

## ESTIMATION DES TEMPÉRATURES MINIMALES DANS LES VALLÉES DES ARDENNES BELGES

**M. VANDIEPENBEECK**

*Institut Royal Météorologique de Belgique  
Av. Circulaire, 3 - 1180 Bruxelles Belgique  
[marc.tandiepenbeeck@oma.be](mailto:marc.tandiepenbeeck@oma.be)*

### Résumé

Lors de certains types de temps, les températures minimales observées dans les vallées sont nettement inférieures à celles mesurées sur les hauteurs environnantes. En effet, l'air froid, plus lourd que l'air chaud s'écoule le long des flancs de la vallée et crée un lac d'air froid dans le fond de celle-ci. Le but de cet article est double : faire une estimation des températures minimales dans un modèle de prévision et faire une estimation des valeurs possibles dans une vallée lors du contrôle de qualité des observations. La méthode utilisée consiste à établir des régressions linéaires multiples avec comme variables indépendantes les observations de la température minimale, la vitesse moyenne sur 10 minutes du vent à 6 h T.U., la nébulosité et la pression atmosphérique à la même heure à la station de Saint-Hubert et comme variable dépendante la température minimale relevée à Rochefort dans la vallée de la Lesse. On établit une régression pour chaque mois calendrier en ne retenant que les variables indépendantes significatives.

### Abstract

At the time of some weather types, the minimal temperatures observed in the valleys are clearly lower than those measured on the surrounding heights. Indeed, the cold air, heavier than the hot air, runs out along the sides of the valley and creates a lake of cold air in the bottom of this one. The aim of this paper is double: to make an estimate of the minimal temperatures in a forecasting model and to make an estimate of the possible values in a valley during the quality control of the observations. The method used consists in establishing multiple linear regressions with as independent variables the observations of the minimal temperature, the mean velocity over 10 minutes of the wind with 6 H TU., nebulosity and the atmospheric pressure per same hour at the station of Saint-Hubert and as dependent variable the minimal temperature recorded in Rochefort in the valley of Lesse. A regression is calculated for each month calendar by retaining only the significant independent variables.

**Mots-clés** : Topoclimatologie, statistique, modèle, prévision.

**Keywords** : Topoclimatology, statistics, model, forecast.

### Introduction

La topographie a une grande importance dans la variation spatiale des températures et plus particulièrement sur les températures minimales de la nuit. Lorsque le temps est calme et le ciel bien dégagé, l'air froid s'accumule dans les vallées, dans les cuvettes ou au bas des coteaux. En fin de nuit, les températures peuvent être très basses et souvent, elles sont même largement inférieures aux températures mesurées au bord supérieur de la vallée ou sur le plateau avoisinant (Erpicum, 1983). En revanche, lorsque le temps est plus instable, il fait plus froid en altitude (Hufty, 2001). Les conditions météorologiques caractéristiques pour observer une inversion de températures dans les vallées correspondent à des situations anticycloniques. C'est en effet avec ce type de temps que l'atmosphère est stable : peu de vent et une nébulosité peu importante voire nulle sur le plateau; il n'est pas rare que des brouillards se forment dans le fond des vallées dans ce type de temps. C'est ainsi que la température minimale la plus basse enregistrée en Belgique l'a été dans une vallée (Rochefort, 193 m) et non sur le point culminant de la Belgique (Botrange, 694 m) (Sneyers et Vandiepenbeeck, 1995).

Si l'on parvient à estimer les différences possibles entre les hauteurs et les bas de vallées, entre des coteaux et des cuvettes, on aura des outils soit pour la prévision soit pour la vérification des températures en ces sites particuliers. Dans le premier cas, la maille des résultats des modèles de prévisions est généralement grande. Même le modèle à mailles fines, comme Aladin - Belgique avec une maille de 7 km \* 7 km, peut gommer les effets d'une vallée. Il est donc intéressant pour le prévisionniste de pouvoir disposer d'une méthode d'estimation des minima possibles dans ces sites particuliers en fonction des circonstances atmosphériques prévues. Dans le deuxième cas on peut par la même méthode obtenir un outil d'aide à la vérification des températures minimales observées dans ces stations où la topographie a une influence très importante sur le comportement de l'évolution des températures au cours de la nuit.

