

A close-up photograph of a human eye, where the iris is replaced by a detailed image of the Earth. The eye is looking directly at the viewer, and the eyelashes are clearly visible. The overall color palette is cool, with blues and greys.

# Vigilance **Climatique**

Institut royal météorologique de Belgique

## Remerciements

Nous dédions cette publication aux générations successives d'observateurs à l'IRM et ailleurs dans le pays, dont les nombreux volontaires du réseau climatologique qui le plus souvent plein d'enthousiasme ont contribué au travail opérationnel et au travail scientifique de notre établissement fédéral.

## Auteurs

Coordination générale et introduction : François Brouyaux

**Chapitre 1** : Christian Tricot, Luc Debontridder, Andy Delcloo et Marc Vandiepenbeeck

### Chapitre 2 :

1. Steven Dewitte, Anne Cheymol et Alexandre Joukoff
2. Steven Dewitte, Anne Cheymol et Alexandre Joukoff
3. Hugo De Backer et Andy Delcloo
4. Joseph Hus et Roeland Van Malderen

**Chapitre 3** : Stéphane Vannitsem et Emmanuel Roulin

**Chapitre 4** : François Brouyaux et Bernard Mohymont

Conclusions : François Brouyaux

## INTRODUCTION

Ainsi que les autres services météorologiques du monde entier, l'Institut royal météorologique de Belgique joue un rôle crucial dans la surveillance des phénomènes météorologiques, mais aussi dans le monitoring du climat<sup>1</sup>. Classiquement, si la météorologie est le suivi du temps qu'il fait au jour le jour, la climatologie est l'étude des propriétés statistiques du temps qu'il fait sur un territoire donné. Regroupés au sein de l'OMM<sup>2</sup> fondée il y a un peu plus de 50 ans, les services météorologiques nationaux participent à un réseau d'échange de données et d'expériences<sup>3</sup>. Ces échanges démontrent tous les jours leur importance et leur efficacité. En effet, grâce à cette coopération internationale et aux avancées dans les connaissances scientifiques qui l'ont accompagnée, nombre d'événements météorologiques dommageables sont aujourd'hui prévisibles à plusieurs jours d'échéance (songeons aux cyclones tropicaux, par exemple). C'est ce qui permet aux autorités publiques de décider en connaissance de cause des mesures de précaution pour diminuer l'impact de tels phénomènes<sup>4</sup>.

De plus, les données récoltées par les services météorologiques au quotidien sur terre et sur mer, par ballon sonde ou plus récemment à l'aide de satellites depuis l'espace, permettent de mieux en mieux de suivre aussi les évolutions du climat à l'échelle planétaire.

Dans les années 1950-1960, en analysant les séries d'observations thermométriques en surface récoltées entre la fin du 19<sup>e</sup> siècle et les années 1940, les climatologues ont notamment mis en évidence une hausse significative de la température moyenne annuelle de l'ordre d'1 °C dans le nord de l'Europe. Ce réchauffement est également visible dans les données de température à Uccle (cf. chapitre 1).

Ensuite, dans les années 1970, l'analyse des données des années 1950-1960 montra au contraire un léger refroidissement en moyenne dans l'Hémisphère Nord et certains n'hésitèrent pas à prédire le retour à un nouvel « Age Glaciaire ». Ce refroidissement sera de courte durée, mais certains hivers particulièrement rigoureux marqueront les esprits<sup>5</sup>.

Depuis 1975 environ, un nouveau réchauffement à l'échelle mondiale est nettement visible dans les données moyennes de température des Hémisphères Nord et Sud. Dans notre pays, ce nouveau réchauffement s'est produit dans les années 1980 avec une amplitude similaire au réchauffement observé au début du 20<sup>e</sup> siècle (de l'ordre d'1 °C).

Dès le milieu des années 1960, mais surtout depuis les années 1980, les climatologues ont progressivement mis au point des modèles climatiques de plus en plus sophistiqués avec lesquels ils essayent de comprendre le comportement du système climatique. Cette nouvelle discipline, la climatologie dynamique, connaît depuis lors un fort développement et mobilise des équipes pluridisciplinaires de scientifiques.

La médiatisation des changements de climat a débuté à la fin des années 1980 (suite à une période de sécheresse exceptionnelle en 1988 aux USA). Cela a coïncidé avec les préoccupations grandissantes d'une partie de l'opinion face aux problèmes environnementaux qui se manifestaient à l'échelle globale. Cette médiatisation s'est poursuivie et s'est même amplifiée jusqu'à aujourd'hui.

En parallèle, dès les années 1980, se sont mis sur pied des programmes de recherche internationaux sur les changements de climat, entre autres sous les auspices de l'OMM. Depuis lors, le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (le GIEC ou IPCC en anglais) rassemblant un grand nombre de scientifiques de différentes disciplines s'efforce de diffuser une synthèse la plus consensuelle possible de ses travaux auprès des décideurs.

<sup>1</sup> L'Institut est aidé dans cette mission par un réseau d'observateurs volontaires répartis sur l'ensemble du territoire fédéral et par les observateurs professionnels des services météorologiques de la Force aérienne et de Belgocontrôle.

<sup>2</sup> Organisation météorologique mondiale, organisme spécialisé des Nations-Unies, dont le siège est situé à Genève.

<sup>3</sup> Le principe de ces échanges avait été consacré lors de la toute première conférence internationale de météorologie marine en 1853 à Bruxelles.

<sup>4</sup> Soulignons notamment à ce propos, à titre d'exemple, la collaboration entre l'IRM et les Services régionaux surveillant le débit des rivières qui permet la prévention des inondations.

<sup>5</sup> Les froids des hivers 1953-54, 1962-63... furent particulièrement meurtriers en Belgique et ailleurs.



Sur son site internet<sup>6</sup>, voici comment le GIEC se présente :

- « Conscients du problème que pourrait poser le changement climatique à l'échelle du globe, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) ont créé, en 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont peuvent faire partie tous les membres de l'ONU et de l'OMM.
- Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue.
- L'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique... »

Les rapports du GIEC (parus en 1990, 1995, 2001 et 2007) se composent de 3 parties. En février 2007, un résumé de la première partie portant sur les bases physiques des changements climatiques et destiné aux décideurs a été publié à Paris<sup>7</sup>. Le résumé de la partie portant sur les impacts a été publié en avril 2007 à Bruxelles, celui sur les moyens d'atténuation à Bangkok au début du mois de mai et finalement celui sur les moyens d'adaptation en novembre 2007 à Valence.

Dans ce contexte, il a paru opportun à l'IRM d'informer le grand public et les décideurs belges de l'apport scientifique et opérationnel de l'IRM aux efforts collectifs internationaux de veille climatique, ainsi qu'aux progrès dans la compréhension des bases physiques de « notre » climat.

Le lecteur trouvera dans «Vigilance climatique» :

1. La description des principales évolutions climatiques décelables en Belgique par l'analyse des séries de données de température, précipitations, neige, vent, durée d'insolation, objet du chapitre 1.
2. Les apports des recherches scientifiques que poursuit l'IRM à l'échelle internationale dans le domaine du climat (activité solaire, aérosols, ozone, climatologie dynamique, impacts hydrologiques des changements climatiques...), objets des chapitres 2 et 3.
3. Une présentation de certaines de nos activités opérationnelles pertinentes dans le cadre de la prévention des phénomènes extrêmes ou de l'aide aux décisions visant à l'adaptation de notre société à sa vulnérabilité face à un climat changeant, objet du chapitre 4.

Actuellement, comme on le verra au chapitre 2, certains satellites (européens et autres) sont équipés d'instruments conçus par les chercheurs de l'IRM. Ces instruments récoltent une moisson de nouvelles données et certains programmes de recherches financés notamment par la Belgique permettent à l'IRM de contribuer à une approche rigoureuse, prudente et de plus en plus fine du système climatique. De nouvelles approches de nos rapports aux « caprices de la météorologie » ont vu le jour à l'IRM ces dernières années. Cette contribution de l'IRM devrait se poursuivre et s'étendre à l'avenir pour le bien commun.

A l'heure actuelle, les modèles climatiques globaux les plus développés ont tous souligné la très grande probabilité que le réchauffement planétaire entamé dès le début du 20<sup>e</sup> siècle se poursuive dans le futur. Encore relativement grossièrement esquissée dès les années 1980, cette hypothèse semble confirmée par les modèles les plus récents, ainsi que par les observations instrumentales ou autres<sup>8</sup> de par le monde.

Il ne faudrait pas pour autant croire achevée la compréhension des mécanismes à l'œuvre dans le système climatique, ni négliger la poursuite des recherches et la surveillance des différents paramètres climatiques. Soulignons à ce propos le caractère incontournable de la confrontation des modèles climatiques avec la réalité de l'évolution des climats terrestres.

---

<sup>6</sup> <http://www.ipcc.ch>

<sup>7</sup> Le 4<sup>e</sup> rapport complet du GIEC sur les bases physiques comporte plus de 1300 pages. Notons que son résumé à l'intention des décideurs n'en compte qu'une dizaine.

<sup>8</sup> Citons l'exemple des observations phénologiques qui relèvent une évolution de la distribution géographique ou du cycle annuel du développement de certaines plantes.



## PLAN

Plan	
Introduction	3
Chapitre 1. L'évolution du climat en Belgique	6
1. Introduction	6
2. Tendances climatiques	6
3. Résumé	23
4. Perspectives	24
Chapitre 2. Quelques éléments du système climatique étudiés à l'IRM	25
1. Introduction	25
2. Le rayonnement solaire et le rôle des aérosols	27
3. L'ozone	35
4. Autres données du climat mesurées par l'IRM	39
Chapitre 3. Recherches sur la prévision et la modélisation climatiques	41
1. Généralités sur la prévision du temps et du climat	41
2. Etude d'impact hydrologique	47
3. Conclusion	50
Chapitre 4. L'aide à la décision et à l'adaptation	51
1. Phénomènes extrêmes et adaptation au climat	51
2. Etude de scénarios climatiques : le projet « 3INBO »	54
Conclusions	55
Pour en savoir plus	56

# Chapitre 1. L'évolution du climat en Belgique

## 1. Introduction

Le climat de notre pays a-t-il changé ? Change-t-il ? Les pluies orageuses sont-elles plus abondantes, plus fréquentes ? Y a-t-il plus de vagues de chaleur ? Voici quelques exemples de questions souvent posées à l'IRM depuis que la problématique des changements de climat revient régulièrement à la une des médias.

Pour essayer de répondre à ces questions, nous présenterons dans le présent chapitre le résultat de plusieurs analyses de tendance sur le 20<sup>e</sup> siècle menées pour une série de paramètres climatologiques. L'étude du climat d'une région et de son évolution n'est cependant possible que si l'on dispose de séries d'observations de bonne qualité et de longueur suffisante. Dès lors, avant de présenter les résultats des analyses de tendance, nous décrirons brièvement les principaux réseaux d'observations dont les informations peuvent être utilisées par les scientifiques.

En Belgique, les plus longues séries de relevés climatologiques sont les séries d'observations effectuées de manière régulière depuis 1833 dans la région bruxelloise, tout d'abord à Saint-Josse-ten-Noode (à l'ancien emplacement de l'Observatoire de Belgique), puis ensuite à Uccle à partir de 1886. C'est en effet à cette époque que l'Observatoire fut déplacé en périphérie sud de la ville pour garantir un meilleur environnement pour les observations astronomiques. Ainsi, on dispose de séries de mesures de plus de cent ans pour la température et l'humidité de l'air, la quantité et le nombre de jours de précipitations, la pression, la vitesse du vent, la durée d'ensoleillement, le nombre de jours de neige et l'enneigement du sol.

L'IRM a réalisé des études de qualité approfondies sur les séries d'observations de Saint-Josse-ten-Noode/Uccle pour « homogénéiser » au mieux ces séries. L'homogénéisation d'une série climatologique consiste à éliminer les tendances temporelles qui apparaissent dans la série du fait de divers facteurs non climatiques<sup>9</sup>. À titre d'exemple, le déplacement de la station de Saint-Josse-ten-Noode vers le site d'Uccle a introduit une modification dans les valeurs des températures du fait d'un changement des caractéristiques environnementales (altitude, dégagement du site...). Pour remédier à cela, des mesures de températures ont été menées en parallèle sur les deux sites de 1886 à 1890. Après analyse des différences entre les mesures conjointes, les températures moyennes mensuelles mesurées à Saint-Josse-ten-Noode de 1833 à 1885 ont été « corrigées » pour les « raccorder » aux relevés effectués par la suite à Uccle. Grâce à ce travail, on dispose ainsi d'une série thermométrique de plus de 150 ans dont l'analyse permet de déceler, sur cette période, une éventuelle tendance climatique pour la température dans la région bruxelloise.

Des renseignements très utiles pour l'étude des climats régionaux et de leur évolution sont tirés des données de mesures fournies par le réseau climatologique belge. Ce réseau, qui compte aujourd'hui plus de 250 stations, a vu le jour dans les années 1870. Il est composé d'observateurs quasi bénévoles qui effectuent consciencieusement tous les jours, vers 8 heures du matin, un certain nombre de relevés, dont la quantité de précipitations tombées en 24 heures et, pour certains d'entre eux, les températures extrêmes atteintes au cours de la journée. L'intérêt de ce réseau est de couvrir l'ensemble du territoire belge, mais l'homogénéité des séries est moins assurée que dans le cas d'Uccle et le nombre de stations pour lesquelles on dispose de séries de plus de 50 ans est relativement restreint.

Enfin, sur les aérodromes de la Force Aérienne (aviation militaire) et de Belgocontrol (aviation civile), des observateurs professionnels suivent à tout moment l'évolution du temps et transmettent à l'IRM de précieuses informations à ce sujet. La quinzaine de stations concernées sont, pour la plupart, opérationnelles depuis plusieurs décennies ; leur site de mesures est souvent bien dégagé, hors de l'influence perturbatrice d'obstacles trop proches.

## 2. Tendances climatiques

L'analyse statistique des plus longues séries climatologiques de Saint-Josse-ten-Noode/Uccle et des séries de données de quelques autres stations dans le pays permet à l'IRM d'assurer la « surveillance » du climat belge et l'analyse de son évolution.

<sup>9</sup> On dit que de tels facteurs sont à l'origine d'« hétérogénéités » dans la série.

Dans le contexte actuel de l'étude des changements climatiques à l'échelle planétaire, de nombreuses questions sur l'évolution du climat belge sont régulièrement posées à l'IRM par le public, les médias, le monde économique et les autorités publiques. Les questions générales les plus fréquentes sont les suivantes :

- La température augmente-t-elle ?
- Y a-t-il plus de vagues de chaleur ?
- Y a-t-il moins de vagues de froid ?
- Pleut-il plus ou moins ?
- Les pluies intenses sont-elles plus fréquentes ? Plus importantes ?
- Y a-t-il moins de neige ?
- Les périodes de sécheresse sont-elles plus longues ?
- Y a-t-il plus de tempêtes ?
- L'ensoleillement a-t-il changé ?

Pour essayer de répondre à ces questions, nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de plusieurs analyses des plus longues et plus fiables séries d'observations disponibles pour caractériser le climat de notre pays et son évolution.

### La température augmente-elle ?

La température et son évolution intéressent plusieurs domaines ou secteurs d'activités, comme par exemple ceux de l'agriculture, de la consommation énergétique, de la surmortalité des populations à risque et de la distribution géographique de la faune.

Pour répondre à la question posée, le plus intéressant est d'examiner les longues séries de températures de Saint-Josse-ten-Noode et d'Uccle. La figure 1 donne tout d'abord l'évolution entre 1833 et 2007 de la température moyenne annuelle. On observe un réchauffement d'environ 2 °C sur l'ensemble de la période considérée. L'élévation de la température ne fut pas régulière; elle se produisit en deux étapes relativement abruptes : une première augmentation très significative<sup>10</sup> vers 1910 et une seconde, également très significative, à la fin des années 1980. Dans les deux cas, l'augmentation de température fut de l'ordre de 1 °C. Les différentes périodes de relative stabilité de la température sont représentées sur la figure 1 par des segments de droite horizontales, qui donnent la valeur moyenne de la température moyenne annuelle sur chacune de ces périodes.

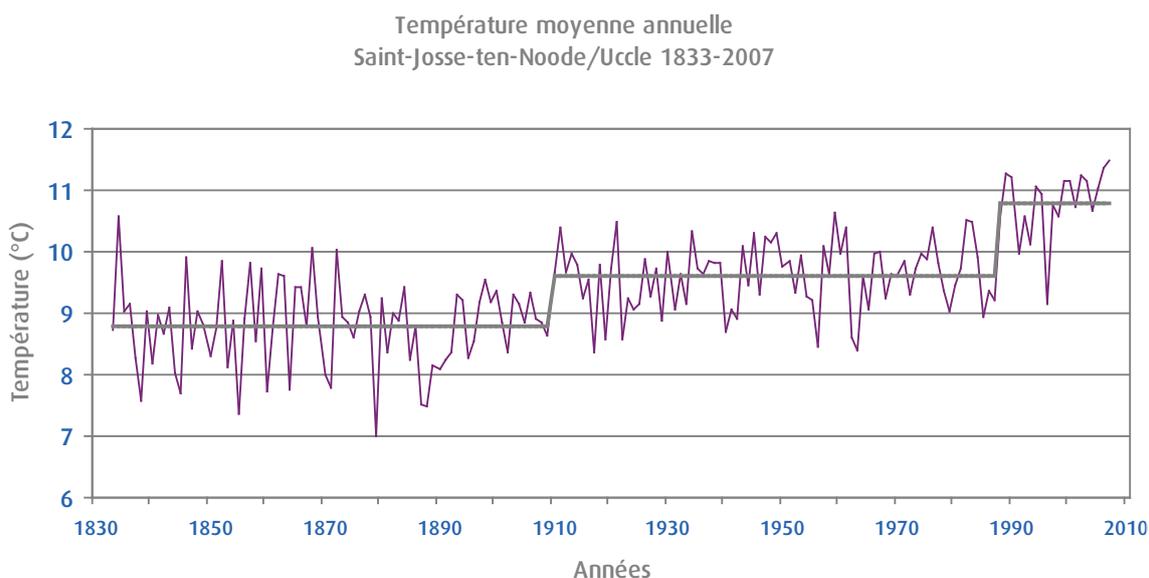


Figure 1. Température moyenne annuelle (en °C) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2007. La courbe en violet donne les valeurs annuelles du paramètre et les lignes horizontales en gris donnent les valeurs moyennes du paramètre sur les différentes périodes au cours desquelles ses valeurs annuelles furent relativement stables autour de ces moyennes.

<sup>10</sup> Nous renvoyons à l'encadré « Détection statistique d'une modification climatique » pour une définition du caractère « très significatif » ou « significatif » d'une modification d'un paramètre dans une série temporelle.

L'examen des séries de températures saisonnières indique que les températures moyennes hivernale et printanière ont également connu, comme la température annuelle, un premier réchauffement relativement abrupt et très marqué vers 1910 et un second vers la fin des années 1980. L'été et l'automne ont aussi connu deux réchauffements très marqués, mais le premier se produisit vers 1925-1930 et le second vers le début des années 1980.

**En résumé, on peut conclure à une élévation indiscutable des températures saisonnières et annuelles à Uccle depuis le 19<sup>e</sup> siècle.** Cette augmentation s'est produite en deux étapes: tout d'abord un premier réchauffement au début du 20<sup>e</sup> siècle et un second, d'amplitude assez similaire, dans les années 1980. L'analyse des données d'autres stations, disponibles sur ordinateur depuis le milieu des années 1950, montre que le réchauffement des années 1980 s'est produit de manière générale dans le pays.

Concernant le passé le plus récent, il faut signaler que l'année 2007 a dépassé de peu le précédent record de température moyenne annuelle qui avait été établi en 2006. Trois saisons récentes consécutives ont battu à tour de rôle leur record de température: après l'automne 2006 et l'hiver 2006-2007, c'est le printemps 2007 qui a dépassé de plus de trois degrés la température normale saisonnière. Il est cependant encore beaucoup trop tôt pour en conclure statistiquement qu'un nouveau palier a été tout récemment franchi dans le réchauffement observé à Uccle. Seuls les relevés des prochaines années pourront ou non le confirmer<sup>11</sup>.

### Détection statistique d'une modification climatique

L'étude des changements de climat nécessite une analyse détaillée des séries temporelles climatologiques. Deux tests sont utilisés conjointement dans ce chapitre pour déterminer le comportement des séries étudiées, connus sous les noms de test de Pettitt et de test de Mann-Kendall (pour plus d'informations, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie spécialisée en fin de document).

