprécise, et son utilisation dans des modèles propagatifs produira des résultats qui pourront être très discutables. Concernant la grille représentée au tableau 1, ces facteurs

d'entrée ne produiront pas les mêmes valeurs de gradient de vitesse du son sur un terrain perturbé que sur un terrain plan, les interprétations acoustiques seront donc à prendre avec précautions.

L'ensemble de ces considérations concernent des estimations "à court terme". Pour évaluer le niveau acoustique à plus long terme, la simple moyenne des effets météorologiques conduit à des aberrations acoustiques. Dans l'état actuel des connaissances, on a tendance à privilégier les situations plutôt favorables à la propagation (faible vent portant et/ou inversion de température modérée).

Approche déterministe

Par cette approche, il est possible de calculer à partir de modèles analytiques ou numériques le niveau de pression acoustique en un point donné de l'espace, pour des conditions de sol et des conditions atmosphériques données. On utilise soit des approches basées sur les techniques de rayons, soit des approches basées sur la résolution de l'équation d'Helmholtz par approximation parabolique ou autre [4, 5].

Quelle que soit la technique utilisée, le calcul de la pression acoustique au point de réception, intégrant les diverses conditions de propagation (gradient vertical de vitesse du son positif, négatif ou neutre), est valide pour une condition atmosphérique donnée à un instant précis. Dans ce cas bien particulier, la précision des modèles de calcul prévisionnel est bonne. La figure 1 est un bon exemple pour une condition de gradient négatif, à 16m de distance. On peut retrouver de très bons résultats à plus grande distance (300m par exemple), mais dans le cas d'un sol plan, parfaitement homogène, et **en valeur moyenne uniquement**. Malheureusement, dans le cas général, la propagation est soumise à d'importantes fluctuations atmosphériques aléatoires. L'hypothèse d'uniformité sur l'axe source-récepteur n'est plus acceptable. C'est pourquoi, l'approche décrite ci-après propose de considérer toute variation acoustique à grande distance comme une variable aléatoire.

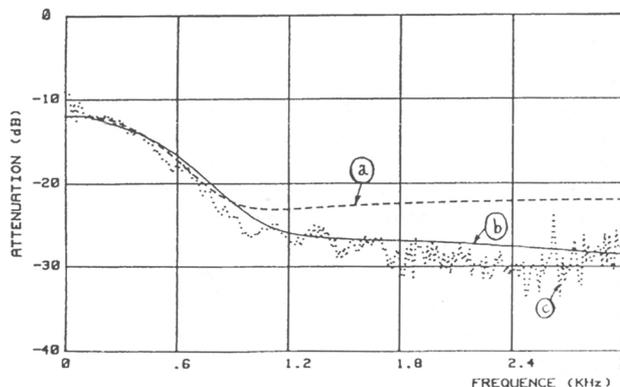


Fig. 1 : Atténuation entre 4 et 16m ($h_s=0,05m, h_r=0,5m$)
 a) Calcul pour un gradient vertical de vitesse du son nul
 b) Calcul pour un gradient de vitesse du son négatif
 c) Expérimentation correspondant à une gradient de vitesse du son négatif

Approche probabiliste [6]

D'un point de vue opérationnel, même si l'on se situe sur une période très courte (un instant), on s'aperçoit que la caractérisation de l'état atmosphérique que l'on peut fournir est insuffisante pour prévoir précisément l'effet météorologique sur la propagation du son. La connaissance que l'on peut avoir de l'état de l'atmosphère est schématiquement de deux ordres :