À partir des observations, on cherchera des corrélations entre la température minimale mesurée dans une vallée et la température minimale mesurée sur une hauteur avoisinante. En partant de la température minimale dans la station d'altitude, on va ajouter des variables explicatives supplémentaires qui pourraient aider à prévoir ou à vérifier les températures minimales dans les fonds de vallées ou de cuvettes.

## 1. Conditions d'application

On établira une relation entre la température minimale observée dans la vallée et celle sur une hauteur avoisinante en ajoutant d'autres paramètres qui affineront le résultat :

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + ex_4 + \dots D_j$$

où  $y$  est la variable dépendante et  $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots$  sont les variables indépendantes, les  $a, b, c, d, \dots$  sont les coefficients de régression. On suppose que les variables aléatoires  $D_j$  sont normales, indépendantes, de moyenne nulle et de même variance (Dagnelies, 1973, 1975).

On peut considérer une relation de dépendance du même genre lorsque les variables  $x, y, \dots$  sont aléatoires. Il faut alors supposer en outre que ces variables sont toutes indépendantes des résidus  $D_j$ . De plus s'il existe une corrélation entre les variables explicatives, il ne faut pas que ces corrélations soient trop prononcées.

On peut considérer le cas de  $n$  variables aléatoires interdépendantes  $x_1, x_2, x_3, \dots$  dont on suppose que la distribution commune est une distribution normale à  $n$  dimensions. D'autres modèles peuvent être considérés de façon à tenir compte par exemple d'une éventuelle inégalité des variances des résidus  $D_j$  ou d'une éventuelle corrélation entre ces résidus.

## 2. Choix des variables

On tentera d'expliquer le comportement des températures minimales observées dans une vallée en fonction de différents paramètres météorologiques. Le premier paramètre qui vient naturellement est le minimum d'une station qui ne s'écarte généralement pas du minimum d'une station voisine.

Rochefort a été choisie comme station de vallée. Ce choix a été guidé par le fait qu'il existe, en plus des observations classiques, une mesure continue de la température. Cela permettait de lever toute ambiguïté de la part des correcteurs qui auraient pu modifier des valeurs qui leur semblaient trop différentes des stations voisines.

La station de plateau a été choisie parmi les stations synoptiques : elle mesure à intervalle régulier (toutes les heures) la température, la nébulosité, la vitesse moyenne du vent et la pression atmosphérique ainsi que d'autres paramètres. On a retenu comme valeur de la température minimale la même que celle qui est utilisée pour la station de vallée à savoir les minima observés à 6 heures du matin en temps universel (7 heures temps officiel en hiver, 8 h temps officiel en été), sur une période qui couvre les 24 heures qui précèdent l'observation.

Les calculs ont été réalisés sur la période de 1985 à 2001. Les régressions ont été élaborées par mois avec les valeurs quotidiennes des différents paramètres choisis.

La série est constituée de l'ensemble des températures minimales relevées à Saint-Hubert. Dans les deux cas les valeurs minimales correspondent au minimum relevé sur la période de 24 heures qui précède l'observation.

Comme nous l'avons suggéré dans l'introduction, nous allons ajouter comme variables explicatives supplémentaires la nébulosité ( $x_2$ ), la vitesse du vent ( $x_3$ ) et la pression atmosphérique ( $x_4$ ) mesurées à 6 h T.U. (Temps Universel). Le choix de cette heure provient du fait que dans une grande majorité des cas, la température minimale de la nuit se produit juste après le lever du Soleil. En effet, la température minimale va présenter un comportement particulier en fonction des conditions atmosphériques (Ercicum, 1979). Notre temps est fortement influencé par des conditions cycloniques, ce qui se traduit par une nébulosité importante comme nous le montre la **figure 1**.

