

PRÉVISION STATISTIQUE DE VENT SUR LES CENTRALES NUCLÉAIRES

Christine Marais

Météo-France

Service central d'exploitation de la météorologie

42, avenue Gaspard-Coriolis

31057 Toulouse Cedex

RÉSUMÉ

Il est essentiel, en cas d'accident sur un site nucléaire, de prévoir la vitesse et la direction du vent au niveau des rejets éventuels des effluents gazeux. Jusqu'à présent, les prévisionnistes élaborent des prévisions de vent à partir des sorties brutes des modèles numériques opérationnels. Le but de cette étude est d'améliorer la qualité de ces prévisions brutes par une méthode d'adaptation statistique, le principe consistant à corriger les prévisions des modèles à partir de comparaisons statistiques entre ces prévisions et les observations. Il s'agit ici de prévoir, par l'utilisation de la technique de la régression linéaire multiple, le vent à la hauteur des rejets (environ 100 mètres), aux échéances 12 h et 24 h et pour trois sites EDF. Il apparaît que la méthode d'adaptation statistique retenue conduit à des prévisions de direction et de vitesse de meilleure qualité que la prévision brute élaborée par le modèle numérique, ce qui démontre l'utilité d'une telle méthode et permet d'envisager sa mise en service opérationnel.

ABSTRACT

Forecasting winds over nuclear power plants using statistics

In the event of an accident at nuclear power plant, it is essential to forecast the wind velocity at the level where the efflux occurs (about 100 m). At present meteorologists refine the wind forecast from the coarse grid of numerical weather prediction (NWP) models. The purpose of this study is to improve the forecasts by developing a statistical adaptation method which corrects the NWP forecasts by using statistical comparisons between wind forecasts and observations. The Multiple Linear Regression method is used here to forecast the 100 m wind at 12 and 24 hours range for three Électricité de France (EDF) sites. It turns out that this approach gives better forecasts than the NWP model alone and is worthy of operational use.

En cas d'incident ou d'accident sur un site nucléaire, il est essentiel de prévoir le vent au niveau des rejets éventuels d'effluents gazeux. Actuellement, les prévisionnistes du Service central d'exploitation de la météorologie (SCEM) à Toulouse et des Directions interrégionales (DIR) de Météo-France élaborent des prévisions de vent par expertise à l'aide des sorties brutes des modèles de prévision numérique. Cette méthode, efficace si le prévisionniste a une bonne connaissance de la topographie du site, a l'inconvénient de ne pas être facilement applicable sans un temps d'apprentissage, relativement long, qu'il est difficile d'acquérir par le biais des seuls exercices d'alerte menés actuellement. Les sorties brutes des modèles sont, quant à elles, parfois entachées de grossières erreurs (Marais, 1988) et ne sont donc généralement pas utilisables directement telles quelles.

Afin d'améliorer automatiquement la qualité des prévisions brutes issues des modèles, il est possible d'utiliser plusieurs types de méthodes : soit des méthodes dynamiques (Marais et Musson-Genon, 1992), soit des méthodes statistiques (Pottier, 1990). Ces méthodes ont été mises en œuvre avec succès pour la température, la méthode statistique s'avérant plus précise. Aussi, pour le vent, l'approche par adaptation statistique, plus simple de mise en œuvre, a été préférée.

Les exercices d'alerte à la pollution nucléaire

Dans le cadre de sa mission d'État, Météo-France a été officiellement chargé de participer aux Plans particuliers d'intervention (PPI) mis en place pour les sites de centrales nucléaires. Ces plans de crise sont destinés à organiser la protection des populations. La participation de Météo-France consiste principalement dans la fourniture de données d'observation, de prévisions pour le site et de prévisions du déplacement des polluants. Chaque année, plusieurs exercices d'alerte sont organisés. Pour les PPI, trois niveaux sont définis :

- Niveau 1 : pas de lâcher d'effluents.
- Niveau 2 : l'émission est limitée à l'enceinte du site.
- Niveau 3 : l'extérieur du site est touché.