Les changements dans une série peuvent être dus soit à une hétérogénéité (cf. point 1. Introduction), liée à une modification du site, des instruments utilisés ou de la méthode d'observation, soit – si toutes ces raisons ont pu être écartées – à un changement dans les types de temps dont la moyenne et les extrêmes déterminent les conditions climatiques d'une région. Dans ce dernier cas, schématiquement, les changements de climat peuvent se présenter sous diverses formes (éventuellement combinées) :

- progressive (tendance plus ou moins linéaire à la hausse ou à la baisse),
- abrupte (un ou plusieurs « sauts », à la hausse ou à la baisse),
- cyclique (tendances consécutives à la hausse et à la baisse).

Globalement, sur l'ensemble de la période étudiée, la série peut présenter ou non une tendance à la hausse ou à la baisse. Dans les discussions des analyses de tendance, on sera parfois amené à distinguer les tendances temporaires au sein de la période considérée et la tendance globale sur l'ensemble de la période.

Lors de l'application des tests statistiques, on détermine un seuil à partir duquel on considère que l'on observe dans la série un changement significatif. Le plus souvent, on considère une valeur-clé du test statistique qui correspond à la probabilité d'obtenir cette valeur de la statistique dans l'hypothèse où il n'y a pas de changement (on choisit typiquement des probabilités de 5 % ou 10 %). Dans le présent chapitre, un résultat est dit statistiquement significatif ou très significatif si le pourcentage de chance que le changement détecté ne soit dû qu'au hasard, et non à un réel changement climatique, est au plus égal, respectivement, à 10 % ou 5 %.

Dans le présent chapitre, on dira que la tendance ou l'évolution d'un paramètre est « significative » ou « marquée » si le résultat de l'analyse statistique de la série d'observations de ce paramètre indique que son changement est statistiquement « significatif ». Si son changement est statistiquement « très significatif », on dira que sa tendance ou son évolution est « très significative » ou « très marquée ». Dans les autres cas, on dira que le paramètre ne présente pas de tendance significative ou qu'il est « stable ».

<sup>11</sup> On peut déjà signaler ici que l'été et l'automne 2007 ont été, pour leur part, « normaux » à Uccle du point de vue des températures. Ensuite, l'hiver 2007-2008 et le printemps 2008 ont présenté à nouveau des températures moyennes très supérieures aux valeurs saisonnières normales.

Si l'on examine les séries des températures extrêmes à Uccle depuis 1901, on remarque que le réchauffement au cours de la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle est principalement à mettre en relation avec une augmentation très significative des températures maximales, alors que celui des années 1980 est lié à une augmentation très marquée à la fois des températures maximales et minimales. Il serait intéressant de vérifier si les modèles climatiques qui simulent l'évolution du climat au cours du 20<sup>e</sup> siècle reproduisent dans nos régions ce comportement différencié et permettent de l'expliquer physiquement.

L'augmentation des températures minimales au cours du 20<sup>e</sup> siècle se marque également dans les dates des premier et dernier jours de gel au cours de l'année. La figure 2 donne l'évolution annuelle depuis 1901 de la date du dernier jour de gel, à la sortie de l'hiver. Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, la fin de la période de gel a eu tendance à se produire plus tôt dans l'année. L'analyse statistique de la série d'observations indique que cette tendance est principalement due à deux sauts marqués, relativement abrupts, le premier vers 1930 et le second vers 1980.

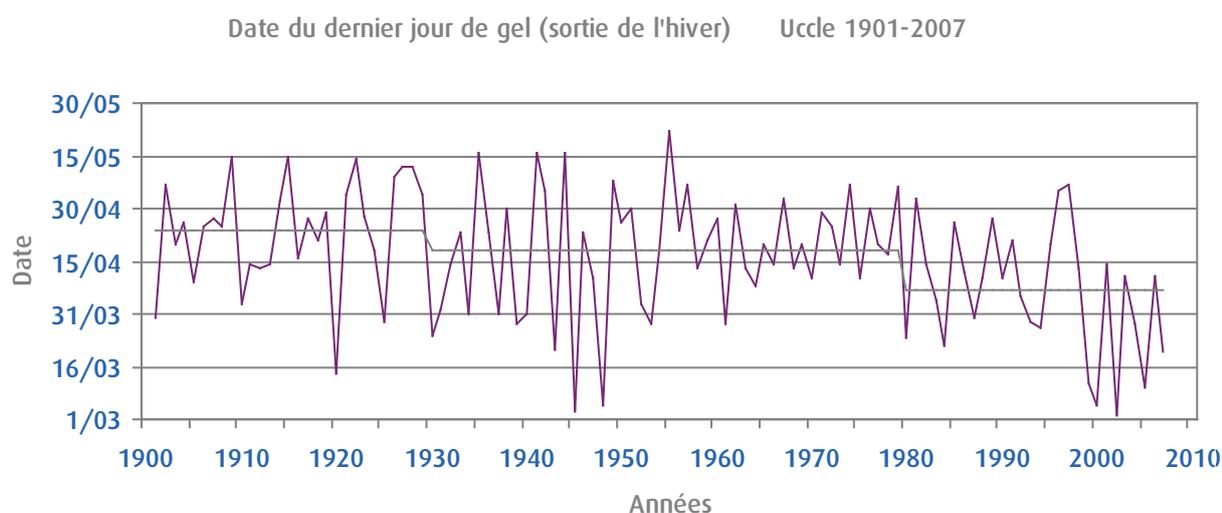


Figure 2. Date du dernier jour de gel (température minimale inférieure à 0 °C) à la sortie de l'hiver à Uccle, sur la période 1901-2007.

De même, la figure 3 montre que l'évolution annuelle depuis 1901 de la date du premier jour de gel, à l'approche de l'hiver, est également cohérente avec l'augmentation des températures. Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, le début de la période de gel en fin d'année a eu tendance à se produire à une date plus tardive. Comme l'analyse de tendance l'indique, cette évolution est principalement due à un saut relativement abrupt et très marqué vers 1955.

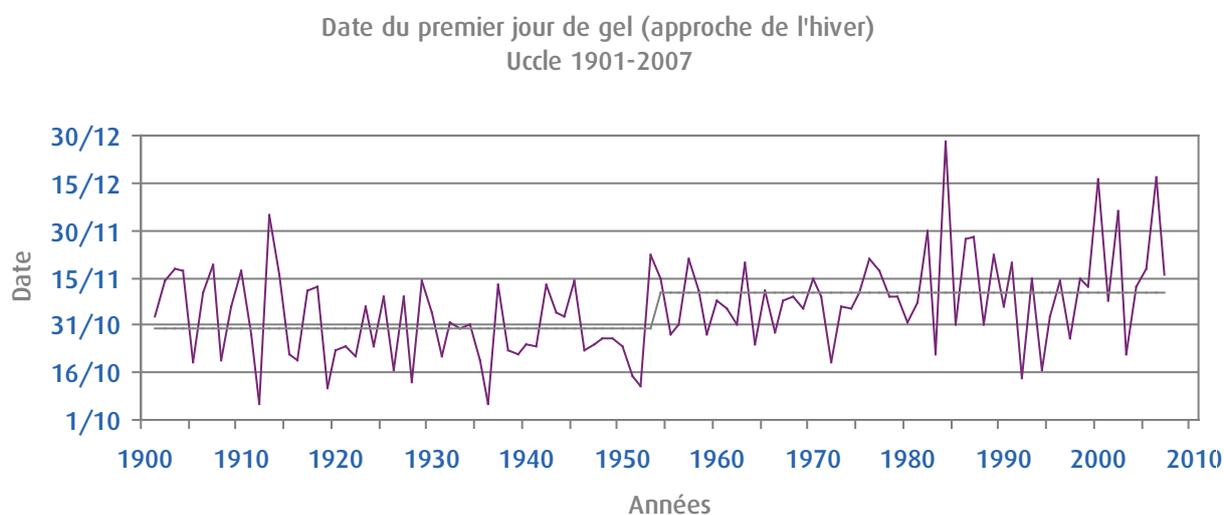


Figure 3. Date du premier jour de gel (température minimale inférieure à 0 °C) à l'approche de l'hiver à Uccle, sur la période 1901-2007.

La conséquence de l'évolution des dates de fin et de début des périodes de gel au cours de l'année est un allongement au cours du 20<sup>e</sup> siècle de la durée maximale annuelle de jours consécutifs sans gel. Pour ce paramètre, deux sauts abrupts sont détectés : le premier, significatif, vers 1955 et le second, très significatif, vers la fin des années 1990.

Pour terminer, on peut se demander si l'urbanisation de la région bruxelloise n'a pas contribué, au moins en partie, au réchauffement observé à Uccle. Une étude exhaustive à ce sujet n'a pas encore été menée jusqu'ici. Deux éléments permettent cependant a priori de penser que l'« effet urbain » ne devrait pas avoir joué un rôle primordial dans l'évolution observée de la température à Uccle depuis 1900. Tout d'abord, il faut remarquer que la station d'Uccle est située dans le sud de la région bruxelloise. Les vents dominants dans le pays étant orientés vers le nord-est, il en résulte que les masses d'air qui circulent au-dessus d'Uccle proviennent plus fréquemment de zones suburbaines. D'autre part, une étude de l'IRM indique que le réchauffement observé à Uccle durant les années 1980 est très similaire à celui qui s'est produit dans d'autres stations du pays situées à la campagne et dès lors peu, ou pas, influencées par un effet urbain.

### Y a-t-il plus de vagues de chaleur ?

Pour examiner s'il y a une évolution de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur, on dispose pour la station d'Uccle de plusieurs séries de mesures thermométriques journalières, sur des périodes plus ou moins longues. Nous utiliserons ici les températures extrêmes journalières (températures maximales et minimales) mesurées depuis 1901 dans un abri semi-ouvert, situé dans le parc climatologique de l'IRM.

Avant d'essayer de répondre précisément à la question, examinons tout d'abord plus simplement l'évolution depuis 1901 du nombre de jours par an où la température maximale a atteint au moins 25 °C (cf. figure 4), c'est-à-dire ce qu'on appelle le nombre annuel de jours d'été.

La figure 4 montre qu'après le réchauffement estival des années 1980, le nombre de jours d'été a augmenté. Elle montre également que des valeurs similaires aux valeurs les plus élevées observées au début du 21<sup>e</sup> siècle l'avaient déjà été dans le passé, en particulier dans les années 1940 (le record absolu date de 1947). Il n'y a pas de tendance significative sur l'ensemble de la période de mesures, mais une variabilité importante à l'échelle de quelques décennies : après une augmentation du paramètre relativement abrupte à la fin des années 1920, une baisse est observée au début des années 1950 et, finalement, une nouvelle hausse se produit dans les années 1980.

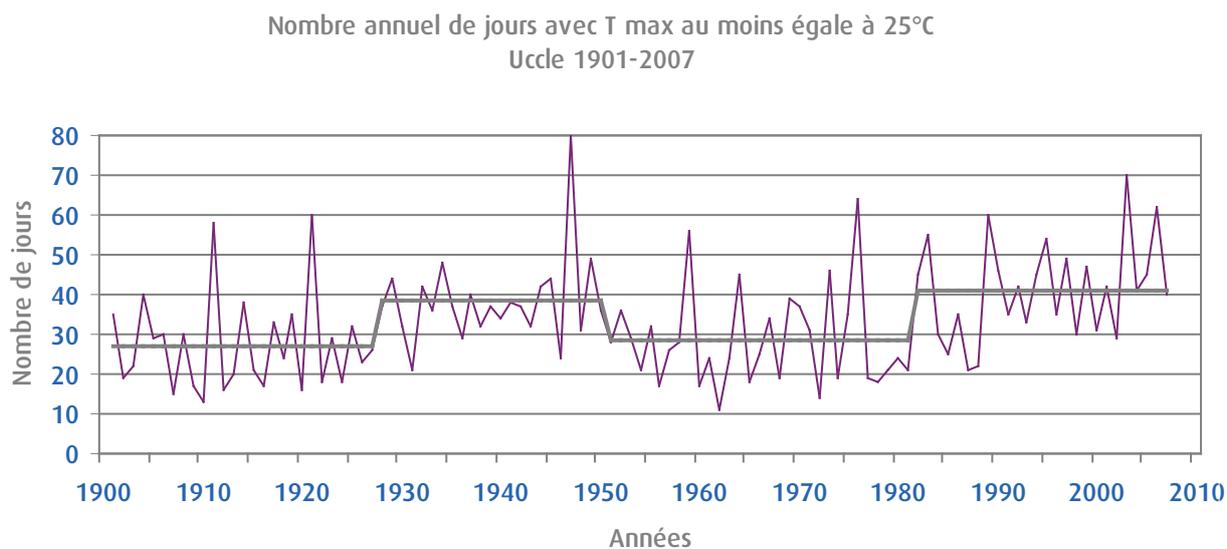


Figure 4. Nombre annuel de jours d'été (température maximale au moins égale à 25 °C) à Uccle, sur la période 1901-2007.

Un constat général similaire s'applique également au nombre annuel de jours de canicule, c'est-à-dire au nombre de jours par an où la température maximale est supérieure ou égale à 30 °C.

Comme dans le cas des températures maximales, des températures nocturnes élevées ne sont pas sans incidence sur la santé des populations à risque. La figure 5 montre l'évolution depuis 1901 du nombre de jours par an où la température minimale journalière a atteint au moins 15 °C (les minima se produisent généralement en fin de nuit, peu après le lever du soleil). La tendance à l'augmentation de ce paramètre au cours du 20<sup>e</sup> siècle est indiscutable, avec un premier « saut » à la hausse très marqué détecté vers le milieu des années 1930 et, surtout, un second saut à la hausse, également très marqué, au début des années 1980. On remarque aussi que les valeurs atteintes au cours des années les plus récentes sont toutes très élevées.

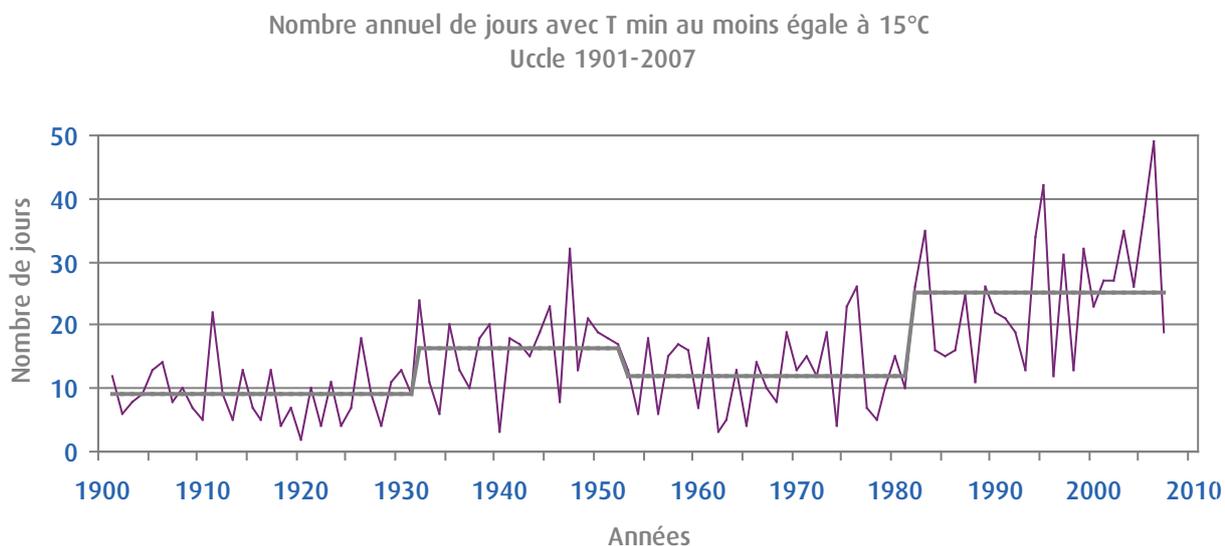


Figure 5. Nombre annuel de jours avec une température minimale au moins égale à 15 °C à Uccle, sur la période 1901-2007.

Essayons maintenant de répondre plus précisément à la question posée concernant les vagues de chaleur. On définira ici une vague de chaleur de manière simple, comme une période d'au moins cinq jours consécutifs au cours de laquelle les deux critères suivants sont vérifiés simultanément :

- la température maximale atteint ou dépasse 25 °C chaque jour,
- la température maximale atteint ou dépasse 30 °C au moins à trois reprises durant la période considérée.

La figure 6 donne l'évolution du nombre annuel de vagues de chaleur à Uccle depuis 1901. On observe une variabilité importante d'une année à l'autre. En moyenne sur le 20<sup>e</sup> siècle, il y a une vague de chaleur presque une année sur deux. **L'analyse de tendance indique une hausse significative du nombre annuel de vagues de chaleur vers le milieu des années 1990.** On remarque que les vagues de chaleur furent relativement fréquentes principalement dans les années 1940 et à nouveau depuis un peu plus d'une dizaine d'années.

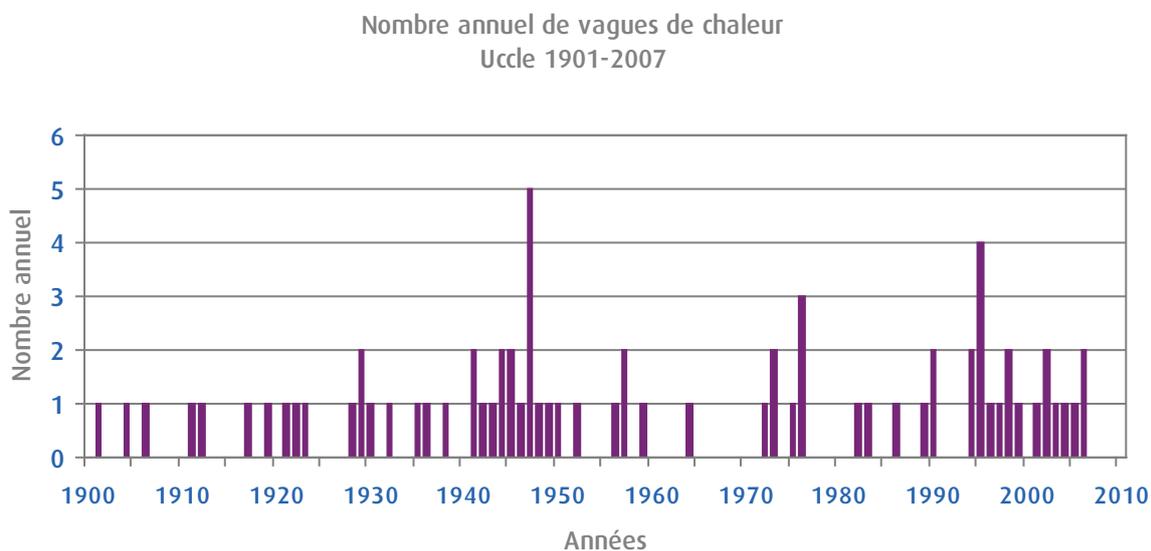


Figure 6. Nombre annuel de vagues de chaleur à Uccle, sur la période 1901-2007.

## Y a-t-il moins de vagues de froid ?

Nous utiliserons ici aussi pour examiner cette question les températures extrêmes journalières mesurées depuis 1901 dans l'abri semi-ouvert situé dans le parc climatologique de l'IRM.

Dans ce cas aussi, avant d'essayer de répondre précisément à la question, examinons tout d'abord plus simplement l'évolution depuis 1901 du nombre de jours par an où la température minimale est descendue en dessous de 0 °C (cf. figure 7). C'est ce qu'on appelle le nombre annuel de jours de gel.

Une diminution indiscutable de ce paramètre est observée sur l'ensemble du 20<sup>e</sup> siècle, avec un saut abrupt très significatif détecté statistiquement vers 1970.