- Dans le cadre expérimental, l'information est issue de capteurs physiques, placés à différentes hauteurs d'un mât. Elle est de ce fait **précise**. Par contre, on peut s'interroger sur la représentativité spatiale de telles mesures précises. En effet, il n'est pas rare que deux mâts météorologiques placés en deux points différents de l'axe de propagation sonore, accusent des différences non négligeables dans les mesures. Ceci est dû à l'instabilité permanente de l'atmosphère dont il a été question plus haut. Cette faible représentativité peut se traduire par une **incertitude**, quant à l'adéquation d'une valeur précise et locale, à caractériser l'**ensemble** de la propagation. C'est pourquoi il est fréquent d'observer des différences notables d'un point de vue acoustique entre des échantillons pourtant météorologiquement quasi-identiques (en fait : identiques en un point de l'espace de propagation).
- Dans le cadre opérationnel, l'information météorologique est issue de l'appréciation "au jugé" que l'opérateur peut avoir de l'état de l'atmosphère. Aussi est-elle traduite au travers de modalités linguistiques. Elle est donc fortement marquée d'imprécision. Par contre, de par le mode d'appréciation, elle présente un caractère de **globalité** et peut donc être considérée comme représentative de l'ensemble de la propagation.

vitée spatiale et rendre cette connaissance expérimentale compatible avec le cadre opérationnel qui n'opère qu'à travers des modalités linguistiques imprécises, mais qui leur confère un caractère de globalité. Ceci est réalisé par un algorithme d'apprentissage automatique de règles floues, basé sur la mesure d'entropie floue [8].

En généralisant la logique classique, la logique floue permet d'exprimer des liens de cause à effet d'un ensemble de caractéristiques vagues (l'appréciation "au jugé" des conditions météorologiques) vers un autre (les effets sur la propagation sonore). Ainsi, lorsque l'imprécision d'une proposition ne satisfait qu'imparfaitement la prémisse d'une règle, elle aussi imprécise, l'inférence floue par *Modus Ponens Généralisé* [7] permet d'en déduire une proposition imparfaitement identique à la conclusion de la règle. L'opérateur est invité à traduire son appréciation de l'atmosphère au moment de la mesure acoustique, au travers des modalités linguistiques de son choix. Par exemple : "le vent est peu portant", "assez faible", "l'ensoleillement est plutôt fort", "le ciel dégagé" etc... Après confrontation de l'observation avec la base de connaissances imprécises, le système fournit une conclusion, elle aussi imprécise. Un exemple est donné

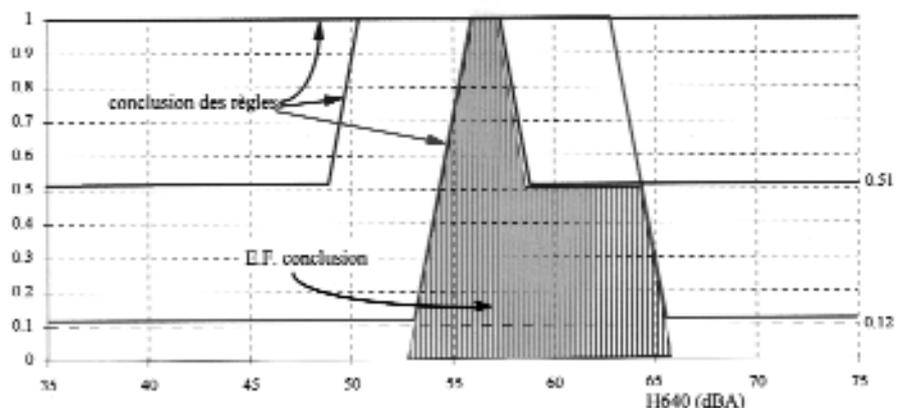


Fig. 2: Exemple d'une conclusion acoustique imprécise. La partie hachurée représente la conclusion floue. Elle pourrait s'interpréter de la façon suivante : "une source sonore de 100 dB(A) produit à 640m un niveau, ne pouvant pas être inférieur à 53 dB(A), ni supérieur à 66 dB(A), qu'il est tout à fait possible (au niveau 1) de mesurer entre 55,5 et 57 dB(A) et néanmoins possible (au niveau 0,51) de mesurer entre 58,5 et 64,5 dB(A), l'incertitude globale de cette conclusion étant de 0,12 (donc très faible)".