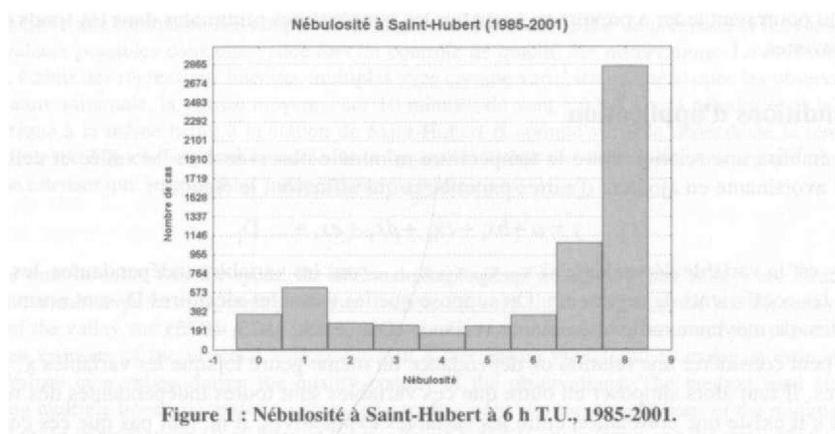


Figure 1 : Nébulosité à Saint-Hubert à 6 h T.U., 1985-2001.

Dans des conditions anticycloniques, on a généralement une nébulosité peu importante, une vitesse de vent peu élevée et une pression supérieure à 1020 hPa. Dans ces situations, les températures minimales dans les vallées peuvent être inférieures à celles observées aux stations dont l'altitude est plus grande. Ainsi, le 14 janvier 1985, on mesure un minimum de  $-16.9^{\circ}\text{C}$  à Saint-Hubert (550 m) alors que l'on note  $-22.4^{\circ}\text{C}$  à Rochefort (193 m) et  $-23.2^{\circ}\text{C}$  à Houyet (118 m).

Par situation cyclonique, on peut connaître deux types de comportements des températures minimales. La situation la plus classique correspond à des températures plus basses en altitude que dans les sites à faible élévation ; ce fut le cas le premier mai 1985 avec, à Rochefort, un minimum de  $4.5^{\circ}\text{C}$ , à Houyet, de  $5.0^{\circ}\text{C}$  et à Saint-Hubert, de  $1.8^{\circ}\text{C}$ . L'autre situation conduit à des températures similaires quelle que soit l'altitude : un temps très venteux amène un brassage très important des températures, un temps pluvieux peut également conduire à des températures assez homogènes quelle que soit l'altitude des stations. Au cours de la journée du 5 mai 1985, on mesurait un minimum de  $3.0^{\circ}\text{C}$  à Rochefort et de  $3.2^{\circ}\text{C}$  à Saint-Hubert, le minimum étant un peu plus élevé à Houyet où le thermomètre à minima avait indiqué  $4.6^{\circ}\text{C}$ .

Les données des températures minimales ont été extraites du fichier qui contient l'ensemble des données du réseau thermométrique belge. Les données relatives à la nébulosité, au vent et à la pression de Saint-Hubert sont extraites de la base de données synoptiques.

### 3. Régressions

La première opération consiste en l'examen des coefficients de corrélation entre les variables indépendantes : il est en effet inutile d'utiliser deux variables qui s'expliquent mutuellement ; si l'une est très corrélée avec une autre variable indépendante, l'autre le sera aussi (Dagnelies 1973, 1975). Les coefficients de corrélation des variables indépendantes sont donnés dans le **tableau 1**. Ils ont été obtenus à l'aide du logiciel Statistica de Stasoft.

L'examen de ce tableau montre qu'il y a peu de corrélation entre les variables indépendantes qui ont été sélectionnées pour la réalisation des régressions.