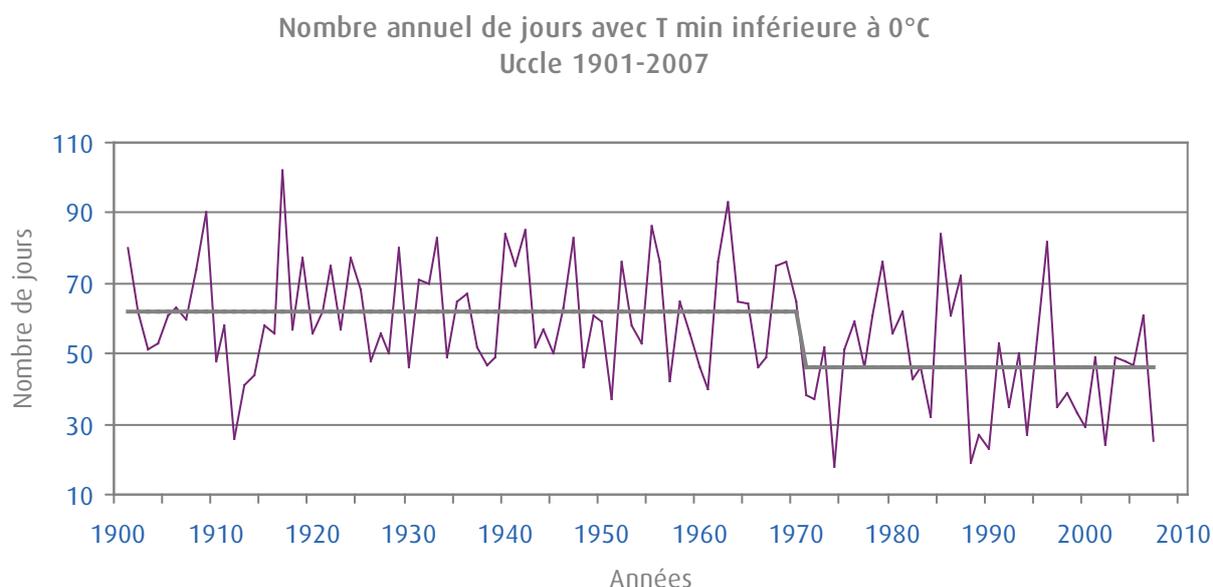


Figure 7. Nombre annuel de jours de gel (température minimale inférieure à 0 °C) à Uccle, sur la période 1901-2007.

Essayons maintenant de répondre plus précisément à la question posée concernant les vagues de froid. À l'instar d'une vague de chaleur, on définira ici une vague de froid de manière simple, comme une période d'au moins cinq jours consécutifs au cours de laquelle les deux critères suivants sont vérifiés simultanément :

- la température minimale est négative chaque jour (c'est-à-dire que chaque jour est un jour de gel),
- la température maximale est négative au moins à trois reprises durant la période considérée (c'est-à-dire qu'on a au moins trois jours d'hiver sur la période, au cours desquels il gèle donc en permanence).

La figure 8 donne l'évolution du nombre annuel de vagues de froid à Uccle depuis 1901. Pour ce paramètre également, on observe une variabilité importante d'une année à l'autre. En moyenne sur le 20<sup>e</sup> siècle, il y a à peu près une vague de froid annuellement. **L'analyse de tendance indique une diminution de la fréquence des vagues de froid, avec un saut à la baisse marqué vers le début des années 1970.**

Il est intéressant de remarquer que le réchauffement qui se produit en hiver et au printemps au début du 20<sup>e</sup> siècle n'a pas conduit en même temps à une diminution durable du nombre de vagues de froid, alors qu'une diminution de ce type semble plus clairement être associée au réchauffement de la fin du 20<sup>e</sup> siècle.

Nombre annuel de vagues de froid  
Uccle 1901-2007

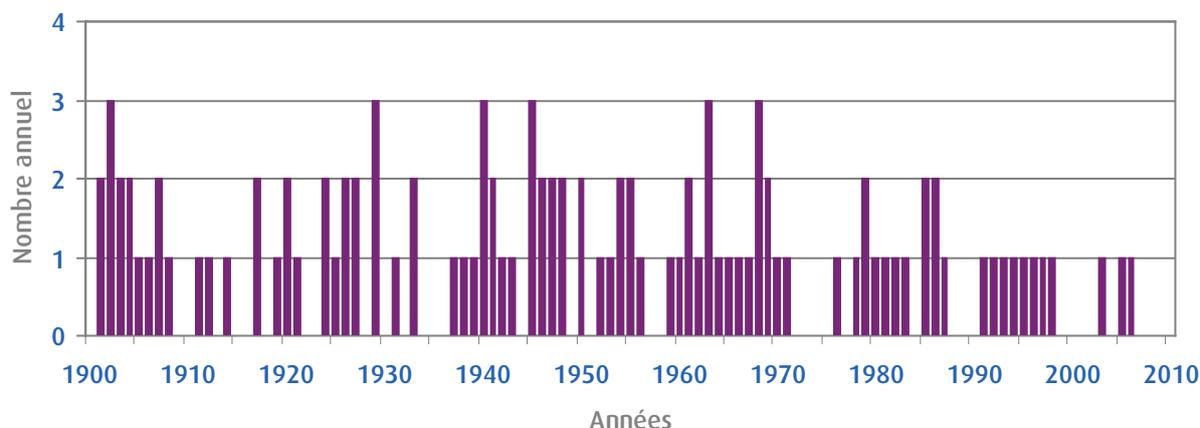


Figure 8. Nombre annuel de vagues de froid à Uccle, sur la période 1901-2007.

### Pleut-il plus ou moins ?

Les quantités de précipitations et leur évolution intéressent de nombreux secteurs, comme par exemple ceux de la prévention et du suivi des crues et inondations, du dimensionnement des réseaux d'égouttage, de l'approvisionnement en eau potable et de l'agriculture.

Nous commencerons par examiner l'évolution du cumul pluviométrique annuel relevé à Saint-Josse-ten-Noode, puis à Uccle. La figure 9 donne les quantités annuelles de précipitations recueillies depuis le début des relevés réguliers en 1833. **L'analyse de la série détecte un saut à la hausse très significatif vers 1910, caractérisé par une augmentation d'environ 7 % des précipitations annuelles.** À l'échelle saisonnière, les précipitations hivernales et printanières montrent également une augmentation, d'environ 15 %, respectivement très marquée vers 1910 et marquée vers 1965. Par contre, on n'observe pas d'évolution significative pour les quantités de précipitations estivales et automnales.

Quantité annuelle de précipitations  
Saint-Josse-ten-Noode/Uccle 1833-2007

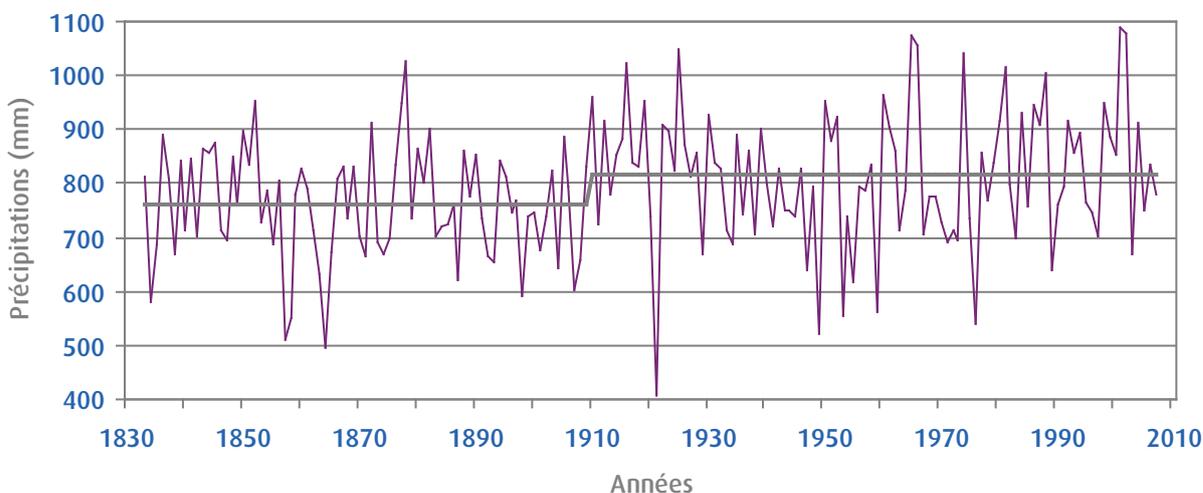


Figure 9. Quantité annuelle de précipitations (en mm) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1833-2007.

On peut aussi se demander si la fréquence des jours avec précipitations a subi une modification au cours du 20<sup>e</sup> siècle. La figure 10 donne l'évolution du nombre annuel de jours avec précipitations observé à Uccle depuis 1901. Un jour avec précipitations est défini ici comme une journée où une quantité d'au moins 1 mm a été récoltée (cela permet d'éliminer les jours où la quantité d'eau mesurée a été faible). **On n'observe pas de tendance marquée du nombre annuel de jours avec précipitations sur l'ensemble du 20<sup>e</sup> siècle.**

Pour les saisons, les analyses de tendance similaires n'indiquent pas non plus d'évolution marquée au cours du 20<sup>e</sup> siècle, à l'exception du printemps où une hausse significative du nombre de jours de précipitations est détectée vers le milieu des années 1960.

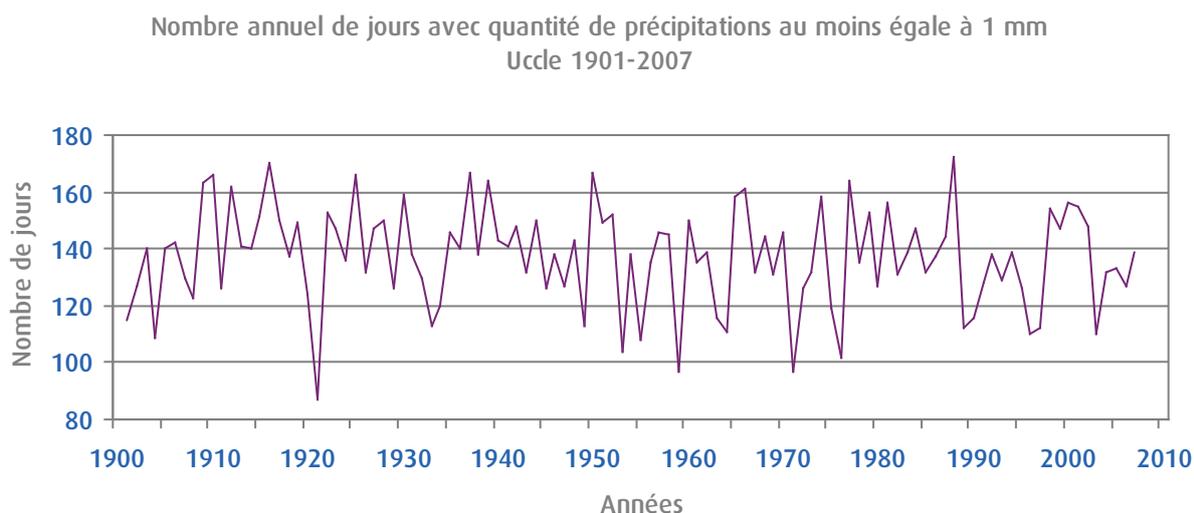


Figure 10. Nombre annuel de jours avec précipitations (quantité journalière de précipitations au moins égale à 1 mm) à Uccle, sur la période 1901-2007.

### Les pluies intenses sont-elles plus fréquentes ? Plus importantes ?

On peut tout d'abord examiner si le nombre de jours avec des précipitations abondantes a augmenté ou non. Pour la station d'Uccle, la figure 11 donne l'évolution entre 1901 et 2007 du nombre de jours durant l'été (période juin-juillet-août) au cours desquels la quantité journalière de précipitations a atteint au moins 20 mm. En été, de telles quantités sont causées généralement par des averses orageuses intenses qui tombent sur une courte période de temps (quelques heures au maximum).

La figure 11 n'indique aucune tendance significative pour ce genre de précipitations. Au cours de ces dernières années, on observe les trois valeurs les plus élevées de la série, mais il est encore trop tôt pour pouvoir en conclure statistiquement que la fréquence de ce type de précipitations est en train de se modifier. **En conclusion, on ne peut pas affirmer de manière indiscutable que les précipitations orageuses abondantes soient plus fréquentes aujourd'hui que par le passé.**

Nombre de jours en été où la quantité de précipitations atteint  
au moins 20 mm Uccle 1901-2007

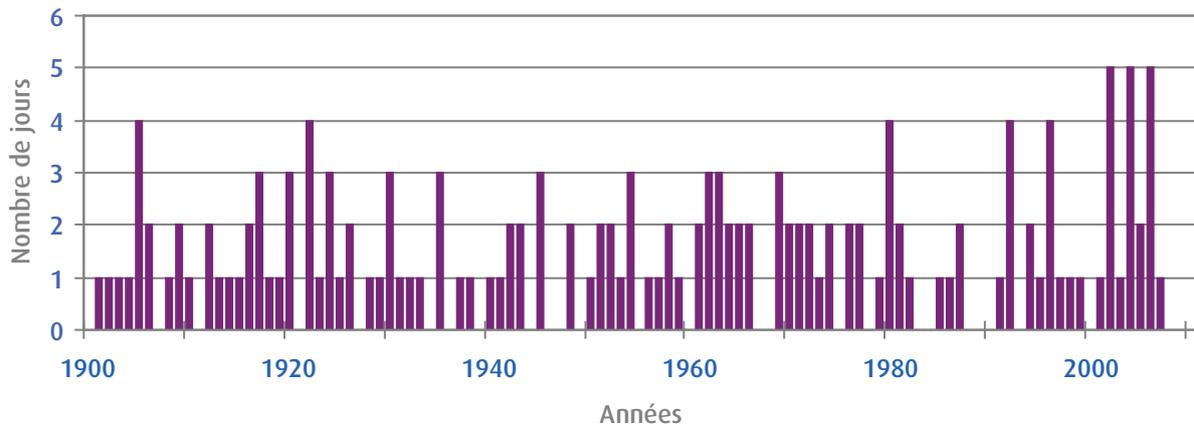


Figure 11. Nombre de jours par été au cours desquels la quantité journalière de précipitations a atteint au moins 20 mm à Uccle, sur la période 1901-2007.

Les données du pluviographe d’Uccle sur la période 1898-2007 permettent d’examiner le comportement des quantités extrêmes de précipitations sur des intervalles de temps jusqu’à 24 heures. À titre d’exemple, la figure 12 montre l’évolution de la quantité horaire maximale de précipitations mesurée chaque année depuis 1898. L’analyse des séries de données indique que les précipitations annuelles les plus abondantes pour des durées comprises entre 1 heure et 24 heures ne montrent pas de tendances marquées. **Ici encore, ce genre de résultat va à l’encontre du sentiment parfois exprimé selon lequel les pluies orageuses seraient actuellement plus abondantes que dans le passé.**

À ce sujet, il faut encore signaler qu’une analyse récente des données du réseau climatologique depuis 1951 a détecté pour les stations les plus proches du littoral une augmentation marquée au début des années 1980 des extrêmes annuels des précipitations sur 24 heures.

Maximum annuel de la quantité de précipitations tombée en une heure  
Uccle 1898-2007

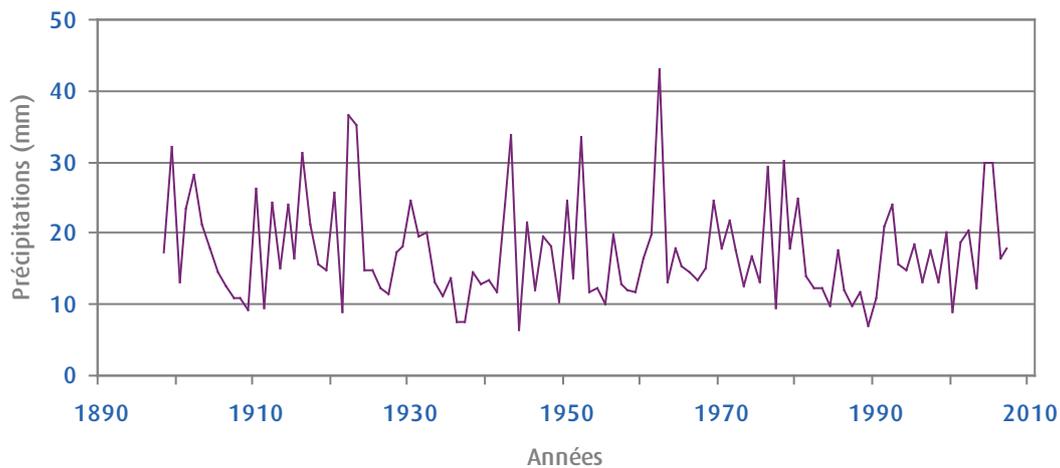


Figure 12. Maximum annuel de la quantité de précipitations tombée en une heure (en mm) à Uccle, sur la période 1898-2007.

À Uccle, les extrêmes annuels sur des durées de plus d'une semaine montrent quant à elles une augmentation très significative, caractérisée par un saut abrupt vers la fin des années 1970 (cf. figure 13). Ces types d'extrêmes annuels se produisent généralement en hiver. On peut relier le résultat obtenu ici pour Uccle au résultat d'une étude de l'IRM publiée en 2002 qui indiquait, de manière plus générale, que les précipitations hivernales cumulées au moins sur quelques jours ont eu tendance à augmenter dans l'ensemble du pays depuis le début des années 1950. Cette étude concluait également à l'absence, au cours de la seconde partie du 20<sup>e</sup> siècle, d'évolution détectable pour les pluies les plus intenses en été, c'est-à-dire les pluies orageuses. Ce dernier résultat est cohérent avec celui présenté ci-dessus pour Uccle sur l'ensemble du 20<sup>e</sup> siècle.

Il est intéressant d'essayer de mettre en relation l'augmentation sur les dernières décennies des précipitations hivernales cumulées sur plusieurs jours avec la fréquence des inondations étendues dans notre pays. Les années 1990 ont été caractérisées par des inondations plus fréquentes que les années 1980 et, surtout, les années 1970. Avant cela, les données historiques sont moins précises, même si l'on sait, par exemple, que les années 1950 ont également connu plusieurs inondations importantes. Bien sûr, d'autres facteurs, comme l'aménagement du territoire, devraient également être pris en compte dans une étude détaillée de l'évolution de la fréquence et de l'intensité des inondations hivernales.

Maximum annuel de la quantité de précipitations tombée en 10 jours  
Uccle 1951-2007

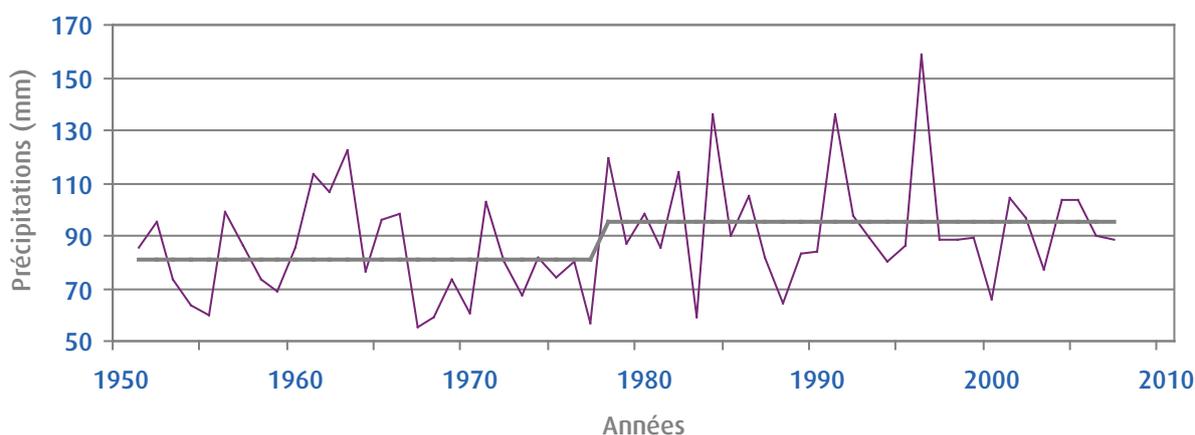


Figure 13. Maximum annuel de la quantité de précipitations tombée en dix jours (en mm) à Uccle, sur la période 1951-2007.

En conclusion, de manière générale pour les précipitations, l'examen des données conduit à des résultats beaucoup moins spectaculaires que pour les températures. Cela peut s'expliquer en partie par la très grande variabilité des précipitations dans nos régions.

Néanmoins, on peut retenir que **les cumuls pluviométriques annuels, hivernaux et printaniers ont augmenté à Uccle depuis le 19<sup>e</sup> siècle et qu'il en est de même, pour l'ensemble du pays depuis les années 1950, pour les extrêmes annuels des cumuls sur plusieurs jours** (qui se produisent souvent en hiver). Par contre, pour des durées comprises entre une heure et 24 heures, les séries des extrêmes annuels ne présentent pas de tendance, sauf pour les stations les plus proches de la côte où, selon une étude récente, les cumuls journaliers extrêmes ont subi une augmentation significative au début des années 1980.