Modélisation et utilisation d'une connaissance imprécise

Les ensembles flous permettent d'exprimer qu'un élément appartient plus ou moins à une catégorie exprimée en termes vagues. Ces techniques sont donc généralement utilisées pour "formaliser des méthodes ou des raisonnements empiriques habituellement pris en charge par des humains"[7], et en l'occurrence, pour formaliser un phénomène physique en utilisant une information imparfaite.

Pour cette approche, on dispose d'une base de données expérimentales composée de mesures précises (au sens vu plus haut) réalisée sur un site homogène. Puisque l'état atmosphérique connaît des variations chaotiques spatiales, on cherche donc à extrapoler des valeurs numériques "trop" précises, pour gagner en représentati-

en figure 2.

Application à la caractérisation à long terme

Il est intéressant d'un point de vue acoustique de bénéficier de l'information contenue dans une collection de règles floues, pour estimer les effets sonores de variations météorologiques dans le temps. Cependant, une distribution de possibilité sur une variable météorologique ne traduit en aucun cas, les variations de la valeur qu'elle prend successivement, dans un certain laps de temps [7]. Dans notre application, elle décrit l'espace dans lequel se trouve la valeur représentative de la période. En fait, on choisit de décrire par l'imprécision, l'incertitude que l'on a quant à la localisation précise de cette valeur. C'est donc au travers d'une statistique probabiliste que l'on décrit les variations temporelles des conditions météorologiques du site ou de la région du site, par exemple par l'intermédiaire des fichiers des stations locales de *Météo-France*. La conclusion "à long terme" ▶

est obtenue par l'agrégation d'inférences successives pondérées. Elle est présentée sous la forme d'une fonction de répartition, dont un exemple est donné en figure 3.

Ce type de résultat, prenant en compte, d'une part, **l'inhomogénéité de l'atmosphère** et la difficulté à la caractériser précisément, et d'autre part, les **variations temporelles** de ses caractéristiques, exprime clairement la nécessité de **considérer toute variable acoustique à grande distance d'une source, comme une variable aléatoire**. On prendra donc soin de fournir des indices statistiques issus d'une fonction de répartition par exemple, plutôt que des valeurs acoustiques uniques.

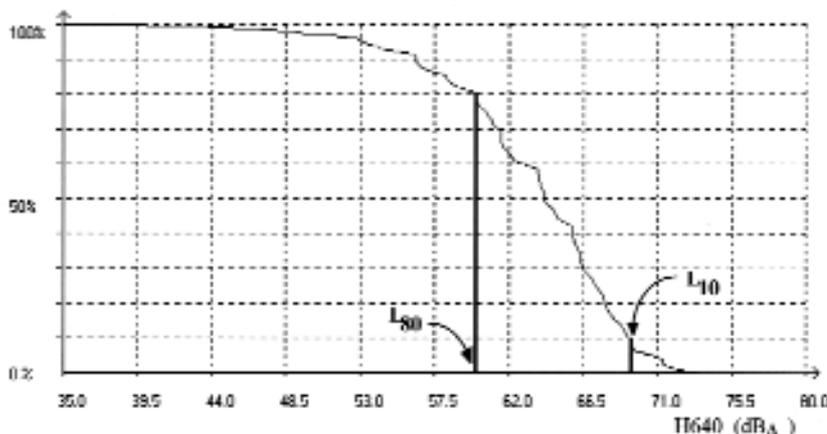


Fig. 3 : Statistique à long terme d'un niveau sonore à 640 m d'une source à 100 dB(A)

Quelques exemples réels

A titre d'exemple, pour le cas d'une source ponctuelle, différentes campagnes de mesure ont été conduites. La principale l'a été sur le site de la Crau dans le delta du Rhône. Le tableau 2 représente une partie des résultats statistiques obtenus sur un ensemble d'échantillons de durée 10 mn, pour un récepteur placé à 1,50 m du sol. Ce tableau ainsi que la figure 4 mettent en évidence