Météo-France n'intervient que pour les PPI de niveaux 2 et 3. En cas de déclenchement d'un PPI, le Centre météorologique interrégional (CMIR) est l'interlocuteur principal des autorités du poste de commandement (PC) de la préfecture et du PC opérationnel. Un agent de Météo-France est alors détaché au PC fixe. Son rôle est d'interpréter les documents météorologiques. À Toulouse, le Service central d'exploitation de la météorologie met en place une cellule de crise, en contact permanent avec le CMIR. Son rôle consiste à fournir des cartes de trajectoires, de dispersion et de dépôt à moyenne et longue distance, ainsi que tout support de prévision météorologique de sa compétence.

Dans cet article, nous présentons une étude de faisabilité réalisée pour le compte d'EDF (Marais et Chavaux, 1995a et 1995b) et concernant l'adaptation statistique des prévisions numériques de vent à la hauteur des rejets (environ 100 m). L'idée maîtresse de ce type de méthode consiste à corriger les résultats des modèles opérationnels de prévision par l'expérience que l'on peut tirer des observations, en intégrant d'une manière indirecte les effets locaux pouvant influencer sur le vent synoptique.



La centrale nucléaire de Saint-Laurent-Nouan (Loir-et-Cher).

MÉTHODOLOGIE

L'objectif de cette étude est d'élaborer une prévision locale du vent. Grâce à l'expertise des prévisionnistes, notamment, nous savons que ces conditions locales sont liées à des paramètres météorologiques de grande échelle (échelle synoptique), plus faciles à prévoir par un modèle dynamique. On peut alors estimer que la variable à prévoir ou **prédicteand** (en l'occurrence le vent en un point) est reliée par une fonction à d'autres variables météorologiques disponibles, appelées variables explicatives ou **prédicteurs**. On recherche par des méthodes statistiques une estimation des paramètres de cette fonction inconnue, afin d'élaborer une prévision du vent. Cette estimation est obtenue à partir de données passées et archivées, constituant le fichier d'apprentissage. L'adaptation statistique, qui permet l'estimation de cette fonction, fait appel à de nombreux outils :

- Pour le vent, prédicteand quantitatif, la fonction sera recherchée sous la forme d'une combinaison linéaire des prédicteurs, à l'aide de la méthode de **régression linéaire multiple** (Tomassone et al., 1992).



Adaptation dynamique et adaptation statistique

Les sorties brutes des modèles numériques décrivent correctement l'écoulement de l'air à l'échelle correspondant à la résolution du modèle, mais sont entachées d'erreurs lorsque l'on s'intéresse au niveau local, surtout en cas de relief marqué. Afin d'améliorer la qualité des prévisions, il est possible d'utiliser plusieurs types de méthodes appliquées aux résultats des modèles :

- **Adaptation dynamique** : cette méthode consiste à décrire explicitement les mécanismes physiques mis en jeu dans l'évolution des paramètres météorologiques considérés. On utilise, dans ce cas, un modèle de prévision numérique ayant une résolution spatiale suffisante, couplé au modèle opérationnel et adapté au problème à résoudre. Ce type de méthode permet d'avoir accès directement au champ désiré au voisinage du lieu considéré, avec une qualité qui dépend de la capacité du modèle numérique à représenter les phénomènes physiques que l'on veut modéliser. Une telle méthode est adaptée à notre problème de prévision de vent, mais cette démarche est pour l'instant très coûteuse en temps de calcul. Le modèle Cobel utilisé pour la prévision du brouillard est un exemple d'adaptation dynamique (Bergot et Guedalia, 1996).

- **Adaptation statistique** : l'idée maîtresse de ce type de méthode consiste à corriger les résultats des modèles opérationnels de prévision par l'expérience que l'on peut tirer des statistiques de comparaison entre les prévisions de ces modèles et les observations correspondantes. Les techniques statistiques permettent de déterminer les prédicteurs les plus appropriés pour la prévision du paramètre considéré et d'en utiliser une combinaison judicieusement choisie. Pour établir les équations statistiques, une période d'apprentissage est nécessaire, pendant laquelle on dispose des prévisions du modèle numérique et des observations du paramètre que l'on cherche à prévoir.