**Tableau 1 : Coefficients de corrélation entre les variables annuelles indépendantes du modèle.**

	Température minimale	Nébulosité	Vitesse moyenne du vent	Pression atmosphérique
Température minimale	1.000000	-.043175	-.162213	-.111673
Nébulosité	-.043175	1.000000	.123078	-.320989
Vitesse moyenne du vent	-.162213	.123078	1.000000	-.285246
Pression atmosphérique	-.111673	-.320989	-.285246	1.000000

On établit une relation de régression entre les variables indépendantes pour chaque mois à l'aide du programme Statistica. Pour chaque relation, on examine le "résumé de la régression". Dans l'exposé, on va utiliser le mois de janvier, mais on appliquera la même méthode pour chaque mois de l'année. Le résumé fournit pour ce mois de janvier est présenté dans le **tableau 2**.

Les coefficients Bêta sont les coefficients de régression qui seraient obtenus en effectuant une standardisation de toutes les variables afin d'obtenir pour chacune une moyenne égale à 0 et un écart-type égal à 1 (centrage-réduction). L'avantage des coefficients Bêta (sur les Coefficients B qui ne sont pas standardisés) est que l'importance de ces coefficients Bêta vous permet de comparer directement la contribution relative de chaque variable indépendante à la prévision de la variable dépendante.

La valeur du niveau p (en anglais : p-level, terme utilisé la première fois par Brownlee en 1960) représente un indice décroissant de la fiabilité d'un résultat. Plus le niveau p est élevé, et moins on peut croire que la relation observée entre les variables de l'échantillon est un bon indicateur de la relation entre les variables respectives dans la population. Plus précisément, le niveau p représente la probabilité d'erreur qui est liée à l'acceptation d'un résultat observé comme valide, c'est-à-dire comme "représentatif de la population". Par exemple, un niveau p de 0,05 (c'est-à-dire 1/20) indique qu'il existe une probabilité de 5% pour que la relation entre les variables trouvées dans notre échantillon soit une "coïncidence" ou "due à la chance".

**Tableau 2 : Coefficients de la régression pour la variable indépendante :  
Température minimale de Rochefort en relation avec quatre variables explicatives.**

	BETA	Erreur standard de BETA	B	Erreur standard de B	Niveau p
Ordonnée à l'origine			16.750	10.153	.099
Température minimale	.825	.0187	1.036	.0235	.000
Nébulosité	.171	.0191	.366	.0408	.000
Vitesse moyenne du vent	.0562	.0194	.145	.0499	.004
Pression atmosphérique	-.0382	.0199	-.019	.0098	.056

Le niveau p pour le paramètre "pression atmosphérique" est supérieur à 0,05, ce qui signifie que ce paramètre ne contribue pas beaucoup à la régression. La variance résiduelle de la régression, lorsqu'on utilise les 4 paramètres, est de 5,338. Les variances résiduelles pour chaque régression simple sont données dans le **tableau 3**.

**Tableau 3 : variances résiduelles des régressions simples.**

Paramètre	Variance résiduelle
Température minimale	6,57
Nébulosité	28,383
Vitesse moyenne du vent	33,575
Pression atmosphérique	33,597

Si l'on reconsidère la régression multiple sans faire intervenir la pression atmosphérique, on obtient dans le **tableau 4** les valeurs suivantes pour la régression :

**Tableau 4 : Coefficients de la régression pour la variable indépendante :  
Température minimale de Rochefort en relation avec trois variables explicatives.**

	BETA	Erreur standard de BETA	B	Erreur standard de B	Niveau p
Ordonnée à l'origine			-2.706	.367	.000
Température minimale	.825	.01 88	1.036	.0236	.000
Nébulosité	.182	.01 .82	.390	.0390	.000
Vitesse moyenne du vent	.0720	.01 77	.185	.0454	.000053

Tous les niveaux p sont inférieurs à 0,05; on peut donc utiliser les trois variables indépendantes pour la régression permettant d'évaluer la température minimale à Rochefort. Dans ce cas la variance résiduelle est 5,367, ce qui est à peine plus élevé que dans le cas où l'on tiendrait compte de la pression atmosphérique.