Distance (m)	Valeur moyenne (dB(A))	Ecart type (dB(A))	Valeur minimum (dB(A))	Valeur maximum (dB(A))	Etendue (dB(A))
80	89,4	1,3	86,2	92,1	5,9
160	79,8	4,4	67,2	85,8	18,6
320	68,4	8,4	52,8	79,6	26,8
640	59,7	11,2	36,2	74,0	37,8

Tableau 2

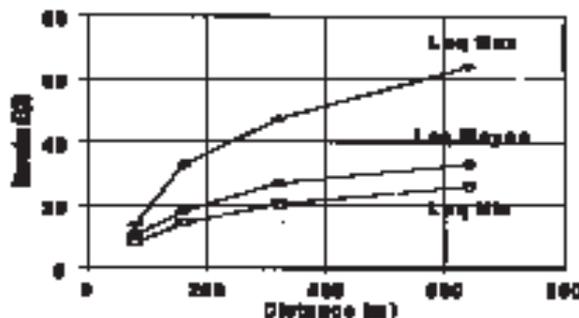


Fig. 4: Valeurs moyennes, minimales et maximales des LAeq (10 minutes) toutes conditions météorologiques confondues.

	Distances (m)	U1	U2	U3	U4	U5
T1	120		-3	-0,4	-0,3	
	240		-7,4	-1,9	-1,1	
T2	120	-3,1	-2,2	-0,1	0	+0,4
	240	-7,0	-5,8	-0,5	0	+1,0
T3	120		-1,2	0 ± 0,5	+0,2	+0,6
	240		-5,3	0 ± 0,5	+1,3	+2,2
T4	120		0	+0,4	+0,4	+0,2
	240		0	+2,3	+1,4	+2,1
T5	120			+0,4	+0,5	
	240			+2,3	+2,3	

Tableau 3 : Ecarts par rapport à un gradient vertical de vitesse du son nul

l'important domaine de variation du niveau sonore, toutes conditions météorologiques confondues.

Pour le cas d'un bruit routier représentatif d'une source linéaire, avec un sol plan et des récepteurs placés à 6 mètres de hauteur, la grille qualitative du tableau 3 représente les écarts par rapport à un gradient vertical de vitesse du son nul. Les résultats portés sur cette grille montrent, qu'en présence d'une source linéaire sur terrain plan, les tendances observées pour une source ponctuelle sont respectées (résultats du Laboratoire régional de Strasbourg).

Des études en cours sur un sol non plan, semblent faire apparaître une certaine distortion dans les résultats. Des analyses complémentaires seront, dans ce cas, nécessaires pour quantifier l'importance des différents effets.

Influence conjuguée des effets météorologiques et des obstacles

Dans ce domaine, il n'y a à l'heure actuelle que peu de publications [9]. Il est souvent mentionné [4] que l'efficacité d'un obstacle anti-bruit est réduite ou même détruite lorsque nous sommes en présence d'une propagation par vent portant. Cette position s'appuie sur le fait que la

courbure des rayons est telle qu'une partie de l'énergie passe directement au dessus de la barrière. Même si cela est vrai, il suffit pour s'en convaincre d'effectuer un tracé de rayon, cela ne signifie pas pour autant que l'obstacle est totalement inefficace. En fait, il ne faut pas comparer directement la différence de pression acoustique avec ou sans effet météorologique, mais il faut comparer les pertes par insertion entre les deux situations. En effet, dans le cas d'une propagation par vent portant ou sous une inversion de température, le niveau derrière l'obstacle est peut-être supérieur à celui que l'on aurait pour un état atmosphérique neutre, mais le niveau sans obstacle serait également supérieur par

rapport à l'état neutre. Dans ce cas, si l'on s'attache à la perte par insertion, elle est toujours positive et donc, l'obstacle possède toujours une certaine efficacité. En revanche, lorsque l'on est en présence d'un gradient de vitesse de son négatif, nous sommes déjà en zone d'ombre au voisinage du sol à cause du phénomène de réfraction. Dans ce cas, l'apport supplémentaire d'un obstacle peut ne pas apporter un gain complémentaire significatif.