- Une étape essentielle dans l'application de méthodes statistiques prévisionnelles réside dans la suppression de l'information parasite. Pour notre étude, le problème consiste surtout en la présence de nombreuses variables redondantes. Aussi, un ordonnancement préférentiel des prédicteurs sera réalisé par une méthode classique de **sélection progressive ascendante**. Cette méthode consiste à accumuler successivement les meilleurs prédicteurs.
- Cette sélection est cependant impossible à effectuer directement lorsque l'on considère de trop nombreux prédicteurs potentiels. Une condensation de l'information disponible est alors préalablement réalisée. L'**analyse en composantes principales** se révèle dans ce cas un outil intéressant. Il s'agit de diagonaliser la matrice de variances-covariances de chaque champ prédicteur et de calculer les vecteurs propres de cette matrice. Les composantes principales sont alors considérées comme prédicteurs.
- La stabilité des résultats dépend du nombre de prédicteurs utilisés et sert de critère d'arrêt à la sélection progressive ascendante. Elle peut être testée à l'aide d'un fichier test indépendant du fichier d'apprentissage ou à l'aide d'un pseudo-fichier test, par une méthode de reconnaissance glissante (Der Mégréditchian, 1993).

RÉSULTATS

Données utilisées

Suite à une première étude climatologique (Marais et Chavaux, 1995a) réalisée sur dix-neuf sites nucléaires français, il est apparu que les prévisions de vent élaborées par le modèle de prévision numérique à maille fine Péri-dot sont de moins bonne qualité pour les sites à l'orographie complexe (implantation dans des vallées étroites, dans des méandres de fleuves, à proximité de montagnes élevées...). C'est pourquoi nous avons considéré ici trois sites de centrales nucléaires caractérisés par un tel relief :

- Le Bugey et Chooz pour lesquels on dispose de mesures de vent à 100 m. Ces sites sont équipés d'un sodar qui mesure, dans les basses couches et de façon continue, la direction et la vitesse du vent horizontal, le vent vertical ainsi que la turbulence, grâce à l'émission d'une impulsion acoustique dans la bande audible et à la détection de l'écho rétrodiffusé.
- Fessenheim où le vent est mesuré à 80 m. Ce site est équipé d'un mât de 20 m placé sur le toit de la salle des machines et instrumenté avec un anémomètre et une girouette mécaniques.



Méthode statistique retenue



Un sodar Doppler utilisé par EDF pour la mesure du vent. (Photo EDF)

Qualité des prévisions statistiques obtenues

Les prédicteurs sont extraits d'un archivage du modèle Périidot, sur un domaine géographique s'étendant entre - 8° ouest et 12° est et entre 38,25° nord et 53,25° nord, avec une maille d'environ 38 km. Au total, nous disposons, sur la période comprise entre le 1^{er} janvier 1992 et le 18 octobre 1993, de trente-cinq champs de prédicteurs : géopotentiel, vent zonal (noté U : composante du vent selon la longitude, positive quand le vent est d'ouest), vent méridien (noté V : composante selon la latitude, positive quand il est de sud), vitesse du vent, température, humidité, vitesse verticale et gradient vertical de température à différents niveaux de pression.

Afin de prévoir la direction du vent, la technique de la régression linéaire multiple est appliquée pour connaître U et V ; on en déduit alors une prévision de la direction. Par contre, pour la vitesse, la régression est calculée directement sur ce paramètre. En effet, de nombreuses études (Glahn, 1970, par exemple) ont montré que l'estimation « indirecte » de la vitesse à partir des deux composantes conduit à sous-estimer celle-ci.

Différents essais nous ont permis de choisir la méthode qui conduit aux meilleurs résultats. Il s'agit ici de considérer les prédicteurs aux douze points de grille entourant le site choisi et de regrouper, au moyen d'une première régression, ces douze prédicteurs d'un même champ en un **prédicteur canonique**. La sélection progressive ascendante est donc appliquée à ces trente-cinq prédicteurs canoniques. Les équations sont ensuite déterminées pour les échéances 12 h et 24 h du modèle Périidot lancé sur le réseau de 0 h UTC.

La méthode retenue est du type **statistique de sorties de modèles**, car des essais de **prévision parfaite** ont donné des résultats de qualité moindre. Les prédicteurs utilisés sont donc les champs prévus à 12 h ou à 24 h, pour les fichiers d'apprentissage et de test.