La régression pour le mois de janvier est donc la suivante :

$$t = -2.70647 + 1.03644 * th + 0.38957 * neb + 0.18499 * v \quad (1)$$

où

t = la température minimale à Rochefort

th = la température minimale à Saint-Hubert

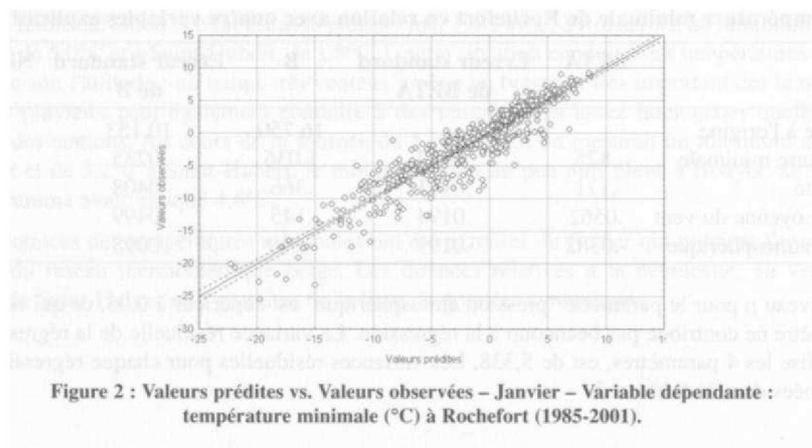
neb = la nébulosité à Saint-Hubert à 6 h T U.

v = la vitesse moyenne du vent sur 10 minutes à Saint-Hubert à 6 h TU.

t = température minimale estimée à Rochefort

tobs = température minimale observée à Rochefort

La **figure 2** montre pour le mois de janvier une comparaison entre les valeurs observées à la station de Rochefort et les valeurs estimées par l'équation (1) :



Le **tableau 5** reprend les coefficients des 12 régressions mensuelles. On remarque que la pression atmosphérique n'intervient pas dans les régressions des mois de janvier, juin, août et décembre.

**Tableau 5 : Coefficients des régressions établies pour chaque mois de l'année (les symboles sont décrits dans le texte).**

<i>mois</i>	<i>B</i>	<i>th</i>	<i>neb</i>	<i>vent</i>	<i>pression</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>Var res</i>
janvier	-2 706	1.036	0.390	0.185		0.853	5.367
février	28 827	0.941	0.409	0.254	-0.032	0.847	5.112
mars	51 610	0.849	0.426	0.239	-0.054	0.771	4.625
avril	27 445	0.830	0.482	0.259	-0.031	0.717	4.379
mai	35 085	0.840	0.402	0.263	-0.037	0.743	3.516
juin	-1 709	0.852	0.420	0.229		0.719	3.043
juillet	46 601	0.848	0.367	0.235	-0.047	0.751	2.616
août	-1 856	0.830	0.411	0.153		0.659	3.706
septembre	58 078	0.858	0.393	0.201	-0.060	0.662	4.721
octobre	35 923	0.900	0.451	0.140	-0.039	0.780	4.290
novembre	19 068	0.949	0.396	0.150	-0.022	0.820	4.335
décembre	-2 866	0.992	0.431	0.186		0.824	4.511

La variance résiduelle (*Var\_res*) est plus faible en été et elle est plus importante en hiver. En été les nuits sont courtes ; le refroidissement nocturne est de ce fait plus court ce qui réduit le nombre de cas où le fond de vallée est nettement plus froid qu'en hiver (Sneyers et Vandiepenbeeck, 1995).