Conclusion

Les phénomènes régissant la propagation acoustique en milieu extérieur sont des phénomènes complexes. Au cours des dix dernières années, les chercheurs ont fait des progrès considérables dans la prise en compte et l'interprétation des incidences des effets atmosphériques sur la propagation des ondes acoustiques à grande distance. Ceux-ci sont d'une part, liés en partie à l'évolution des techniques de calcul, et d'autre part, et surtout, liés aux collaborations nouvelles entre les acousticiens, les micro-météorologues et les statisticiens. La progression parallèle des connaissances dans ces trois domaines permettront sans nul doute d'obtenir dans les années à venir, de nouvelles avancées qui pourront rapidement se répercuter sur les modèles de prévision des niveaux

sonores à grande distance et donc sur la connaissance de l'environnement sonore des populations.

Références bibliographiques

- [1] ISO 9613-1, Acoustique - Atténuation du son lors de sa propagation à l'air libre - Partie 1 : Calcul de l'absorption atmosphérique, (1993)
- [2] K. Attenborough, Review of Ground Effects on Outdoor Sound Propagation from Continuous Broadband Sources, Applied Acoustics, 24, pp 289-319 (1988)
- [3] V. Zouboff, Y. Brunet, M. Bérengier, E. Séchet, A Qualitative Approach of Atmospheric Effects on Long Range Sound Propagation, 6th International Symposium on Long Range Sound Propagation, Ottawa, Canada, (1994)
- [4] G.A. Daigle, Acoustics of Noise Control Outdoors, 15th International Congress on Acoustics, Trondheim, Norvège, (1995)
- [5] Y. Gabillet, G. Daigle, A. L'Esperance, Sound Propagation in a Wind Tunnel : Comparison of Experiments with FFP and Residue Solution, Applied Acoustics, 43, pp 321-331 (1994)
- [6] E. Séchet, Une application de la logique floue en acoustique : l'évaluation de l'influence des conditions météorologiques sur la propagation du son, Bulletin pour les Sous Ensembles Flous et leurs Applications, 62, I.R.I.T., Toulouse, pp 59-66 (1995)
- [7] B. Bouchon-Meunier, La Logique floue, Collection Que sais-je ?, PUF n°2702.
- [8] M. Ramdani, Description numérique symbolique en apprentissage, Compte-rendu des journées des applications des ensembles flous, Nîmes, pp 259-265 (1992)
- [9] Y. Gabillet, H. Schroeder, G. Daigle, A. L'Espérance, Application de la méthode de sommation de faisceaux gaussiens au calcul du champ sonore diffracté par un écran en atmosphère inhomogène, Journal de Physique IV,

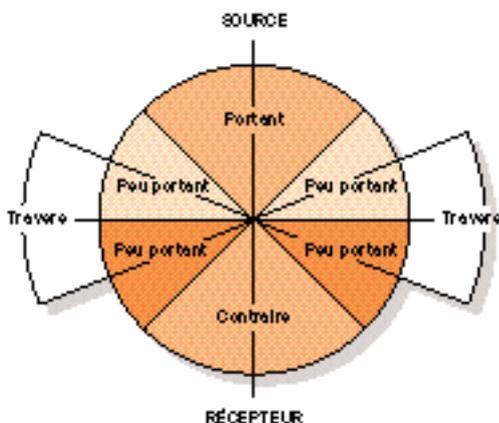


Fig. 5: Caractérisation du vent par rapport à la direction source-récepteur (caractérisation des secteurs d'où vient le vent)

Valeurs moyennes des directions de vent :

Vent portant : + ou - 45 degrés

Vent peu portant : entre 45 et 90 degrés et entre 270 et 315 degrés

Vent de travers : + ou - 22,5 degrés de part et d'autre de la direction normale à la direction émetteur/récepteur

Vent peu contraire : entre 90 et 130 degrés et entre 225 et 270 degrés

Vent contraire : entre 135 et 225 degrés