La nature et le nombre des prédicteurs retenus varient selon le paramètre prévu, le site et l'échéance : en général, un à trois prédicteurs suffisent pour établir les équations de régression. Ainsi, pour le site de Fessenheim à l'échéance 24 h, les trois premiers prédicteurs retenus sont la vitesse du vent à 10 m, le géopotentiel à 1 000 hPa et la température à 2 m. À l'échéance 12 h, ces prédicteurs sont la vitesse du vent à 1 000 hPa, la pression au niveau de la mer et le gradient de température à 700 hPa. De façon générale, le meilleur prédicteur pour prévoir un prédictand donné est le prédicteur le plus « proche » (grandeur physique, altitude). Ce résultat montre que la méthode ne pose pas de problème d'interprétation.

La qualité des prévisions statistiques obtenues a été testée de trois façons : par des roses des vents (allure générale), par un score construit à partir de l'écart type de l'erreur et par une analyse des fréquences des erreurs.

De façon globale, les roses des vents prévues par adaptation statistique ressemblent nettement plus aux roses des vents observées que les roses des vents prévues directement par le modèle numérique Périidot. L'adaptation statistique a tendance à bien « recalcr » les prévisions de direction, dans la mesure où elle rétablit correctement les directions prédominantes. Ces résultats se retrouvent sur les figures 1 et 2 qui présentent les roses des vents pour le site de Fessenheim : avec la méthode statistique, on retrouve bien l'orientation nord-sud de la vallée. En ce qui concerne la vitesse, l'amélioration est plus ou moins nette selon les sites.

Afin de quantifier la qualité des prévisions obtenues, nous avons calculé le biais, l'écart quadratique moyen (EQM) et l'écart type de l'erreur (ET), pour trois types de prévisions : statistique, Périidot et persistance (observation de la veille). Ces statistiques ont été établies pour la vitesse et la direction du vent. Pour ce dernier paramètre, nous avons éliminé les cas où la direction du vent n'est pas représentative, en ne considérant pas les vents inférieurs à 4 m/s. Pour l'adaptation statistique et pour Périidot, nous avons défini des scores prévisionnels de la façon suivante :

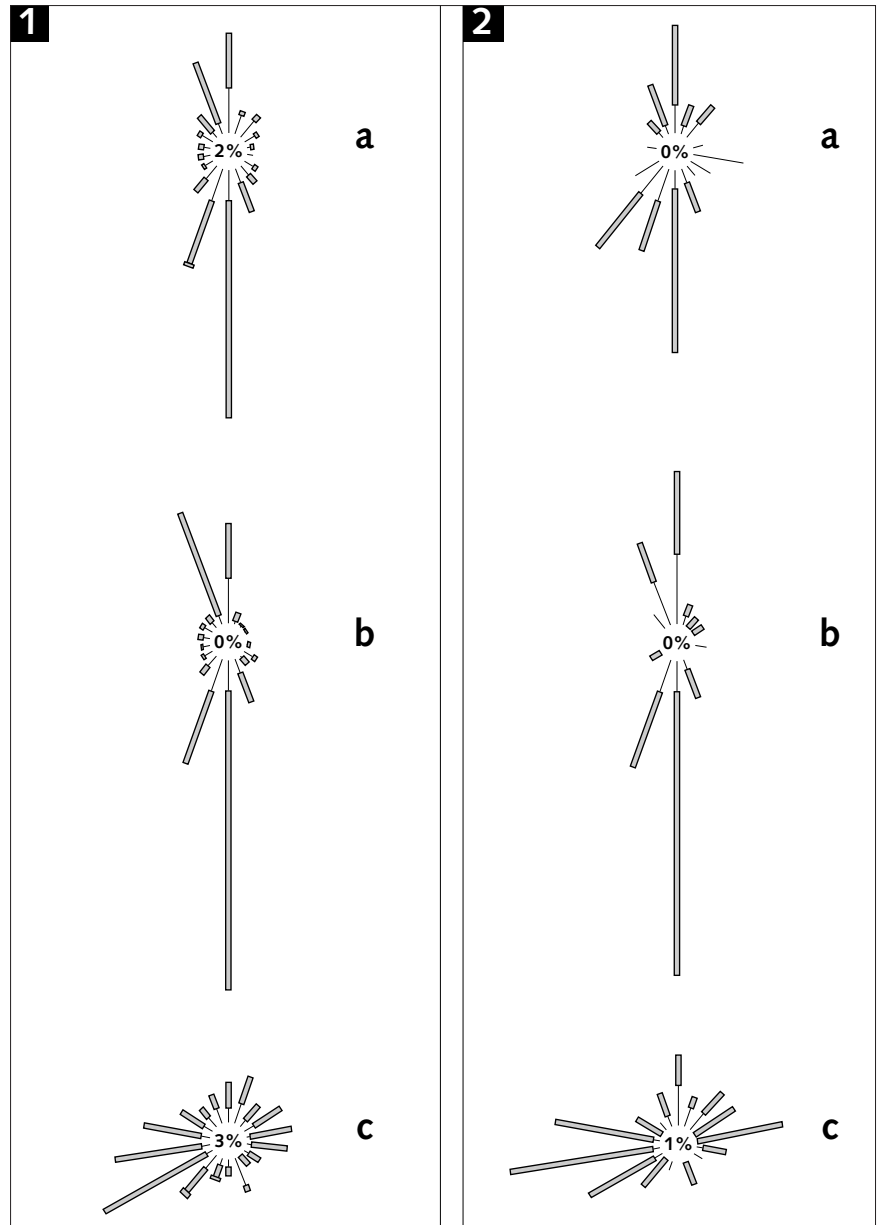
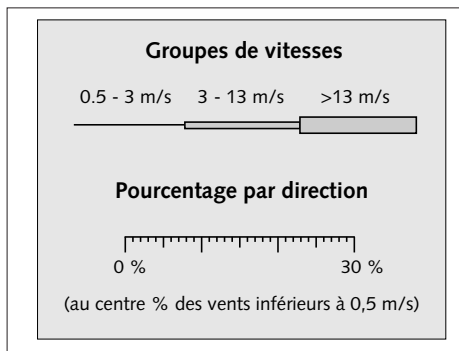
score prévisionnel = $100 \times (1 - \text{EQM prévision} / \text{EQM persistance})$.