Que les précipitations de courte durée n'aient pas augmenté, au moins à l'intérieur du pays, est en contradiction avec l'impression souvent ressentie par le public qui, ces dernières années<sup>12</sup> surtout, a été le témoin de dégâts dus à d'intenses orages. Il faut conclure ici que **si la fragilité des zones d'habitats urbanisées a augmenté face aux averses orageuses, c'est donc plus probablement sous l'influence d'autres facteurs environnementaux, tels que par exemple la densité de l'habitat et l'imperméabilisation des sols**. Il faut cependant insister sur le fait que ces remarques ne préjugent en rien de l'évolution future des précipitations orageuses dans notre pays et des risques locaux d'inondations qui y sont associés.

<sup>12</sup> Entre autres, les orages des étés 2005 et 2006 à Bruxelles et ailleurs dans le pays.

## Y a-t-il moins de neige ?

Pour la station d'Uccle, on dispose d'une série d'observations des jours avec chutes de neige<sup>13</sup> depuis 1901. La figure 14 donne l'évolution depuis cette date du nombre annuel de jours avec des précipitations neigeuses. On remarque que la valeur de ce paramètre est très variable d'une année à l'autre et que **depuis le réchauffement de la fin des années 1980, il neige moins à Uccle que par le passé**, de manière très significative. Une première diminution très marquée s'était déjà produite vers 1920, à l'occasion du réchauffement observé au début du 20<sup>e</sup> siècle. Les tendances observées pour les paramètres neigeux sont principalement à mettre en relation avec les tendances des températures durant la partie froide de l'année.

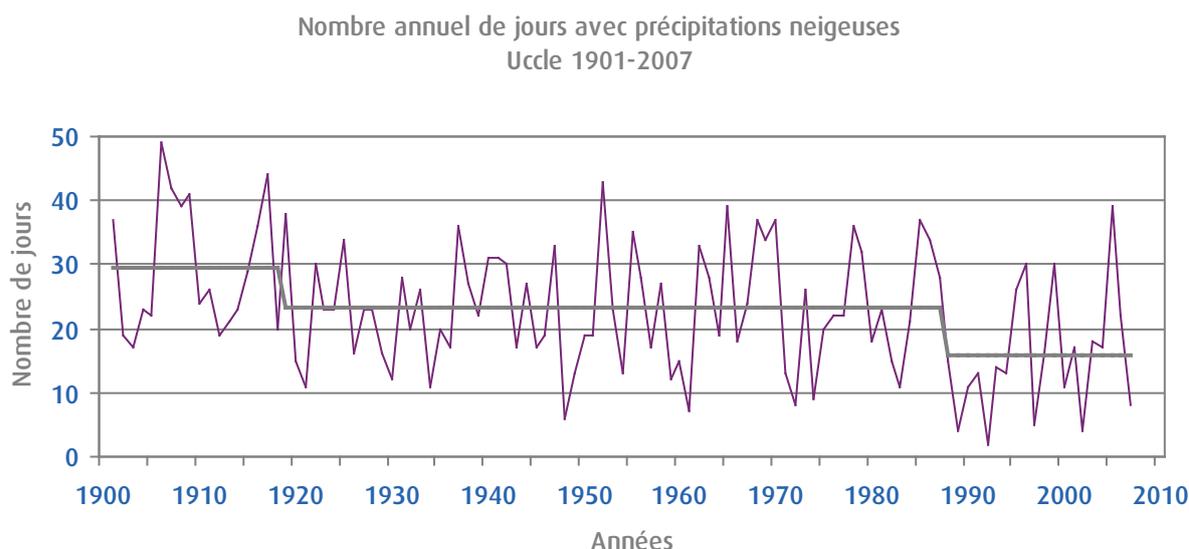


Figure 14. Nombre annuel de jours avec des précipitations neigeuses à Uccle, sur la période 1901-2007.

L'épaisseur de la couche de neige est mesurée à Uccle depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle. La valeur maximale annuelle montre également une très grande variabilité d'une année à l'autre. Même si les valeurs mesurées depuis le réchauffement des années 1980 sont généralement faibles, **on ne détecte pas de tendance marquée pour l'épaisseur de neige maximale annuelle au cours du 20<sup>e</sup> siècle. De même, depuis les années 1980, le nombre annuel de jours avec enneigement au sol est en général faible à Uccle, mais sur le 20<sup>e</sup> siècle, aucune tendance marquée n'est détectée.**

Ailleurs dans le pays, les séries de mesures de neige sont beaucoup plus courtes et souvent moins précises. Signalons cependant que l'on dispose depuis 1948 d'une série très précieuse de l'épaisseur de neige observée à la station de Saint-Hubert, située sur les plateaux ardennais et appartenant à Belgocontrol. Dans cette station, après le réchauffement des années 1980, **on a observé une diminution très marquée de l'épaisseur maximale annuelle atteinte par la couche de neige**, en particulier dans les années 1990 (cf. figure 15).

<sup>13</sup> Par chutes de neige, on entend ici tout type de précipitations contenant de la neige (cela peut, par exemple, être quelques flocons tombant en même temps que de la pluie, ou des chutes de neige plus conséquentes).

### Maximum annuel de l'épaisseur de neige Saint-Hubert 1948-2007

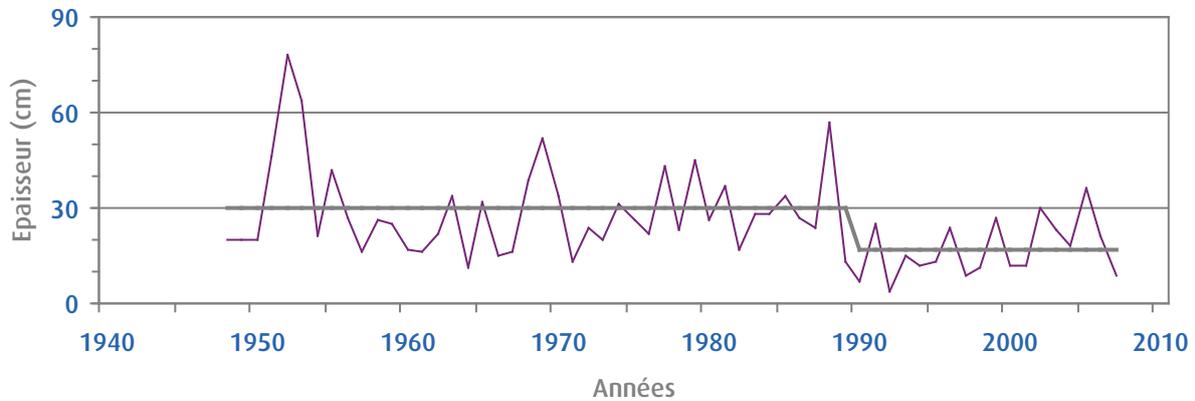


Figure 15. Epaisseur maximale annuelle de la couche de neige (en cm) à Saint-Hubert, sur la période 1948-2007.

### Les périodes de sécheresse sont-elles plus longues ?

Une longue période sans précipitations, ou de précipitations faibles, peut entraîner des conséquences dommageables dans plusieurs secteurs. Par exemple, trop peu de précipitations en hiver perturbe le bon réapprovisionnement des nappes phréatiques. Au printemps et en été, un déficit en eau diminue les rendements agricoles. Un temps sec, de trop longue durée, favorise au printemps les incendies dans les Hautes-Fagnes.

La notion de sécheresse ne peut pas être définie de manière simple et générale. Comme nous venons de l'illustrer, elle dépend du domaine auquel on s'intéresse plus particulièrement. Dans tous les cas, le déficit de précipitations, considéré sur une période plus ou moins longue, joue le rôle crucial, mais d'autres paramètres (comme le vent, la température, le contenu en eau du sol...) peuvent aussi intervenir pour caractériser la sévérité d'une sécheresse et expliquer l'ampleur de ses impacts.

Nous n'examinerons ici que l'évolution au cours du 20<sup>e</sup> siècle des plus longues périodes annuelles sans précipitations journalières notables<sup>14</sup>. Depuis 1901, la figure 16 donne pour les six mois chauds de l'année la durée de la plus longue période sans précipitations journalières notables. L'analyse de tendance ne montre pas d'évolution significative de ce paramètre au cours du 20<sup>e</sup> siècle. On notera que le record absolu a été observé en 2007, avec 37 jours consécutifs sans précipitations notables à Uccle, entre le 30 mars et le 5 mai.

<sup>14</sup> Par « précipitations journalières notables », on entend ici une quantité journalière de précipitations au moins égale à 0,5 mm. Dès lors, par convention, un jour «sec» est défini comme une journée au cours de laquelle la quantité de précipitations tombée est inférieure à 0,5 mm.

Nombre annuel maximum de jours consécutifs 'secs'  
Uccle période avril-septembre 1901-2007

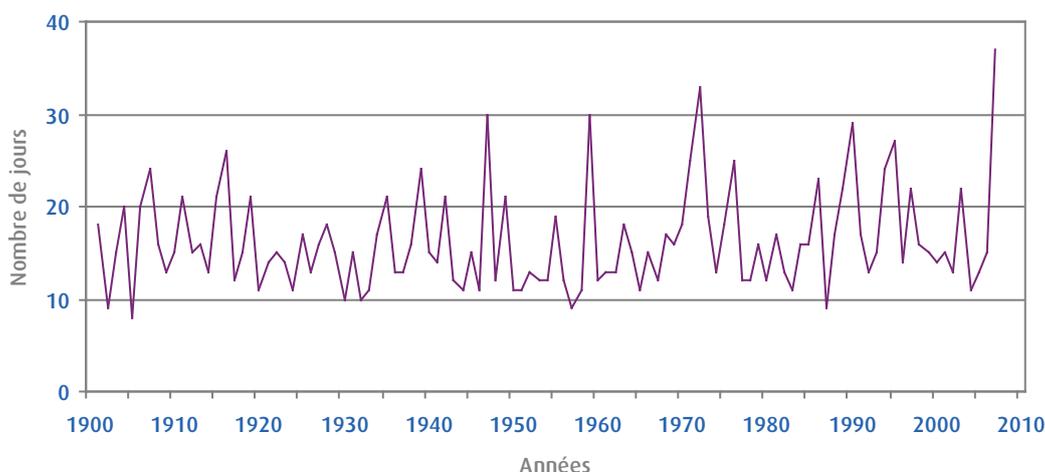


Figure 16. Durée (en jours) de la plus longue période sans précipitations journalières notables (quantités journalières inférieures à 0,5 mm) durant les six mois les plus chauds de l'année, à Uccle sur la période 1901-2007.

Un résultat général similaire est obtenu lorsqu'on examine l'évolution de la durée de la plus longue période sans précipitations journalières notables au cours des six mois froids de l'année : aucune évolution significative de ce paramètre n'est observée sur l'ensemble du 20<sup>e</sup> siècle.

En conclusion, en considérant que la durée des périodes sans précipitations notables est un indice utile pour caractériser l'intensité des périodes de sécheresse, **les résultats des analyses effectuées n'indiquent pas que les sécheresses soient devenues plus intenses au cours du 20<sup>e</sup> siècle.**

Il faut souligner que ces conclusions générales ne s'appliquent pas nécessairement à tous les types de sécheresse et que des études complémentaires devraient être menées pour compléter les premiers résultats présentés ici. Par exemple, pour l'approvisionnement en eau des nappes phréatiques, les déficits en précipitations doivent être généralement analysés sur des périodes plus longues (de la saison à quelques années) et les indices de sécheresse définis dans la présente étude ne s'appliquent donc pas à ce domaine.

### Y a-t-il plus de tempêtes ?

La mesure du vent est particulièrement influencée par les caractéristiques<sup>15</sup> de l'environnement immédiat autour du mât anémométrique, mais également par les conditions de rugosité<sup>16</sup> et la topographie dans la région environnante. Tout changement de l'une ou l'autre de ces conditions risque donc de compliquer l'analyse de tendance des séries anémométriques.

Examinons tout d'abord l'évolution générale de la vitesse du vent. La plus longue série de vent disponible pour notre pays est la série d'observations sur le mât climatologique à Saint-Josse-ten-Noode, puis à Uccle. La figure 17 donne l'évolution de la vitesse moyenne annuelle du vent observée depuis 1880. L'analyse de ces données indique que le vent moyen dans la région bruxelloise est resté relativement stable jusque vers 1960, avant de décroître de manière relativement régulière, de plus de 10 % jusqu'à nos jours. Cependant, a priori, ce résultat est à considérer avec précaution. En effet, si dans l'étude d'homogénéisation de cette série, il a été tenu compte de la construction d'un bâtiment proche dans les années 1960, ce ne fut pas le cas de l'évolution de la végétation autour du site d'observations.

<sup>15</sup> Par exemple, des obstacles proches, comme des bâtiments ou des arbres, peuvent modifier la vitesse du vent, en l'amplifiant ou en la diminuant, selon les cas.

<sup>16</sup> En surface, la présence d'obstacles de toute nature est source de « rugosité », ce qui perturbe l'écoulement de l'air et influence donc la vitesse du vent.

Vitesse moyenne annuelle du vent  
Saint-Josse-ten-Noode/Uccle 1880-2007

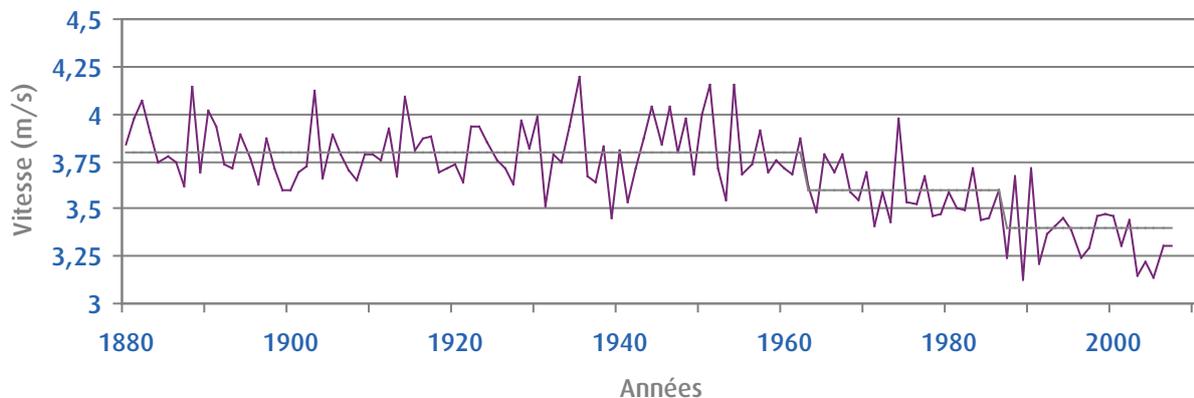


Figure 17. Vitesse annuelle moyenne du vent (en m/s) à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle, sur la période 1880-2007.

D'autres stations dans le pays disposent de séries anémométriques, mais sur des périodes plus courtes. Une étude récente de l'IRM a examiné les sites de mesures de ces stations et retracé au mieux l'historique des relevés. On peut en déduire que les mesures effectuées à l'aéroport de Zaventem sont relativement homogènes depuis le milieu des années 1960. La figure 18 donne l'évolution de la vitesse moyenne annuelle du vent à cet endroit depuis 1965. La vitesse du vent est tout d'abord relativement stable jusqu'au début des années 1980 ; ensuite, vers 1983, une décroissance marquée assez brutale se produit et la diminution semble se poursuivre quelque peu par la suite. **La diminution de la vitesse du vent est de l'ordre de 10 % entre le début des années 1980 et les années les plus récentes.** Ce résultat est globalement cohérent avec celui que l'on obtient pour les mesures faites à Uccle (cf. figure 17), ainsi qu'avec celles de la station de Saint-Hubert, en Ardenne, dont l'environnement, comme celui de Zaventem, est resté relativement stable depuis le milieu des années 1960.

Si l'on examine l'évolution du vent à l'échelle saisonnière depuis 1965, on trouve des résultats relativement cohérents pour les trois stations considérées ici : à l'exception de l'hiver (et également de l'automne, mais à Uccle seulement), les autres saisons ont connu une diminution très marquée de la vitesse du vent dans les années 1980. Par contre, aucune tendance significative n'est observée en hiver, c'est-à-dire durant la saison où les vents sont les plus élevés.

Vitesse moyenne annuelle du vent  
Zaventem 1965-2007

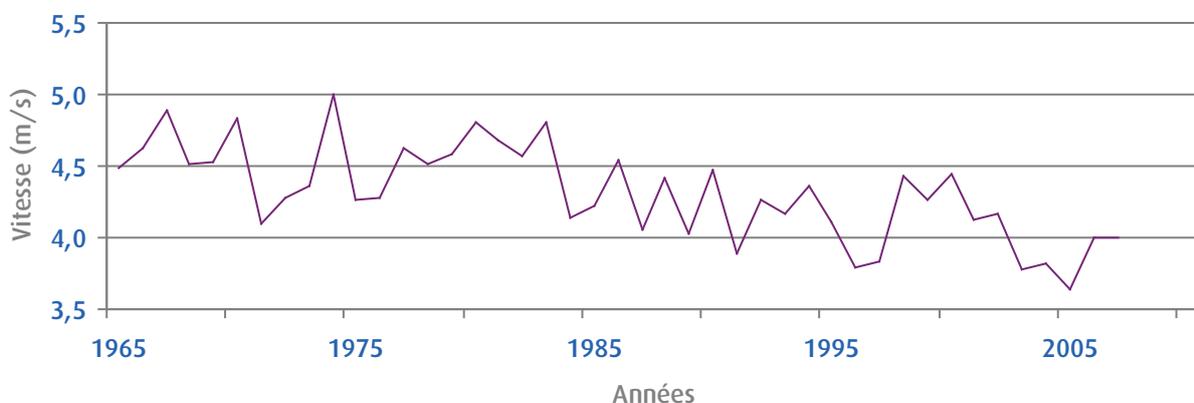


Figure 18. Vitesse annuelle moyenne du vent (en m/s) à Zaventem, sur la période 1965-2007.

Examinons maintenant le cas des vitesses de vent les plus élevées, qui se produisent généralement entre octobre et avril et qui peuvent parfois être à l'origine de dégâts importants dans notre pays.

Ici, on définira, de manière simple, un jour de tempête comme une journée au cours de laquelle les pointes de vent ont dépassé au moins à une reprise la valeur-seuil de 70 km/h.

La figure 19 donne l'évolution du nombre annuel de jours de tempêtes à Uccle sur la période 1940-2007. Sur la période considérée, la moyenne de ce paramètre s'élève à 24 jours. L'analyse de tendance indique que globalement, il n'y a pas d'évolution significative de ce paramètre sur la période considérée. On peut cependant observer une variabilité importante de la valeur du paramètre à l'échelle de quelques années : en particulier, on note une fréquence élevée des jours de tempêtes autour de 1947 et 1989 et des faibles valeurs dans les années 1960 et au début des années 1970. Les années récentes sont également caractérisées par des valeurs relativement faibles de la fréquence des jours de tempêtes.

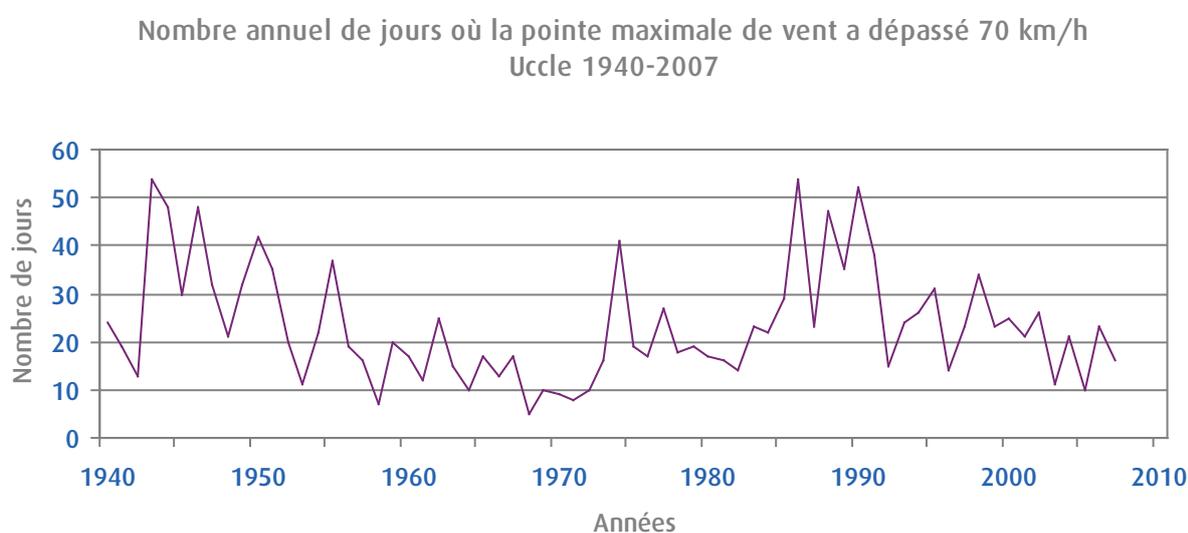


Figure 19. Nombre annuel de jours de tempêtes (pointe maximale de vent supérieure à 70 km/h) à Uccle, sur la période 1940-2007.