#### 4. Exemples

Le **tableau 6** donne un exemple où l'on réalise l'estimation des températures minimales de Rochefort à partir des valeurs des variables indépendantes prévues par le modèle de l'ECMWF (Centre Européen pour les prévisions à moyen terme) à Saint-Hubert

**Tableau 6 : Valeurs estimées de la température minimale (°C) à Rochefort (t) en fonction des quatre variables indépendantes prévues pour Saint-Hubert et comparaison avec les valeurs observées à Rochefort (tobs).**

Date	th	neb	V	pression	t	tobs
24/8/02	13	7	2	1023	11	13.2
29/8/02	17	8	6	1021	16	17.8
30/8/02	13	6	2.5	1022	11	13.0
31/8/02	16	4	1	1021	13	12.2

#### 5. Remarques

La méthode n'est pas valable lorsque les minima appartiennent à la veille. C'est le cas lorsqu'on a un réchauffement suite au passage d'un front chaud. On ne peut plus utiliser la nébulosité, la vitesse moyenne du vent et la pression atmosphérique relevées à 6 h T. U. alors que les températures minimales correspondent à des valeurs qui se sont produites la veille.

Les valeurs observées sont le plus souvent du même ordre de grandeur que celles estimées. Mais dans certains cas, on peut avoir des divergences car le modèle ne tient pas compte de certains facteurs comme une nébulosité différente dans la vallée de celle sur le plateau; la présence de pluie à un ou aux deux postes d'observations, le fait que le vent puisse être important sur le plateau alors qu'il est faible dans la vallée ou encore une masse d'air plus humide dans la vallée (présence d'un cours d'eau)

que sur le plateau. La présence de neige sur les plateaux alors qu'elle est absente en basse altitude peut également perturber ce modèle. On peut lire dans Hufty (1966), d'autres raisons pour lesquelles la méthode des régressions linéaires multiples ne donnent pas toujours une bonne estimation des températures minimales dans une vallée à partir de la méthode décrite ci-dessus.

Le but du modèle est de donner un ordre de grandeur des températures minimales dans les vallées en fonction de certaines conditions atmosphériques. On a dès lors admis d'utiliser les nébulosités comme telles malgré la distribution très spéciale de cet élément. Si une plus grande précision est nécessaire, il faut utiliser un autre modèle pour tenir compte de la distribution spéciale de ce paramètre. Une autre méthode peut également être utilisée mais plus lourde d'emploi : au lieu de réaliser une régression par mois incluant la nébulosité, on réalisera 9 régressions pour respectivement chacune des classes de nébulosité.

### Conclusion

L'estimation des températures minimales dans des endroits à caractéristiques topographiques particulières est très utile pour l'examen des valeurs mesurées simultanément dans un réseau de stations thermométriques dans des régions topographiques différentes. Cela permet d'éviter de corriger des valeurs qui de prime abord pourraient être considérées comme aberrantes.

Comme tout outil, bien utilisée, cette méthode peut être très performante aussi bien dans le domaine de la prévision que dans le domaine de la vérification de données !

### Bibliographie

- BRO WNLEE, K. A., 1960 : *Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering*, John Wiley, New-York.
- DAGNELIE P., 1973 : *Théorie et méthodes statistiques*, vol. 1, Les Presses Agronomiques de Gembloux.
- DAGNELIE P., 1975 : *Théorie et méthodes statistiques*, vol. 2, Les Presses Agronomiques de Gembloux.
- DAGNELIE P., 1973 : *Analyse statistique à plusieurs variables*, Les Presses Agronomiques de Gembloux.
- ER P I C U M M . , 1983 : Analyse et interprétation des contrastes thermiques "plateau - vallée" en Haute-Belgique en fonction de la situation atmosphérique générale et de la connaissance de paramètres climatiques du rayonnement et de la stabilité de l'air, *Prace Geograficzne*. **57**, p. 199-205.
- ERPICUM, M., 1979 : Le climat de vallée en Haute-Belgique. Analyse en fonction des types de temps, *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, **15**, p. 143-155.
- HUFTY A., 1966 : *Les climat locaux dans la région liégeoise*, thèse de doctorat, Université de Liège.
- HUFTY A., 2001 : *Introduction à la climatologie*, De Boeck Université.
- SNEYERS R. et VANDIEPENBEECK M., 1995 : *Notice sur le climat de Belgique*, Publication scientifique n° 2, IRM .