Ce score est négatif lorsque la prévision est moins bonne que la persistance.



Figure 1 - Roses des vents à Fessenheim.
Observations à 0 h UTC (a),
prévisions à 24 heures d'échéance
par adaptation statistique (b)
et sorties directes de Périidot (c)
sur le fichier de reconnaissance glissante
(469 cas). Notons que Fessenheim est situé
dans la plaine d'Alsace. Les prévisions par
adaptation statistique permettent
de retrouver l'orientation caractéristique
nord-sud des vents dans cette vallée.

Figure 2 - Idem figure 1
pour un fichier test de 82 cas.



Le tableau 1 récapitule les scores obtenus pour les trois sites et les deux échéances, sur le fichier de reconnaissance glissante. Sur le fichier test, les résultats sont comparables ; mais, étant donné le faible nombre de cas considérés, on

	Vitesse prévue par adaptation statistique	Vitesse prévue par Périidot	Direction prévue par adaptation statistique	Direction prévue par Périidot
Le Bugey 12 h (267 cas)	27 %	11 %	58 %	30 %
Le Bugey 24 h (268 cas)	29 %	2 %	62 %	33 %
Chooz 12 h (257 cas)	27 %	- 16 %	1 %	- 20 %
Chooz 24 h (254 cas)	46 %	- 55 %	39 %	24 %
Fessenheim 12 h (443 cas)	47 %	32 %	47 %	19 %
Fessenheim 24 h (442 cas)	40 %	12 %	48 %	1 %

Tableau 1 - Comparaison des scores obtenus par l'adaptation statistique et par les prévisions directes du modèle Périidot pour les trois sites et les deux échéances. Scores calculés sur le fichier de reconnaissance glissante.