L'analyse des données disponibles depuis 1985 dans les autres stations anémométriques conduit au même résultat que celui obtenu pour Uccle : **la fréquence d'occurrence des tempêtes (selon la définition retenue) n'a pas augmenté au cours des 20 dernières années.**

Le même constat de stabilité globale, malgré une variabilité à l'échelle de quelques années, s'applique à la série des pointes de vent maximales annuelles relevée à Uccle (depuis 1940) et dans d'autres stations (depuis 1985). En particulier, on observe que les pointes maximales annuelles ont été relativement faibles au cours des 10 dernières années, après un groupement de valeurs élevées entre 1983 et 1990. On peut donc conclure à partir de l'ensemble des résultats obtenus que **l'intensité des tempêtes n'a pas non plus augmenté dans notre pays au cours des dernières décennies, et en particulier au cours des 20 dernières années.**

Signalons pour terminer, qu'en été, au cours des orages, les vents peuvent également parfois être localement très violents. En particulier, des tornades peuvent, dans certaines conditions, prendre naissance sous les nuages d'orage et provoquer des dégâts parfois considérables, comme à Oostmalle en 1967 et à Léglise en 1982. Ce type de phénomène météorologique est observé en moyenne quelques fois par an dans notre pays. L'IRM dispose de nombreuses informations sur les tornades qui ont pu se produire dans nos régions depuis plus d'un siècle, mais seuls une analyse approfondie de ces informations et un contrôle de leur qualité permettraient peut-être d'établir si la fréquence de ce phénomène météorologique extrême a augmenté au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Ce genre d'étude est particulièrement délicat, compte tenu de la difficulté d'établir des séries d'observations homogènes.

## L'ensoleillement a-t-il changé ?

La durée d'ensoleillement est mesurée à Uccle depuis 1887. Elle est étroitement corrélée à la quantité de nuages dans le ciel, qui est un des paramètres climatiques les plus importants, mais dont la valeur n'est pas toujours simple à déterminer visuellement. La figure 20 donne l'évolution de la durée annuelle d'ensoleillement à Uccle depuis le début des relevés. **Il n'y a pas de tendance globale sur l'ensemble de la période, mais on observe une variabilité importante à l'échelle multi-annuelle**, avec des valeurs généralement élevées sur la période 1920 à 1950 et des valeurs généralement faibles sur la période 1960 à 1990. Au cours des vingt dernières années, les durées d'ensoleillement sont revenues à des valeurs annuelles oscillant autour de la valeur moyenne sur le 20<sup>e</sup> siècle.

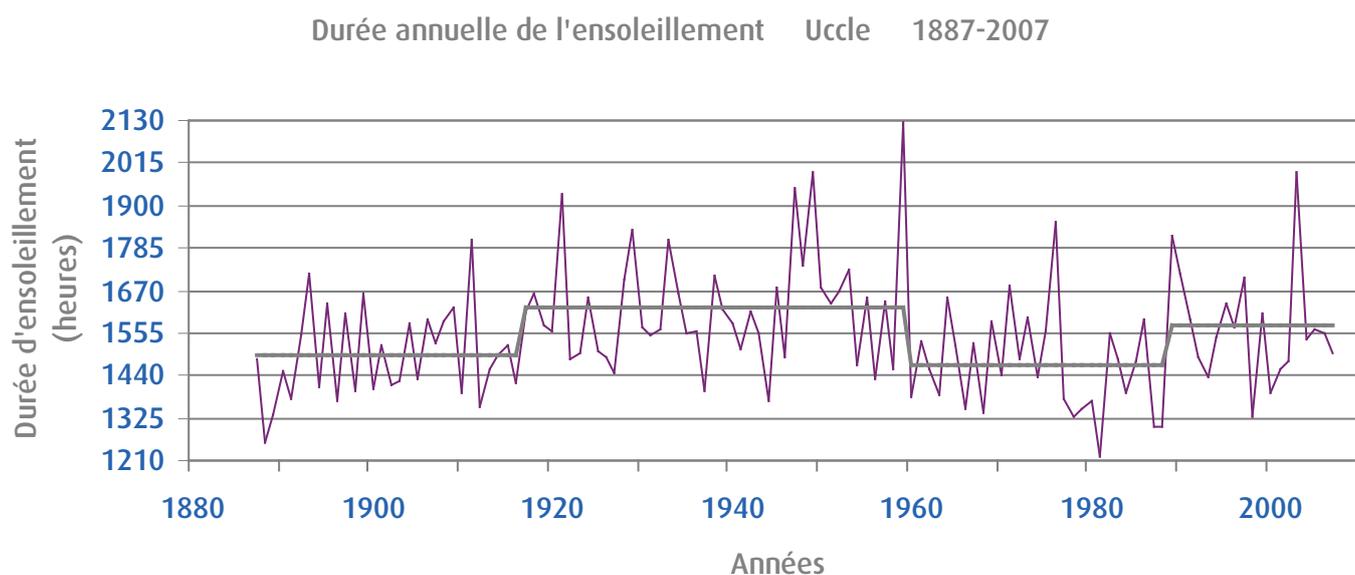


Figure 20. Durée annuelle d'ensoleillement (en heures) à Uccle, sur la période 1887-2007.

Si l'on examine les tendances à l'échelle des saisons, on remarque qu'il n'y a pas non plus de tendance globale depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Au printemps, on observe, plus que pour les autres saisons, des regroupements de valeurs relatives bien marqués, avec des valeurs généralement au-dessus de la moyenne entre 1910 et 1960 et des valeurs généralement en dessous de la moyenne entre 1960 et 1990. Après l'été 1976, particulièrement ensoleillé, les dix étés suivants le furent beaucoup moins, avec des valeurs généralement en dessous de la moyenne saisonnière. Ensuite, depuis les années 1990, les durées d'ensoleillement estival ont plutôt tendance à être supérieures à la moyenne saisonnière.

Notons que l'évolution du rayonnement solaire global mesuré en surface à Uccle au cours des dernières décennies sera présentée et discutée plus loin (cf. chapitre 2). Sur cette période de temps, comme le lecteur pourra le constater, les résultats obtenus ci-dessus pour la durée d'ensoleillement sont cohérents avec ceux trouvés pour l'énergie solaire incidente en surface, mesurée par le rayonnement solaire global.

### 3. Résumé

Des mesures météorologiques régulières ont débuté en 1833 dans la région bruxelloise, à Saint-Josse-ten-Noode, puis se sont poursuivies à Uccle à partir de 1886 lorsque l'Observatoire a été déplacé sur le site actuel de l'IRM. Les plus longues séries de mesures effectuées à Bruxelles permettent d'aborder la question de l'évolution du climat belge au cours des 170 dernières années. D'autres stations d'observations fournissent également des renseignements utiles, mais sur des périodes de temps plus courtes, situées dans la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

Il ressort de l'ensemble des données analysées dans la présente étude que **le climat belge a évolué au cours du 20<sup>e</sup> siècle**. En particulier, des augmentations très marquées et assez brutales des températures saisonnières et annuelles (de l'ordre de 1 °C) se sont produites à deux reprises, tout d'abord dans la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle et ensuite dans les années 1980.

La fréquence des vagues de chaleur montre une tendance à la hausse significative vers le milieu des années 1990. La variabilité de ce paramètre est cependant importante tout au long du 20<sup>e</sup> siècle et les caractéristiques des vagues de chaleur des années les plus récentes sont relativement similaires à celles qui furent observées dans les années 1940, à la suite du réchauffement estival de la première partie du 20<sup>e</sup> siècle. D'autre part, la fréquence des vagues de froid a diminué de manière significative au début des années 1970.

L'augmentation générale des températures minimales au cours du 20<sup>e</sup> siècle est aussi à l'origine d'un allongement de la période la plus longue de l'année sans jours de gel. En effet, le dernier jour de gel à la sortie de l'hiver a tendance à être plus précoce et le premier jour de gel à l'approche de l'hiver a tendance à être plus tardif.

Pour les précipitations, entre le début des relevés en 1833 et la fin du 20<sup>e</sup> siècle, on observe en région bruxelloise une augmentation d'environ 7 % des cumuls annuels (très significatives) et d'environ 15 % des cumuls hivernaux (très significative) et printaniers (significative).

De plus, dans le pays, au cours des 50 dernières années, on observe dans la plupart des stations climatologiques une tendance à des augmentations, significatives ou très significatives, des extrêmes annuels des pluies cumulées sur plusieurs jours; ce type de précipitations extrêmes se produit généralement en hiver. Par contre, les maxima annuels des précipitations sur 24 heures (ou sur des durées encore plus courtes) sont stables, sauf près du littoral où, selon une étude récente, les maxima annuels journaliers présentent déjà une augmentation significative.

À Uccle, l'analyse des maxima annuels depuis 1898 des précipitations sur des durées de 1 heure à quelques heures n'indique pas d'évolution marquée pour ces paramètres. D'autre part, malgré quelques valeurs records au cours des années récentes, la fréquence annuelle du nombre de jours où les précipitations ont atteint au moins 20 mm ne montre pas non plus jusqu'ici d'évolution significative à Uccle.

Finalement, on peut conclure de l'ensemble des données de précipitations analysées que ni l'intensité, ni la fréquence des orages violents n'ont subi, dans la région bruxelloise, d'augmentation marquée depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle. À partir de l'analyse des maxima annuels des précipitations journalières relevées dans le réseau climatologique belge, on arrive à une conclusion similaire pour l'ensemble du pays au cours des 50 dernières années, sauf sans doute pour la région proche du littoral<sup>17</sup>.

Une étude exhaustive de l'évolution des sécheresses en Belgique demanderait de nombreuses analyses qu'il n'a pas été possible de mener dans le cadre de ce travail. Le principal résultat de l'étude préliminaire entreprise ici indique que les durées des plus longues périodes sans précipitations notables à Uccle ne présentent pas d'évolution significative depuis le début du 20<sup>e</sup> siècle.

<sup>17</sup> Pour confirmer cela, il faudra vérifier que les maxima annuels journaliers, qui montrent une tendance à l'augmentation près du littoral, correspondent effectivement à des précipitations par temps d'orage.

En relation avec les élévations de températures du début et de la fin du 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations sous forme neigeuse sont devenues moins fréquentes à Uccle de manière très marquée. L'enneigement au sol est très variable d'une année à l'autre et on ne détecte pas d'évolution marquée dans la région bruxelloise, même si les quantités de neige tombées ces dernières années sont en général faibles. Par contre, sur les plateaux ardennais, dans la région de Saint-Hubert, l'épaisseur de neige maximale annuelle montre une diminution très significative depuis le réchauffement hivernal de la fin des années 1980.

On observe à Uccle, dans la seconde partie du 20<sup>e</sup> siècle, une baisse très marquée de la vitesse moyenne annuelle du vent. Mais le développement au fil des années de la végétation autour du site de mesures ne permet pas d'attribuer de manière certaine cette tendance à un effet strictement climatique.

Ailleurs dans le pays, dans quelques stations, des mesures de vent probablement plus fiables pour l'étude de l'évolution de ses caractéristiques existent depuis le milieu des années 1960. L'analyse de ces données indique une diminution relativement brutale de la vitesse du vent dans les années 1980, et ensuite une légère accentuation de cette tendance. Ce comportement marqué est également visible à l'échelle des saisons, sauf pour l'hiver où le vent, très variable d'une année à l'autre, est plus « stable » sur l'ensemble de la période.

En ce qui concerne les tempêtes, les analyses menées jusqu'ici sur les vents forts, depuis 1940 pour Uccle et ailleurs dans le pays depuis 1985, ne montrent aucune tendance particulière, ni dans l'intensité des vents annuels les plus forts, ni dans la fréquence des vents élevés.

De même, l'analyse des durées d'ensoleillement saisonnières et annuelles mesurées à Uccle ne montre pas de tendance globale pour ces paramètres depuis le début des relevés en 1887, mais une variabilité généralement importante à l'échelle de quelques années.

#### 4. Perspectives

Il faut signaler que cette étude de l'évolution du climat belge à l'échelle du 20<sup>e</sup> siècle n'est pas exhaustive et que des recherches sont à poursuivre dans ce domaine. Nous donnons ici quelques pistes :

- Il serait utile d'étudier l'évolution d'autres paramètres climatiques non examinés ici, faute de temps ou de séries disponibles sur ordinateur, comme la nébulosité, mais également l'évolution combinée des différents paramètres.
- Même si les résultats obtenus dans le présent chapitre pour les vagues de chaleur, les vagues de froid et les tempêtes semblent robustes, il serait intéressant d'étudier la sensibilité de ces résultats aux définitions précisément retenues pour caractériser ces phénomènes. Dans le cas des sécheresses, des études complémentaires sont nécessaires.
- L'encodage en cours à l'IRM des plus anciennes et plus longues séries d'observations du réseau climatologique devrait permettre de comparer les résultats d'analyses de ces séries avec ceux déjà obtenus pour la station d'Uccle.
- Il serait intéressant de relier les changements discutés ici aux modifications survenues dans la circulation atmosphérique et la fréquence des types de temps.
- D'autres méthodes statistiques pourraient être utilisées pour compléter et approfondir l'étude de l'évolution climatique dans notre pays.
- L'analyse de l'évolution d'« indices climatiques », combinant différents paramètres climatiques, pourrait être menée en collaboration avec des chercheurs concernés par les études d'impact des changements climatiques dans divers domaines d'application (agriculture, sylviculture, faune et flore, hydrologie, santé, énergie, assurances...).

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de résultats issus de l'analyse de longues séries d'observations climatologiques belges. Le chapitre suivant illustre la contribution de l'IRM dans les domaines de recherche concernant le suivi du système climatique à partir de techniques de mesures plus récentes. En complément au chapitre 1, le chapitre 2 présentera notamment l'évolution d'autres paramètres climatologiques également mesurés à Uccle (ozone, rayonnement solaire, aérosols), mais sur des périodes de temps plus courtes.

## Chapitre 2. Quelques éléments du système climatique étudiés à l'IRM.

### 1. Introduction

Les évolutions du climat, décelées à partir des séries d'observations belges en surface et décrites dans le chapitre précédent, ne sont pas très différentes de celles que les régions limitrophes ont pu connaître.

Les connaissances actuelles à propos du système climatique intègrent, outre l'ensemble des séries instrumentales de ce type récoltées par les services météorologiques du monde entier, de nombreuses autres données.

**Certaines études sont d'ailleurs menées à l'IRM et fournissent aux modélisateurs des données qui dépassent « les frontières belges ».**

C'est ce que nous allons aborder dans le présent chapitre. Comme on le verra, certaines mesures depuis le sol sont complétées par des mesures réalisées depuis l'espace.

L'IRM assure aussi le suivi de paramètres s'intégrant au système climatique et dont le rôle est loin d'être parfaitement modélisé.

Des changements de climat sont clairement décelables dans l'élévation des températures en Belgique (cf. chapitre 1) et à l'échelle planétaire.

Pour comprendre ces élévations de températures constatées et pour tenter de prévoir comment le climat et les températures pourraient évoluer à l'avenir, il est fondamental tant de mesurer le plus précisément possible ce qui est à leur origine que de bien interpréter les mesures (voir par exemple à ce sujet le rapport complet du Giec 2007, plus instructif que son simple résumé).

La figure 1 montre la variation de la température moyenne à Saint-Josse-ten-Noode/Uccle entre 1833 et 2007, dans laquelle les 12 moyennes mensuelles sont calculées de juillet à juin. En regard des sauts identifiés précédemment dans les moyennes entre 1909 et 1910 et entre 1987 et 1988, la température moyenne entre juillet 2006 et juin 2007 est de 2,1 °C au dessus de la normale. **Cette dernière anomalie dans la moyenne 2006-2007 est plus importante que jamais, quoiqu'il soit trop tôt pour décider s'il s'agit ici du début d'un nouveau saut dans la moyenne climatique.**

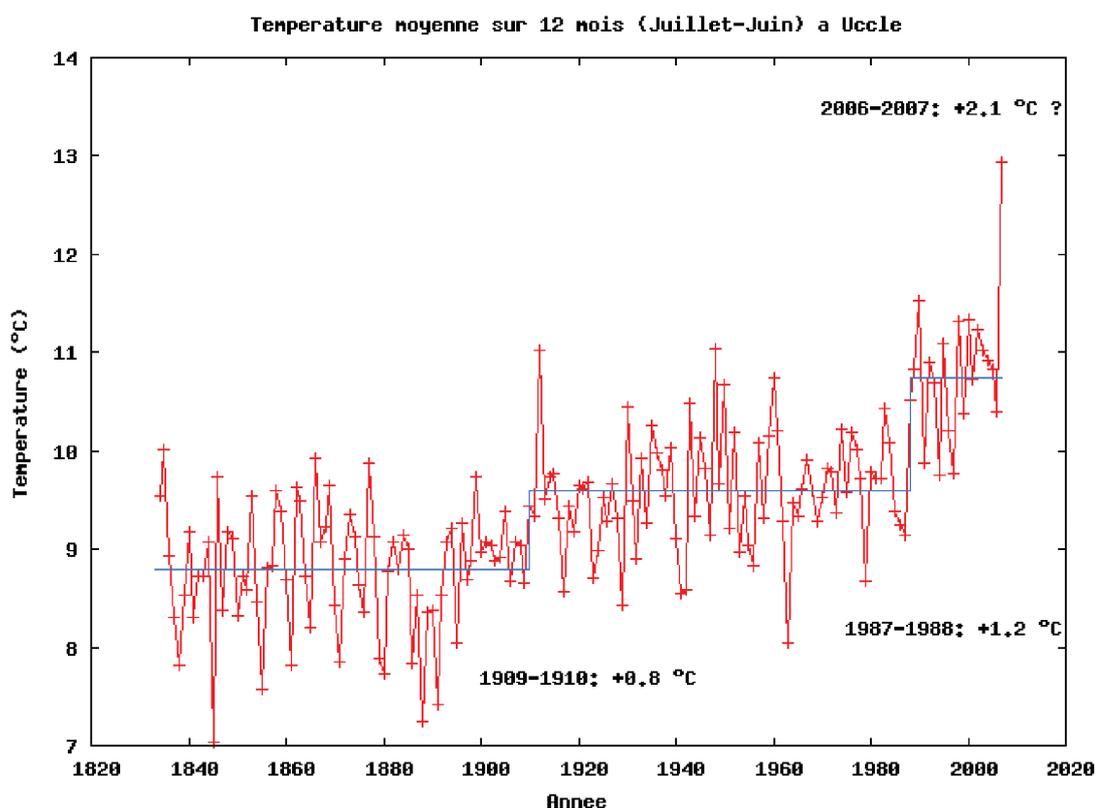


Figure 1. Série des températures « annuelles » calculées à partir des 12 moyennes mensuelles entre juillet et juin, à Uccle entre 1833 et 2007.

**Fondamentalement, le climat et donc les températures sont déterminés par le bilan énergétique de la Terre** comme nous le verrons dans le paragraphe suivant. D'éventuelles perturbations dans le bilan énergétique de la Terre déterminent selon le cas un réchauffement ou un refroidissement de la Terre. Ce sont ces perturbations qui sont à l'origine des changements de climat. L'IRM joue un rôle majeur à l'échelle mondiale dans le monitoring du bilan radiatif de la Terre.

Le bilan énergétique exprime comment la Terre se réchauffe du fait des rayonnements incidents venant du Soleil et de l'espace et comment elle se refroidit du fait des rayonnements qu'elle perd vers l'espace (cf. figure 2). Pour mesurer le rayonnement incident, l'IRM a été un des pionniers à l'échelle internationale lors de la mission Spacelab de 1983. Aujourd'hui, nos campagnes de mesures font autorité et sont des références grâce à notre instrument DIARAD/VIRGO installé sur le satellite SOHO depuis 1996.