a	Le Bugey	Chooz	Fessenheim
Adaptation statistique 12 h	25 % (110 cas)	15 % (74 cas)	34 % (221 cas)
Péridot 12 h	20 % (110 cas)	26 % (74 cas)	5 % (221 cas)
Adaptation statistique 24 h	39 % (79 cas)	27 % (33 cas)	59 % (196 cas)
Péridot 24 h	23 % (79 cas)	21 % (33 cas)	4 % (196 cas)
b	Le Bugey	Chooz	Fessenheim
Adaptation statistique 12 h	69 % (110 cas)	53 % (74 cas)	81 % (221 cas)
Péridot 12 h	52 % (110 cas)	58 % (74 cas)	18 % (221 cas)
Adaptation statistique 24 h	85 % (79 cas)	64 % (33 cas)	86 % (196 cas)
Péridot 24 h	49 % (79 cas)	61 % (33 cas)	11 % (196 cas)

Tableau 2a et 2b - Comparaison des prévisions de la direction du vent par adaptation statistique et par le modèle Péridot, pour les trois sites et les deux échéances. Fréquences des erreurs inférieures à 10 degrés (a) et à 30 degrés (b). Scores calculés sur le fichier de reconnaissance glissante.

préférer ne présenter que les résultats obtenus par reconnaissance glissante. De façon générale, il apparaît que les scores sont nettement meilleurs pour l'adaptation statistique que pour Péridot, aussi bien en direction qu'en vitesse. Notons que la faiblesse du nombre de cas considérés pour la direction du vent provient de l'élimination des cas où le vent est inférieur à 4 m/s.

Nous avons aussi caractérisé la qualité de la prévision de la direction du vent en définissant deux classes d'erreurs (moins de 10 degrés et moins de 30 degrés). Les résultats obtenus pour chacun de ces seuils, sur le fichier de reconnaissance glissante, sont contenus dans le tableau 2.

Excepté pour Chooz à l'échéance 12 h, les fréquences de cas bien prévus par la méthode statistique surpassent celles de Péridot. Pour le seuil de 30 degrés, on a de 53 % à 86 % de cas bien prévus avec l'adaptation statistique.

Prévision par adaptation statistique

Prévision \ Observation	1	2	3	4	5	6	7	Total
1	184 39,2	66 14,1	1 0,2	0 0	0 0	0 0	0 0	251 53,5
2	55 11,7	81 17,3	3 0,6	0 0	0 0	0 0	0 0	139 29,6
3	55 11,7	81 17,3	3 0,6	0 0	0 0	0 0	0 0	68 14,5
4	0 0	4 0,9	3 0,6	1 0,2	0 0	0 0	0 0	8 1,7
5	0 0	0 0	1 0,2	1 0,2	0 0	0 0	0 0	2 0,4
6	0 0	0 0	0 0	1 0,2	0 0	0 0	0 0	1 0,2
7	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Total	248 52,9	188 40,1	27 5,8	6 1,3	0 0	0 0	0 0	469 100,0

Prévision de Péridot

Prévision \ Observation	1	2	3	4	5	6	7	Total
1	142 30,3	85 18,1	17 3,6	6 1,3	1 0,2	0 0	0 0	251 53,5
2	41 8,7	60 12,8	33 7,0	4 0,9	1 0,2	0 0	0 0	139 29,6
3	8 1,7	13 2,8	25 5,3	15 3,2	4 0,9	3 0,6	0 0	68 14,5
4	0 0	3 0,6	2 0,4	1 0,2	1 0,2	1 0,2	0 0	8 1,7
5	0 0	0 0	0 0	1 0,2	0 0	1 0,2	0 0	2 0,4
6	0 0	0 0	0 0	0 0	1 0,2	0 0	0 0	1 0,2
7	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0	0 0
Total	191 40,7	161 34,3	77 16,4	27 5,8	8 1,7	5 1,1	0 0	469 100,0

Tableau 3 - Comparaison des prévisions de la vitesse du vent par l'adaptation statistique et par le modèle Péridot pour Fessenheim à échéance 24 heures. On utilise 7 classes de vitesse numérotées de 1 à 7 : < 3,8 ; 3,9 - 6,4 ; 6,5 - 9 ; 9,1 - 11,5 ; 11,6 - 14,1 ; 14,2 - 16,7 ; > 16,8 (m/s). Dans chacune des cases de ces tableaux de contingence, la première ligne correspond au nombre de cas et la deuxième ligne à la fréquence correspondante.

Les prévisions de vitesse du vent ont été vérifiées suivant une méthode d'analyse de table de contingence, en définissant sept classes de vitesse en accord avec le « National Verification Plan » (National Weather Service, 1982). Le tableau 3 présente les tables de contingence relatives à Fessenheim à 24 h d'échéance pour la prévision statistique et pour la prévision Périidot, sur le fichier de reconnaissance glissante.

Le tableau 4 rassemble les pourcentages de prévisions correctes toutes classes confondues. Il apparaît que l'adaptation statistique a tendance à sous-estimer la vitesse du vent et le modèle Périidot à la surestimer. Le pourcentage des prévisions correctes avec la méthode statistique est assez élevé et nettement meilleur qu'avec le modèle Périidot, sauf pour le site de Fessenheim à 12 h d'échéance.

	Le Bugey	Chooz	Fessenheim
Prévision statistique 12 h	58 % (358 cas)	69 % (318 cas)	58 % (469 cas)
Prévision Périidot 12 h	51 % (358 cas)	56 % (318 cas)	61 % (469 cas)
Prévision statistique 24 h	76 % (359 cas)	82 % (318 cas)	61 % (469 cas)
Prévision Périidot 24 h	53 % (359 cas)	35 % (318 cas)	49 % (469 cas)

Tableau 4 - Pourcentages de prévisions correctes de la vitesse du vent, toutes classes de vitesse confondues, pour les trois sites et les deux échéances.

CONCLUSION

D'après l'ensemble des résultats obtenus, la méthode d'adaptation statistique retenue conduit à des prévisions de vent à 24 h d'échéance de meilleure qualité que la prévision brute élaborée par le modèle Périidot. Cela démontre l'utilité d'une telle approche. À 12 h, globalement, la qualité est également meilleure, mais de façon moins notable, surtout si l'on considère des classes de direction pour Chooz ou des classes de vitesse pour Fessenheim. Cette moindre amélioration des prévisions à 12 h provient sûrement du fait qu'à 12 h UTC, la variabilité du vent est plus forte qu'à 0 h UTC. En milieu de journée, il y a en effet une grande majorité de situations instables pour lesquelles le vent est certainement plus difficilement prévisible que dans les cas stables.

La qualité satisfaisante des prévisions élaborées par la méthode statistique permet d'envisager une généralisation de cette méthode à l'ensemble des centres météorologiques de Météo-France et des sites de production nucléaire. Les résultats de ces adaptations statistiques pourraient alors servir d'ébauche et de base de travail aux météorologistes chargés de la prévision du vent en ces points.

Remerciements

Je remercie Frédéric Chavaux pour ses précieux conseils et sa participation à cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Bergot T. et D. Guedalia, 1996 : Évaluation de la qualité de la prévision du brouillard par un modèle numérique. *La Météorologie* 8^e série, 14, 27-35.
- Der Mégréditchian G., 1993 : Le traitement statistique des données multidimensionnelles, application à la météorologie. Tome 2. Météo-France, Cours et manuels n° 9, Toulouse, 260 p.
- Glahn H. R., 1970 : A method for predicting surface winds. ESSA Technical Memorandum WBTM TDL29.
- Marais C., 1988 : Évaluation de la qualité de la prévision Périidot des vents à 10 m et 80 m par comparaison avec les vents mesurés sur les sites nucléaires. Contrôles et diagnostics n° 6, Météo-France, Toulouse.



Marais C. et L. Musson-Genon, 1992 : Forecasting the surface weather elements with a local dynamical adaptation method using a variational technique. *Monthly Weather Review*, 12, 1035-1049.

Marais C. et F. Chavaux, 1995a : Préviation de vent sur les centrales nucléaires, Climatologie. Rapport d'étude n° OSETUE00074. Disponible auprès de l'auteur.

Marais C. et F. Chavaux, 1995b : Préviation de vent sur les centrales nucléaires, Adaptation statistique. Rapport d'étude n° OSETPV00100. Disponible auprès de l'auteur.

National Weather Service, 1982 : National Verification Plan. NOAA, US Dept. of Commerce, États-Unis.

Pottier P., 1990 : Prévisions de température par adaptation statistique du modèle Périidot. *La Météorologie 7^e série*, 32, 22-32.

Tomassone R., A. Audrain, E. Lesquoy et C. Millier, 1992 : *La régression, nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique*. Masson, Paris, 192 p.