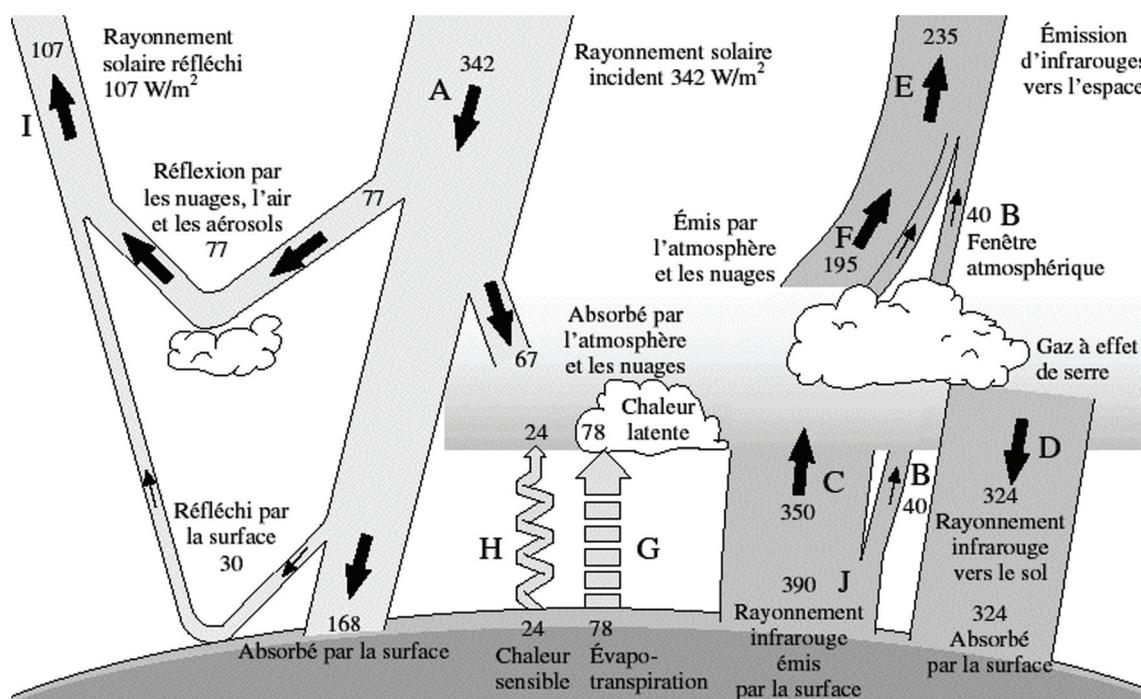


Figure 2. Les composants énergétiques de la Terre : les différentes formes d'énergie, leurs échanges et leurs interactions avec l'atmosphère et la surface de la Terre. Les chiffres indiquent les flux d'énergie exprimés en  $W/m^2$  pour la moyenne annuelle avec la planète entière. \*

\* Dans ce schéma simplifié, la valeur de la contribution solaire incidente est 4 x plus petite que la valeur habituellement retenue de la constante solaire qui est d'environ  $1360 W/m^2$ . La constante solaire est mesurée depuis un satellite perpendiculairement aux rayons. La Terre, assimilée à une sphère, a une superficie de  $4\pi R^2$ , tandis que la surface (en projection) vue par le Soleil ne fait que  $\pi R^2$  (avec  $R$  = rayon de la Terre), donc une surface 4 fois plus petite que la surface totale de la Terre intercepte à tout moment l'énergie du soleil qui se répartit en moyenne sur le globe entier.

Pour évaluer le refroidissement dû aux émissions d'énergie vers l'espace, l'instrument GERB (Geostationary Earth Radiation Budget ou en abrégé, GERB, cf. figure 3) installé sur les satellites européens Meteosat, est opérationnel depuis 2003. L'IRM est le centre où ces données sont traitées. **Ces données nous permettent donc d'étudier les mécanismes à l'oeuvre au cours de l'anomalie de 2006-2007 dont on a fait largement écho en Belgique et ailleurs.**

Pour évaluer les changements dans le bilan énergétique de la terre avant le début des mesures spatiales, l'IRM détient une longue série de mesures depuis la surface de la Terre de l'énergie entrante. La série la plus longue a été initiée en 1887. Des mesures plus précises et plus détaillées ont été entamées quant à elles en 1951. Depuis le milieu des années 1950, jusqu'aux années 1980, on constate une augmentation des énergies entrantes dans les valeurs du rayonnement solaire mesuré à Uccle qu'on peut évaluer à environ 10 %. Cette montée peut être expliquée par une diminution progressive du nombre d'aérosols (les petites particules présentes dans l'atmosphère) qui ont été mesurés indépendamment. A côté de l'augmentation des gaz à effet de serre, **la diminution de la pollution industrielle**

**classique aurait donc joué un rôle dans le réchauffement de la Terre.** Ce réchauffement supplémentaire doit être pris en compte pour étudier le saut de 1987-88 dans les températures.

Dans les paragraphes suivants, nous examinerons successivement les mesures GERB mises en relation avec l'anomalie des températures de 2006-2007, les mesures du rayonnement solaire au sol et des aérosols mises en relation avec le saut dans les températures moyennes en 1987-1988, les mesures du rayonnement incident au sommet de l'atmosphère mises en relation avec l'évolution des températures à long terme qui s'est manifestée dans le saut dans les températures entre 1909 et 1910.

## 2. Le rayonnement solaire et le rôle des aérosols

### Le Bilan énergétique de la Terre mesuré depuis l'espace.

Le climat de la Terre dépend de l'équilibre entre le réchauffement dû à l'énergie qui entre (flèche A dans la figure 2) et au refroidissement dû aux réflexions (flèches E et I dans la figure 2) au sommet de l'atmosphère ainsi que de la réémission d'énergie par la Terre vers l'espace sous forme d'infrarouge, (flèche E figure 2). L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère se traduit par une diminution de la réémission du rayonnement IR thermique, ce qui entraîne une augmentation de la température.

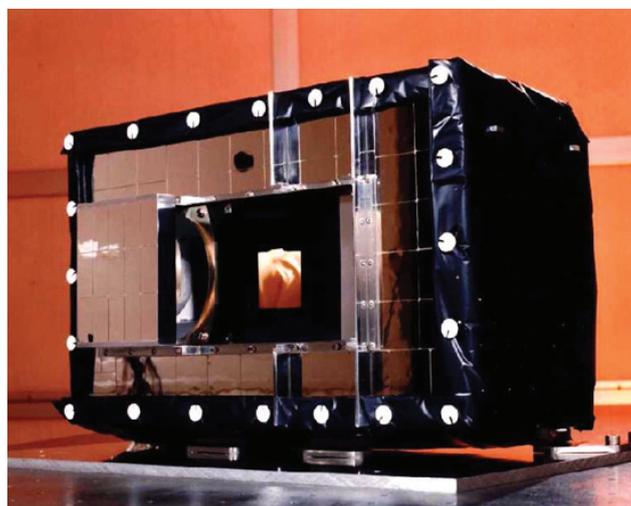


Figure 3. L'instrument GERB pour la mesure du bilan énergétique de la Terre.

Tant la réflexion du rayonnement solaire que la réémission des infrarouges sont fortement influencées par la présence des nuages. **Il y a encore une grande incertitude à propos de l'effet de l'augmentation de la température sur la formation des nuages,** suite à l'augmentation de l'effet de serre<sup>18</sup>. On ne sait même pas si l'augmentation de la nébulosité aurait un effet éventuellement contrecarrant l'augmentation de la température (en réfléchissant plus le rayonnement ; rétroaction négative) ou au contraire amplifiant le réchauffement (en augmentant l'effet de serre ; rétroaction positive). Pour pouvoir tirer des conclusions générales, des mesures satellitaires à large échelle sont indispensables.

L'instrument mesurant le Bilan Radiatif Géostationnaire a été développé par un consortium regroupant le Royaume-Uni, l'Italie et la Belgique. Le traitement de données est principalement effectué par l'IRM. « GERB » mesure le bilan radiatif au-dessus de l'Europe et de l'Afrique à partir d'instruments se trouvant sur les satellites géostationnaires Meteosat 8 et Meteosat 9 depuis 2003. **L'analyse des données GERB permettra de discriminer les différents facteurs qui peuvent jouer un rôle dans les changements de climat (effet de serre, aérosols, changement dans la nébulosité).**

<sup>18</sup> Quelques-unes des autres incertitudes sont d'ailleurs évoquées au chapitre 3.

Moyenne annuelle de la perte totale d'énergie de 5/2005 à 4/2006

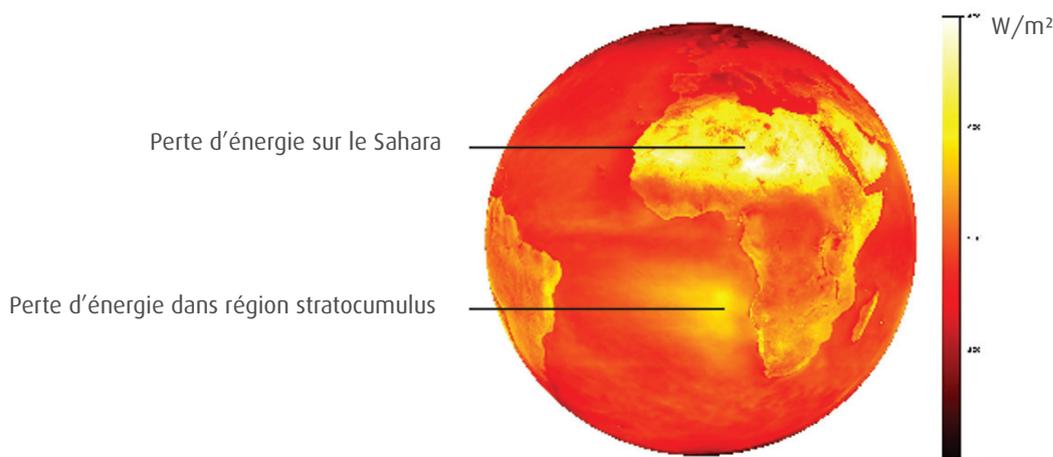


Figure 4. Perte d'énergie vers l'espace dans le champ de visibilité de Météosat pour la période d'un an entre mai 2005 et avril 2006.

La moyenne annuelle de perte d'énergie entre mai 2005 et avril 2006 est montrée à la figure 4. Des régions de fortes pertes se remarquent au-dessus du Sahara, et dans la région des stratocumulus sur la côte ouest de l'Afrique du Sud. Ces régions de fort refroidissement sont à mettre en relation avec le courant descendant dans la circulation tropicale de Hadley alors que le courant ascendant dans la circulation de Hadley aux environs de l'équateur coïncide avec les régions où le réchauffement est maximum. Il y a donc un lien direct entre la dynamique de l'atmosphère à grande échelle et la répartition spatiale du bilan radiatif.

Gain d'énergie additionnel pour 5/2006 - 4/2007 compare à 5/2005-4/2006

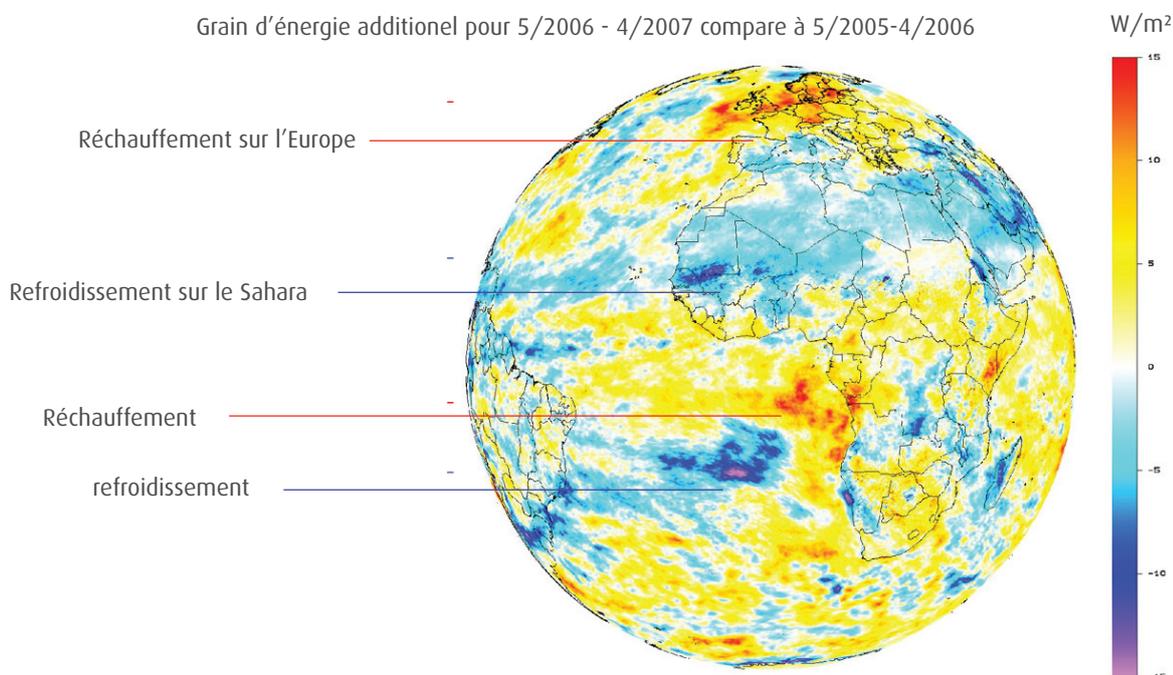


Figure 5. Changement net en termes de gain d'énergie dans le champ de vision de Météosat entre l'année 1 (mai 2005-avril 2006) comparativement à l'année 2 (mai 2006-avril 2007).

Le changement net en termes de gain d'énergie pour l'année 2, par comparaison avec l'année 1, est montré à la figure 5. Les faits les plus frappants sont d'une part la hausse dans le bilan énergétique au-dessus de l'Europe marqué en rouge et d'autre part le différentiel réchauffement/refroidissement marqué en bleu foncé et en violet pour la région des stratocumulus qui peut être expliqué par un déplacement géographique de cette région des stratocumulus. On remarque aussi une région assez étendue au-dessus du Sahara caractérisée par un faible refroidissement (en bleu clair).

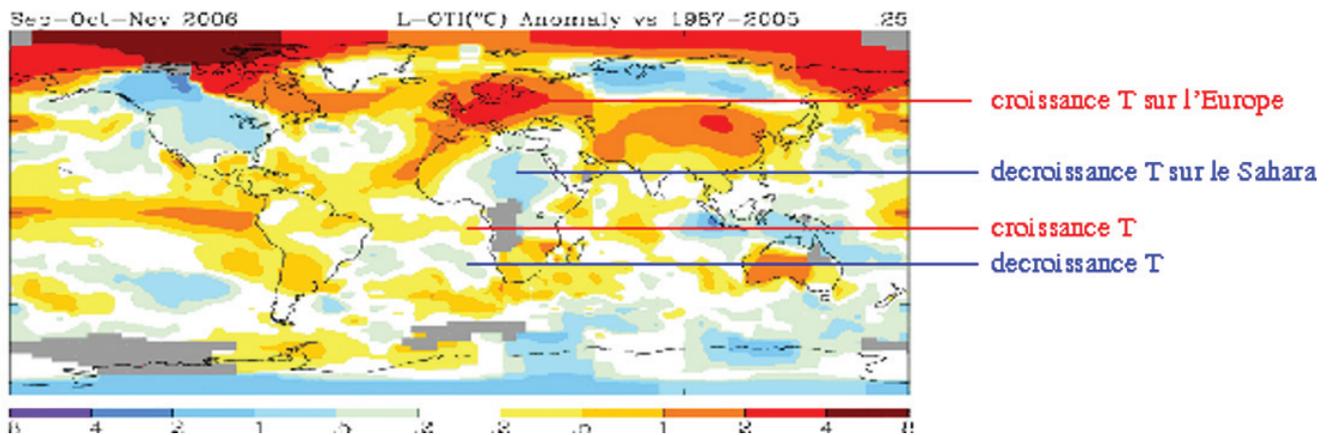


Figure 6. Anomalie des températures pour la période septembre-novembre 2006 en comparaison avec la période septembre-novembre 1987-2005.

L'anomalie de températures en 2006-2007 n'a pas été observée qu'en Belgique. La figure 6 montre les changements des températures pour les mois de septembre-novembre 2006 en comparaison avec la climatologie entre 1987 et 2005. La figure des changements de températures montre une certaine similitude avec celle des changements dans les gains d'énergie. Dans une certaine mesure, les hautes températures enregistrées en Europe après l'été 2006 correspondent aux gains d'énergies mesurés par GERB. De même, le différentiel dans les changements de températures dans la région des stratocumulus et dans la région au-dessus du Sahara semble avoir pour origine un changement corrélé aux pertes d'énergie. On pouvait s'attendre à une corrélation entre le gain d'énergie et le changement de températures selon le principe de la conservation de l'énergie. L'instrument GERB est le premier instrument à apporter la preuve de ce lien. **Le monitoring du climat et l'analyse de la prévisibilité des changements de climat doivent être poursuivis par étapes.**

### Le rayonnement solaire, les aérosols et le bilan radiatif

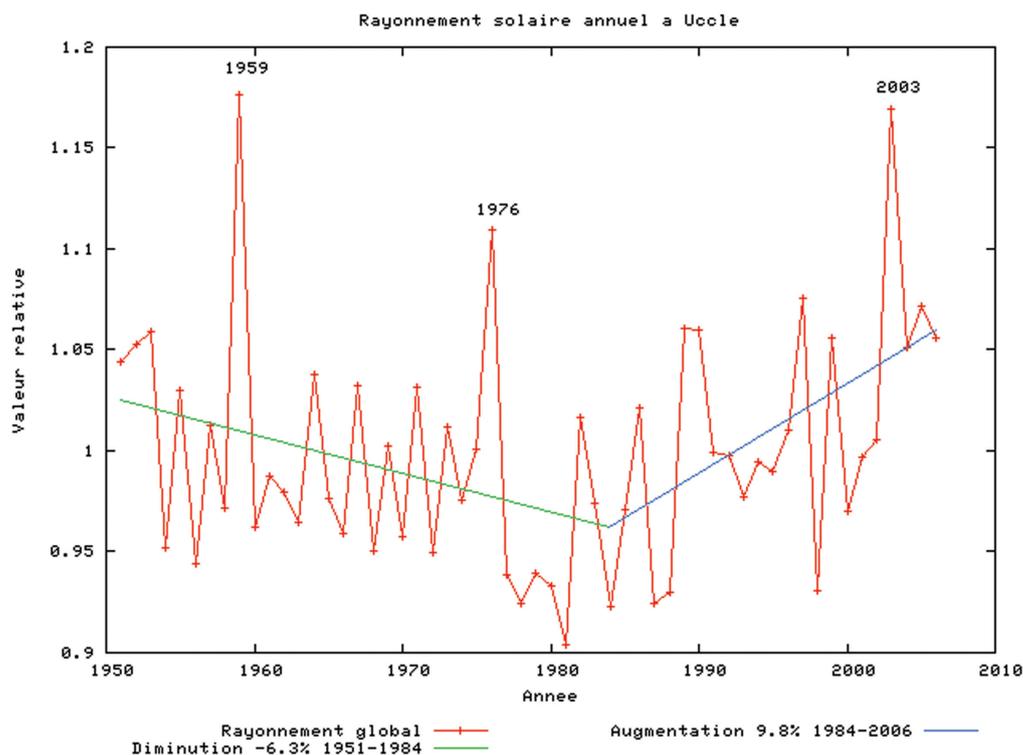


Figure 7. Variation relative du rayonnement solaire global annuel à Uccle sur la période 1951-2006.

Les grands enjeux de la communauté scientifique sont entre autres de déterminer dans quelle mesure les changements climatiques pourraient être nuisibles notamment pour la santé et aussi de déterminer la part de responsabilité de l'homme (GIEC 2001, 2005, 2007). Ainsi qu'annoncé déjà dans le chapitre 1, l'IRM mesure l'intensité du rayonnement solaire à Uccle depuis 1887 via les valeurs de la durée d'ensoleillement. D'autre part, l'IRM mesure, respectivement depuis 1951 et 1984, le rayonnement solaire global et la quantité de particules dans l'atmosphère.

Le rayonnement solaire global au sol est la quantité d'énergie solaire qui atteint une surface horizontale. Ce paramètre dépend en premier lieu de l'abondance de la nébulosité (une faible nébulosité entraînant un important rayonnement) et en second lieu de la transparence de l'atmosphère en l'absence de nuages, qui à son tour dépend de la quantité de vapeur d'eau, de la quantité d'ozone et de l'abondance des aérosols. Ces derniers sont de petites particules en suspension dans l'atmosphère (comme par exemple le sel marin ou les poussières) se trouvant principalement entre le sol et environ 3 km d'altitude. L'augmentation de la concentration des aérosols dans l'atmosphère diminue l'intensité du rayonnement au sol par effet direct et indirect. L'effet direct des aérosols diminue la transmission de l'énergie solaire à travers une atmosphère sereine. De part leur composition, les aérosols soit absorbent, soit réfléchissent plus ou moins le rayonnement solaire. L'effet indirect des aérosols est qu'en favorisant la condensation de la vapeur d'eau ils augmentent la réflexion de l'énergie solaire par les nuages, atténuant la part du rayonnement qui atteint le sol.

La série la plus longue de mesures du rayonnement « global » (c'est-à-dire qui comprend le rayonnement direct et le rayonnement indirect) en Belgique est celle d'Uccle qui a commencé en 1951. La courbe en rouge sur la figure 7 indique les variations relatives des valeurs annuelles du rayonnement global (relativement à la moyenne sur la période entière 1951-2006).

Les années enregistrées comme ensoleillées et chaudes (1959, 1976 et 2003) apparaissent comme les années au cours desquelles le rayonnement global a été exceptionnellement élevé. **Le réchauffement de la surface peut donc être au moins partiellement imputable au rayonnement solaire**, à côté d'une possible advection d'air chaud amené par les vents dominants. Une analyse plus approfondie de ces données montre que l'ensoleillement exceptionnel pour ces 3 années est attribué à une très faible quantité de nuages.

Sur la période 1951 à 1984, le rayonnement solaire diminue de 6,3 % (ligne verte dans la figure 7). Ce résultat est en bon accord avec le « Global Dimming »<sup>19</sup> établi au plan international.

Sur la période 1984 à 2006, on assiste à une augmentation moyenne de 9,8 % du rayonnement global (ligne bleue sur la figure 7). Cette observation est en accord avec l'augmentation récente établie à l'échelle internationale par le réseau BSRN (Baseline Surface Radiation Network, <http://bsrn.ethz.ch>).

Ces changements à long terme du rayonnement solaire ne peuvent être expliqués que par des changements dans la quantité d'aérosols qui proviennent de la pollution de l'air.

Les températures moyennes à Uccle (cf. figure 1) ne montrent pas une augmentation systématique au cours de la période du « Global Dimming ». En revanche, le saut dans les températures en 1987-1988 et l'anomalie de 2006-2007 ont lieu au moment d'une augmentation du rayonnement solaire global.

**L'influence de la variation du rayonnement solaire n'est donc pas négligeable comparée à l'influence des gaz à effet de serre et au CO2 en particulier.** Durant la période 1951-1983, le refroidissement causé par la diminution du rayonnement solaire aurait compensé pour une part le réchauffement dû aux gaz à effet de serre. En revanche, de 1984 à aujourd'hui, le réchauffement dû aux gaz à effet de serre est accéléré du fait de l'augmentation du rayonnement solaire au sol.

Pour la période entre 1887 et 1950, la durée d'ensoleillement et donc aussi le rayonnement solaire augmentent. L'augmentation de ces paramètres influence à la hausse la température entre 1887 et 1950.

<sup>19</sup> Global Dimming : Diminution du rayonnement solaire qui atteint le sol mesurée à plusieurs endroits sur la Terre ; on peut traduire l'expression par « assombrissement global ».

Le paramètre le plus important qui influence la variation de la quantité de rayonnement solaire à long terme est **la quantité d'aérosols provenant, entre autres, très probablement de la pollution dans l'atmosphère**. Les activités humaines n'ont donc pas seulement un effet réchauffant dû à l'émission des gaz à effet de serre, mais aussi un effet refroidissant du fait de la présence des aérosols provenant de la pollution dans l'atmosphère.

Depuis 1984, les valeurs des Epaisseurs Optiques des Aérosols (EOA ou AOD en anglais) dans l'UVB<sup>20</sup> sont mesurées à Uccle : cette mesure représente en fait l'atténuation du rayonnement solaire au sol par les aérosols. Cette mesure est directement liée à la quantité de particules suspendues dans l'air: plus l'épaisseur optique est grande plus il y a de particules dans l'air et moins il y a de rayonnement solaire au sol.

La figure 8 représente la tendance de la valeur moyenne annuelle des EOA depuis 1985 jusque fin 2006. On peut voir que la tendance est clairement négative (-1,42 %/an) ce qui signifie que la quantité de particules dans l'atmosphère diminue durant cette période. Cela explique pour une partie les observations faites à Uccle du rayonnement solaire (cf. figure 7).

De plus, l'augmentation des EOA en 1992 est attribuée à l'éruption volcanique du Pinatubo aux Philippines qui a éjecté une énorme quantité de particules dans l'atmosphère en 1991.

Cet évènement met en évidence le caractère global (global au sens qu'il a un impact sur l'ensemble du globe terrestre) de la répartition des aérosols et donc de la quantité de rayonnement solaire reçu au sol.

Afin d'étudier de manière plus globale les aérosols, la méthode utilisée pour déterminer ces EOA à Uccle peut être appliquée aux autres instruments spectrophotométriques répartis partout dans le monde. L'IRM peut actuellement calculer les EOA à 14 autres endroits de la planète<sup>21</sup>.

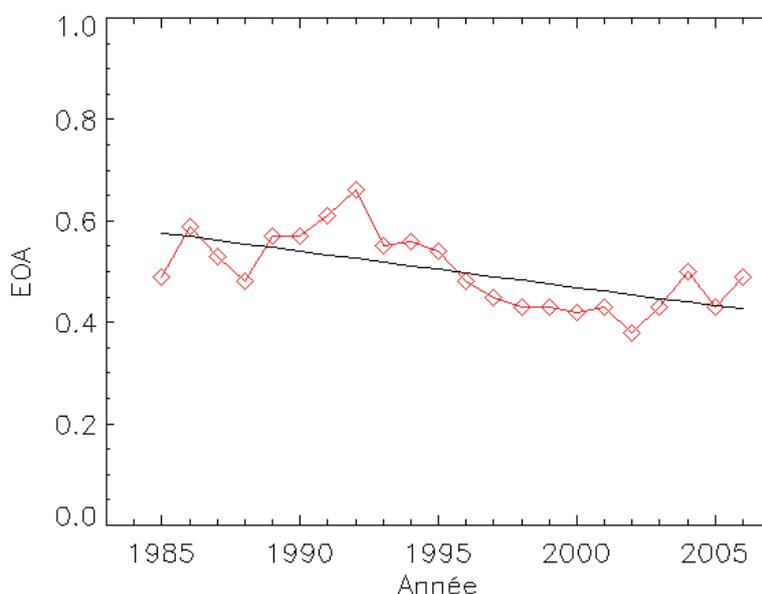


Figure 8. Epaisseurs optiques des particules suspendues dans l'air (EOA) depuis 1985 à Uccle.

<sup>20</sup> Les UV sont composés du rayonnement solaire ultra-violet dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 400 nanomètres. Les UVB sont les UV dont les longueurs d'ondes sont comprises entre 280 et 315 nanomètres.

<sup>21</sup> Rome (Italie), Norrköping (Suède), Toronto et Resolute Bay (Canada), Yakutsk (Russie), Petaling Jaya (Malaisie), Séoul (Corée), Hong Kong (Chine), Belgrano (Antarctique), Arosa (Suisse), Funchal, Lisbonne et les Açores (Portugal), El Arenosillo (Espagne).

## Reconstitution de l'évolution du rayonnement solaire depuis 1200 ans.

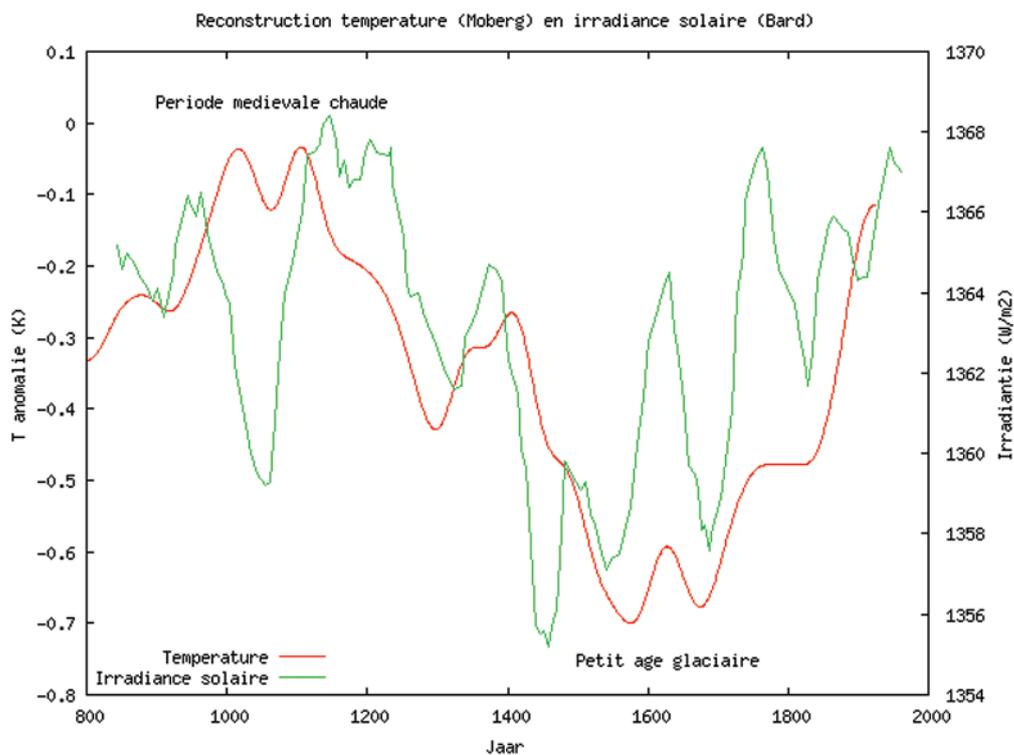


Figure 9. La courbe en rouge dont l'échelle est à gauche tente de reconstituer les températures entre 800 à 2000. La courbe verte dont l'échelle est à droite tente de reconstituer l'irradiance solaire.

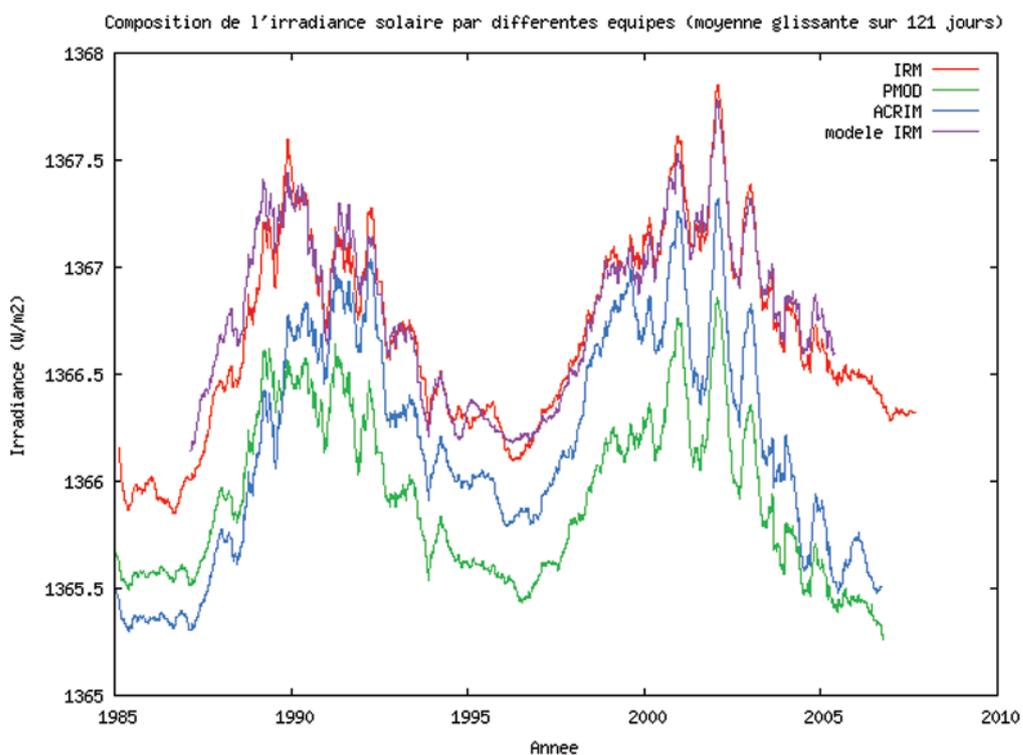


Figure 10. Composition des mesures des variations de l'irradiance solaire pour les deux derniers cycles solaires de 11 ans réalisées par trois équipes internationales.



Figure 11. L'équipe de l'IRM qui met au point les instruments spatiaux devant le prototype du radiomètre Sovap pour le projet Picard. Elle prolonge les travaux sur la bien mal nommée « constante solaire » entamés par le professeur Crommelynck dès les années 1970.

La reconstruction sur le long terme des températures (la courbe rouge sur la figure 9) montre une période chaude au Moyen Age (optimum médiéval vers 1100) ainsi qu'une période froide (le petit âge glaciaire aux alentours de 1600) qui vraisemblablement peuvent être expliquées par les variations de l'énergie solaire entrante dans le bilan radiatif.

La courbe verte dans la figure 9 montre une reconstruction de l'irradiance solaire sur base des mesures de l'isotope Be10 dans les noyaux de glace. Le Be10 est en effet un indicateur de l'activité solaire. Pendant la période chaude du Moyen Age, l'activité solaire était vraisemblablement très élevée et pendant le petit âge glaciaire, vraisemblablement très basse.

Des mesures de l'irradiance solaire doivent être réalisées depuis l'espace pour s'affranchir de l'influence des variations dans l'atmosphère. Les premières données spatiales utilisables datent de 1978. L'IRM a été un des pionniers pour améliorer la mesure de ce paramètre grâce à son premier instrument installé à bord de Spacelab en 1983 et ensuite à l'occasion de plusieurs missions dont la dernière Colombia en 2003.

On mesure aujourd'hui ces variations grâce à l'instrument DIARAD/VIRGO de l'IRM à bord du satellite SOHO depuis le début de l'actuel cycle solaire en 1996. Cet instrument est réputé le plus stable pour la mesure des variations de l'irradiance solaire.

A l'échelle internationale, l'équipe de l'IRM est un des trois groupes (un belge, un américain et un suisse) qui participent aux mesures de l'irradiance solaire. Sur la figure 10, la courbe rouge représente notre contribution, la verte la contribution des collègues suisses de PMOD et la bleue, celle des collègues américains de l'ACRIM. Nous nous accordons sur le fait qu'à court terme (court à l'échelle climatique), l'irradiance solaire varie selon le cycle de l'activité solaire bien connu de 11 ans à partir de l'observation des taches solaires. Ces variations undécennales sont de l'ordre de 0,1 % et seraient à l'origine de variations de températures globales d'un ordre de 0,1 °C.

**Bien que très petites, ces variations ne sont pas négligeables** et doivent être prises en compte pour suivre les variations de la température dues à l'effet de serre et à la variation des aérosols.

Il y a des différences de point de vue entre les trois groupes pour ce qui concerne la variation de l'irradiance solaire entre les différents minima successifs du cycle. Si ces variations existent, elles sont pertinentes pour le suivi des changements climatiques.

Nous évaluons ces variations entre les minima de 1986 et 1996 à une augmentation de 0,15 W/m<sup>2</sup>, ce qui n'est pas significatif par rapport à un degré d'incertitude de  $\pm 0,35$  W/m<sup>2</sup>.

L'ACRIM évalue l'augmentation à 0,8 W/m<sup>2</sup> et le PMOD ne détecte aucune augmentation dans l'irradiance entre les 2 minima. Pour ce qui concerne l'actuel cycle solaire, entamé en 1996 et qui est dès lors proche de son minimum, nous ne détectons pas de variation avec un degré d'incertitude de  $\pm 0,14$  W/m<sup>2</sup>. L'incertitude a donc été réduite de moitié en grande partie grâce à la stabilité accrue de notre instrument DIARAD/VIRGO. Les autres équipes détectent toutes deux grâce à leurs instruments une diminution pour l'actuel cycle solaire. Ces divergences des résultats peuvent être expliquées d'une part par l'utilisation du seul instrument ACRIM3 par le groupe américain et d'autre part par une méthodologie du groupe suisse qui s'écarte des deux autres pour ce qui concerne la correction de leurs données.

A la fin de l'année 2007, notre instrument DIARAD/SOVIM a été installé sur le module européen Columbus. Son lancement sur la navette Atlantis et son installation sur la station spatiale internationale a été couronné de succès ce 7 février 2008.

**Grâce à ces observations spatiales, si on a la certitude que l'irradiance solaire oscille au cours du cycle undécennal d'un minimum à l'autre, on peut supposer en revanche que celle-ci n'a pas connu de variation significative sur le long terme au cours des 30 dernières années.**

D'autre part, on sait, grâce aux observations des taches solaires initiées entre autres par Galilée au 17<sup>e</sup> siècle, qu'entre 1650 et 1700 est survenu un long épisode où le Soleil ne présentait pratiquement aucune tache.

Cette période appelée le minimum de Maunder<sup>22</sup> correspondrait à la seconde partie du petit âge glaciaire. A partir de l'étude des radio-isotopes C14 et Be10, une reconstruction de l'activité solaire nous indique que le Soleil connaîtrait des variations à plus long terme encore comme semble le démontrer l'existence du minimum de Wolf et Spörer coïncidant avec le début du petit âge glaciaire ainsi qu'un « grand maximum » coïncidant, quant à lui, avec l'optimum médiéval. Il y aurait donc, sur base de ces reconstructions et pour ce qui concerne les changements dans l'activité solaire, des variations rythmées selon des périodes différentes : à côté des petites variations cycliques de 11 ans, des grandes variations.

Pour mesurer l'ampleur de ces grandes variations, nous devrions pouvoir mesurer l'irradiance solaire pendant le minimum de Maunder. C'est ce que nous comptons faire indirectement en participant au projet scientifique Picard en collaboration avec la France et la Suisse. Picard est un microsatellite qui porte le nom de l'Abbé Jean Picard, astronome du Roi Soleil Louis XIV. Ce satellite mesurera les variations du rayonnement solaire ainsi que le diamètre solaire pour évaluer son incidence sur l'excentricité de la trajectoire terrestre. Son lancement est prévu pour 2009. La figure 11 présente l'équipe de l'IRM responsable de la mise au point de l'instrument prototype Sovap pour l'expérience Picard.

Nous pouvons également nous appuyer sur une série historique de données de bonne qualité qui estiment le diamètre solaire à partir de la durée des passages de Venus devant le Soleil. On pense que pendant les périodes calmes, le Soleil émet un rayonnement moins énergétique et présente un diamètre plus grand. La combinaison des données issues du satellite Picard avec ces reconstructions historiques pourrait donner une meilleure estimation de l'activité solaire pendant le minimum de Maunder. **La reconstruction des variations de l'énergie solaire combinées à la reconstruction des températures offrira une meilleure approche de la réponse climatique à ce forçage radiatif.** L'évolution du climat pourrait trouver là encore une meilleure source d'étude.

---

<sup>22</sup> Edward Walter Maunder, astronome anglais (1851-1928), a étudié les taches et le cycle magnétique solaires. En analysant les données disponibles à son époque et en remontant dans le temps, il a pu déceler une période de très faible activité solaire, période allant de 1645 à 1715, appelée aujourd'hui le minimum de Maunder, et probablement responsable du refroidissement connu sous le nom du petit âge glaciaire.

### 3. L'ozone

L'ozone est un gaz présent dans l'atmosphère dont les molécules sont constituées de trois atomes d'oxygène (O<sub>3</sub>), contrairement à l'oxygène ordinaire qui n'en comprend que deux (O<sub>2</sub>). L'ozone est produit grâce aux interactions entre l'oxygène ordinaire, la lumière solaire et des composants minoritaires présents dans l'atmosphère. Une de ses caractéristiques très spécifiques est son grand pouvoir d'absorption des rayons UV<sup>23</sup> de la lumière. On trouve ses plus fortes concentrations dans les niveaux élevés de l'atmosphère (entre 20 et 25 km d'altitude). C'est précisément ce pouvoir d'absorption élevé qui est responsable de l'inversion du profil des températures avec l'altitude. En dessous de la couche d'ozone (dans la troposphère), la température diminue avec l'altitude alors que c'est le contraire au-dessus (dans la stratosphère).

L'ozone est une molécule très instable. C'est ce qui explique que même à de très faibles concentrations, certains composants chimiques peuvent être à l'origine de perturbation dans son équilibre. Citons l'exemple des composés chlorés qui se sont accumulés dans la stratosphère suite à l'usage des fréons dans les installations frigorifiques et les « sprays ». Ces composés chlorés peuvent dans certaines conditions diminuer le niveau de concentration d'ozone. En conséquence de quoi, une plus grande intensité de rayonnement UV atteint le sol.

**Après l'interdiction des fréons (Protocole de Montréal en 1987) le niveau de la concentration d'ozone devait se reconstituer.** Pour établir si cela s'est réellement passé comme prévu, il s'agit encore aujourd'hui de suivre ce niveau par des observations continues.

Dans la troposphère, se pose un autre problème. En effet, l'ozone est un gaz agressif qui à fortes concentrations peut créer par exemple des problèmes respiratoires. Les concentrations d'ozone dans la troposphère varient très fort en fonction des conditions météorologiques et en fonction des concentrations de certains composants chimiques (pollution). Il y a lieu dès lors d'être vigilant pour que la concentration d'ozone dans la troposphère ne soit pas trop élevée.

Pour mesurer la quantité d'ozone (appelé communément « l'épaisseur de la couche d'ozone ») dans l'atmosphère, on utilise plusieurs techniques.

- Depuis le sol, on peut mesurer l'intensité lumineuse dans des longueurs d'ondes spécifiques (dans le domaine de l'UV) et en connaissant le pouvoir d'absorption de l'ozone, en déduire sa concentration. Des travaux pionniers à ce propos ont été réalisés par Dobson qui a donné son nom non seulement aux instruments qu'il a mis au point mais aussi à l'unité « Dobson » (DE), unité de mesure en matière de concentration d'ozone. Celle-ci correspondrait à une épaisseur d'un centième de millimètre à la pression d'1 atm (1013,25hPa) et à 0 °C. Au dessus de nos régions, « l'épaisseur de la couche d'ozone » oscille autour de 320 DE, ce qui correspond à environ 3 mm d'épaisseur pour les conditions normales.



Figure 12. Instruments à Uccle mesurant le rayonnement UV.

<sup>23</sup> Les UV sont composés du rayonnement solaire ultra-violet dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 400 nanomètres.

- Une autre méthode pour obtenir des informations sur l’ozone dans l’atmosphère est d’envoyer un capteur chimique à différents niveaux d’altitude en le fixant sur un ballon-sonde. Cette technique permet de connaître le profil vertical de la concentration en ozone.



Figure 13. Lancement du ballon-sonde à Uccle

- Les observations depuis l’espace nous donnent en outre une image globale de la répartition d’ozone.

L’ozone proche du sol est le plus souvent mesuré grâce à des instruments basés sur l’absorption des UV de ce gaz. Bien entendu, les sondages d’ozone donnent eux aussi des informations sur l’ozone dans la troposphère. Les données satellitaires en revanche sont très peu sensibles aux concentrations d’ozone dans la troposphère.

Dans le paragraphe suivant, nous présentons les résultats des mesures réalisées par l’IRM.

### Observations depuis le sol et par ballon sonde dans un contexte de surveillance internationale.

#### Une longue tradition dans l’observation de la couche d’ozone.

**A Uccle, depuis 1969, trois sondages hebdomadaires sont réalisés par ballons-sondes.** Ces sondages livrent le profil vertical de la pression, de la température, de l’humidité de l’air et de la concentration en ozone jusqu’à une hauteur approximative de 32 km. L’IRM possède ainsi, comme très peu d’autres instituts dans le monde (à Hohenpeißenberg en Allemagne, à Payerne en Suisse), l’une des plus longues séries des profils d’ozone au monde. De plus, l’épaisseur totale de la couche d’ozone est mesurée par des spectrophotomètres installés au sol à Uccle depuis 1971. Ces longues séries sont fondamentales pour étudier les changements climatiques dans l’atmosphère à long terme. Avant qu’elles ne soient utilisées à cette fin, il s’agit de contrôler leur qualité. Ces séries obtenues à l’aide de sondages et de mesures spectrométriques au sol sont, dès lors, régulièrement vérifiées et parfois corrigées pour compenser d’éventuelles erreurs dues aux effets instrumentaux<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> Une série temporelle de mesures ainsi corrigée est dite « homogénéisée ».

## L'évolution temporelle de l'épaisseur d'ozone.

Une analyse des séries homogénéisées de l'épaisseur totale de la couche d'ozone mesurée à Uccle est présentée à la figure 14. Elle montre la moyenne glissante annuelle<sup>25</sup> depuis que l'IRM mesure quotidiennement l'épaisseur d'ozone :

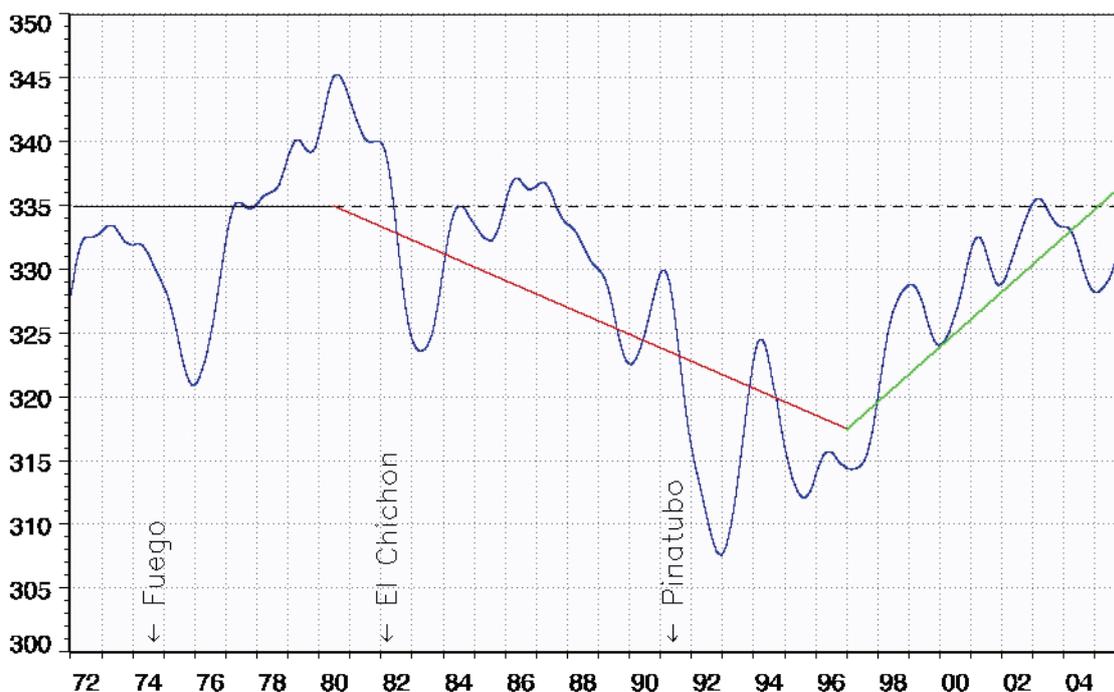


Figure 14. Evolution de l'épaisseur totale de la couche d'ozone (moyenne glissante annuelle) mesurée à Uccle de 1972 à 2004. L'épaisseur est exprimée en unités « Dobson ». Outre l'évolution de la moyenne annuelle de l'épaisseur de la couche d'ozone (en bleu), la figure montre par rapport à une valeur de référence d'avant 1980 (ligne noire) les tendances distinctes entre 1980 et 1997 (en rouge) et entre 1997 et 2004 (en vert).

On sait, grâce à des travaux réalisés par une équipe de l'Université de Liège<sup>26</sup> qui les observe, que les matières destructrices d'ozone (en particulier les Chlorofluorocarbures ou CFC) ont atteint une concentration maximale au milieu des années 1990. Leur concentration a ensuite diminué légèrement grâce aux décisions du protocole de Montréal qui interdisait la production de ces substances<sup>27</sup>. C'est pourquoi une tendance a été calculée sur les différentes périodes. Jusqu'en 1980, on ne décèle pas de tendance et cette période est encore considérée comme la période de référence, symbolisée par la ligne horizontale noire sur la figure. Ensuite, on décèle d'abord une faible tendance à la baisse jusqu'au milieu des années 1990 (-0,32 % par an), symbolisée par la ligne rouge sur la figure où un minimum est atteint. Enfin, une certaine reconstitution de l'ozone voit le jour (+0,65 %/an), symbolisée par la ligne verte sur la figure.

### Interprétation de ces résultats.

**Il faut être prudent pour interpréter la reconstitution de la couche d'ozone qui semble se produire depuis une dizaine d'années**, la période considérée étant un peu trop courte pour pouvoir tirer des conclusions définitives. Si les décisions prises par la mise en application du protocole de Montréal peuvent être invoquées, cette inversion de tendance est sans doute aussi due à des variations naturelles imputées aux circonstances atmosphériques.

<sup>25</sup> Une moyenne glissante est une notion statistique calculée sur les valeurs consécutives.

<sup>26</sup> Le Groupe InfraRouge de Physique Atmosphérique et Solaire ou GIRPAS.

<sup>27</sup> Le protocole de Montréal a été adopté le 16/09/1987 et est entré en application le 1/01/1989 (il interdit la production des substances destructrices de l'ozone).

En plus, il est assez bien établi que l'activité volcanique a des effets importants sur la quantité d'ozone dans l'atmosphère (les effets d'éruptions importantes comme celles du Fuego, El Chichon et Pinatubo sont visibles sur la figure 14). On trouve des résultats de tendances comparables dans la littérature scientifique internationale, que ce soit sur base de données satellitaires ou à partir de données de plusieurs stations au sol, ce qui augmente la fiabilité des résultats. Cependant, ceux-ci ne sont pas encore tout à fait convaincants sur le plan statistique. Seules, d'autres observations complémentaires à l'avenir permettront de distinguer si cette reconstitution de l'ozone est due à des fluctuations naturelles ou si les actions de l'homme en sont responsables. L'ozone est, en outre, un gaz à effet de serre. L'interaction qui peut exister entre la concentration d'ozone dans l'atmosphère et le réchauffement est encore pour le moment très mal connue.

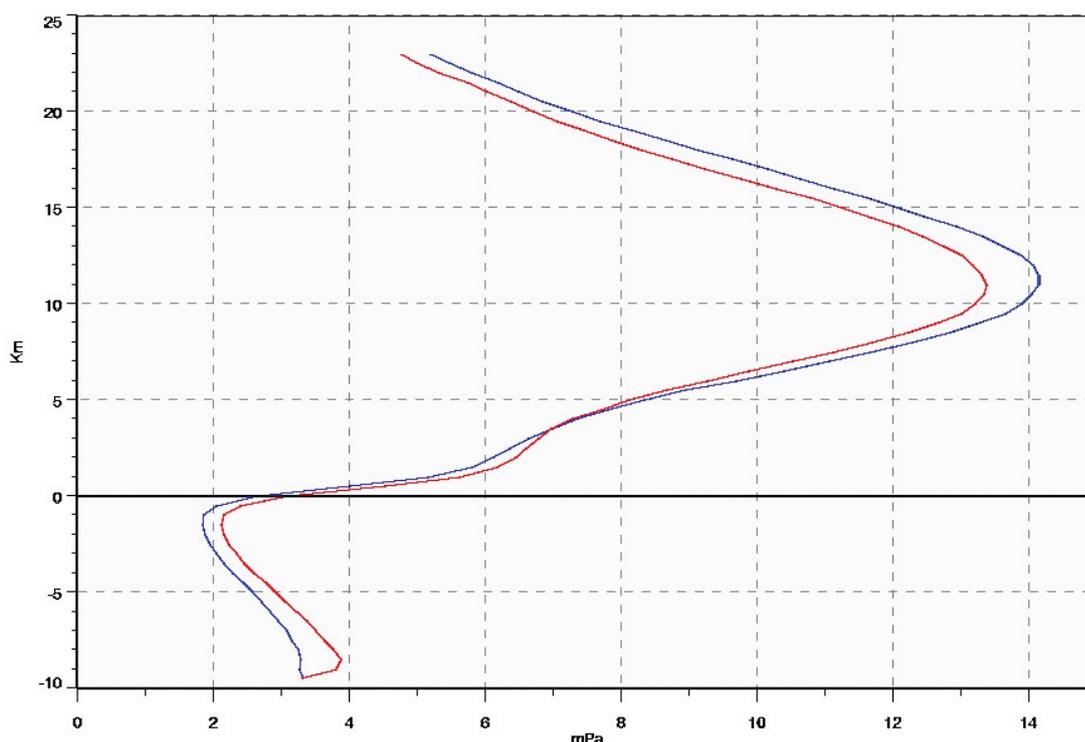


Figure 15. Comparaison des profils moyens d'ozone (en mPa) en fonction de l'altitude. En rouge, la période la plus récente (1994-2004). En bleu, la période la plus ancienne (1969-1979). La ligne horizontale en noire est la tropopause, limite entre la stratosphère et la troposphère

Grâce aux profils des concentrations d'ozone enregistrés, on peut déceler à quelles altitudes les changements ont lieu. Sur la figure 15, on compare deux périodes de 10 ans. Il apparaît clairement que c'est au niveau de la stratosphère<sup>28</sup> que la quantité totale d'ozone a le plus diminué. Par contre, il y a dans la troposphère<sup>29</sup> une tendance inverse (une augmentation de la concentration d'ozone au niveau du sol) qui est imputable, elle, à la production photochimique d'ozone due aux polluants présents au sol.

### Projets en cours.

Dans le cadre des activités COST action 726 (« Long term changes and climatology of UV radiation over Europe »), l'IRM prend part à la reconstitution de l'histoire de l'intensité des UV en Europe depuis 1950. C'est sur base d'une modélisation utilisant ce que l'on appelle des « proxys », à savoir des observations qui ont un lien indirect avec l'intensité des UV, comme par exemple le rayonnement solaire global (global au sens qu'il implique toutes les longueurs d'ondes du spectre solaire). L'IRM a pour sa part des observations de l'intensité UVB depuis 1989.

<sup>28</sup> Stratosphère : région de l'atmosphère au sein de laquelle la température ne varie plus avec l'altitude (elle est située entre 10 et 50 km d'altitude environ).

<sup>29</sup> Troposphère : région la plus basse de l'atmosphère au sein de laquelle la température diminue avec l'altitude (elle est située entre le sol et 10 km d'altitude environ).

#### 4. Autres données du climat mesurées par l'IRM.

- **Les différents rapports du GIEC ont tous souligné le rôle de la vapeur d'eau comme gaz à effet de serre.** L'IRM dispose d'une série d'observations par sondage de bonne qualité et homogène pour la vapeur d'eau depuis 1990 qui établissent depuis Uccle les profils de l'humidité en altitude. Cette série d'une quinzaine d'années seulement s'intégrera dans une banque de données unifiée au niveau mondial. A terme, cela devrait permettre de suivre l'évolution et l'analyse de ce paramètre climatologique.

**Dissipons un malentendu** assez fréquemment répercuté dans le débat public : l'effet de serre est un phénomène naturel. La vapeur d'eau est incontestablement le gaz à effet de serre le plus important parmi les gaz à effet de serre naturels tels que le méthane, l'oxyde nitreux, l'ozone et le CO<sub>2</sub>. Tout autre chose est la perturbation récente très anormale (en regard de ce que révèlent les archives paléoclimatiques) décelée dans les concentrations du CO<sub>2</sub> ou du méthane et le rôle que cette perturbation due essentiellement aux activités humaines peut induire dans le bilan radiatif et donc dans le réchauffement planétaire. En revanche, l'incriminer dans tous les événements météorologiques marquants de ces dernières décennies, comme ont tendance à le faire certains commentateurs pressés, est sans aucun doute excessif.

- Le climat est un phénomène dynamique complexe qui implique de nombreux paramètres et des mécanismes de rétroaction qui rendent difficile la modélisation de son évolution. C'est pourquoi, pour envisager des scénarios possibles du climat futur, une meilleure connaissance de la variabilité naturelle du climat de la terre est d'une importance fondamentale.

L'un des domaines de recherche du Centre de Physique du Globe de l'IRM (CPG), situé à Dourbes, est **la reconstitution du climat pendant le Quaternaire** (débutant entre environ -2,4 et -1,5 millions d'années) **en se basant sur des indicateurs magnétiques des archives continentales du climat** comme les sédiments lacustres ou les dépôts de loess/paléosols. Ces derniers sont abondants dans la partie Nord centrale de la Chine, où des vents ont soufflé du sable et des poussières depuis les déserts situés au Nord du plateau vers l'Est et le Sud pendant les trois derniers millions d'années, formant une épaisse couche de loess.

Des dépôts non négligeables de loess existent aussi en Europe et en particulier en Belgique. Le loess est un dépôt glaciaire et est essentiellement déposé pendant des périodes climatiques froides et sèches (époques glaciaires). Pendant les périodes interglaciaires, le loess est exposé à de nouvelles conditions environnementales comme une augmentation de la température, plus de précipitations et d'activité biologique et est progressivement transformé en un sol qui peut être recouvert par une nouvelle couche de loess lors de la période glaciaire suivante. Sur le Plateau de Loess de la Chine, les variations du climat ancien ont donné une alternance de couches de loess et de paléosols correspondant respectivement à des intervalles froids et secs, et chauds et humides (cf. figure 16). Les loess et les paléosols contiennent chacun des quantités variables de différents oxydes magnétiques de fer, dont la formation est contrôlée par l'environnement. Les mesures stratigraphiques des propriétés magnétiques donnent non seulement une indication de l'intensité et de la durée des périodes climatiques anciennes, mais aussi des précipitations dans le passé et permettent d'évaluer le régime des vents régionaux de manière quantitative. Ces informations peuvent être utilisées pour des modèles climatiques à long terme.

**La relation entre les changements du champ géomagnétique et le climat a reçu très peu d'attention jusqu'à présent.** Mais un des mécanismes que l'on tient responsable de cette relation serait les changements dans le flux des rayons cosmiques, modulés par l'activité solaire et les changements géomagnétiques, qui pourraient influencer la nucléation des nuages dans la basse atmosphère et l'albédo et donc finalement le climat.

En effet, il semble y avoir un lien causal entre l'augmentation de la variation dite séculaire du champ géomagnétique et des variations de climat à l'échelle de centaines d'années. Si cela se confirmait, le forçage solaire ne serait pas le seul facteur naturel externe responsable des changements climatiques. Certains auteurs constatent une relation apparente entre des variations rapides durant le dernier millénaire de l'intensité du champ révélées par des techniques archéomagnétiques, et des périodes de refroidissement général en Europe de l'Ouest ayant déterminé l'avance des glaciers alpins connus par des documents historiques. Ces observations méritent des recherches plus approfondies.

Un autre domaine de recherche du Centre de Physique du Globe est donc l'étude d'effets de second ordre influençant le climat actuel. **Les rayonnements cosmiques provoquent dans la troposphère supérieure une ionisation qui a probablement une influence sur la couverture nuageuse.** Le taux de rayonnement cosmique dépend également, outre de l'activité solaire, du champ magnétique terrestre, qui protège la vie terrestre du bombardement de particules à haute énergie. En plus des mesures de l'électricité atmosphérique et des sondages ionosphériques, le champ géomagnétique et les variations du rayonnement cosmique sont mesurées en continu au CPG depuis au moins 50 ans.

**L'IRM fournit donc à la communauté scientifique des données clés pour l'analyse de séries temporelles permettant d'approcher les interrelations peu étudiées jusqu'ici entre le champ magnétique, le rayonnement cosmique, l'activité solaire et la formation de nuages, et leur implication dans le climat actuel.** Soulignons l'importance de poursuivre la surveillance de ces paramètres géophysiques qui peuvent jouer un rôle (même s'il est encore difficile à apprécier) dans la dynamique du système climatique à diverses échelles de temps.



Figure 16. Coupe dans une séquence de loess/palaeosols à Jiacun près de Baoji en République Populaire de Chine. Des couches jaune clair de loess, déposées pendant des périodes climatiques arides et froides (époques glaciaires), alternent avec des couches de palaeosols brun foncé qui se sont formées pendant des périodes climatiques chaudes et humides (époques interglaciaires).

## Chapitre 3. Recherches sur la prévision et la modélisation climatiques

### 1. Généralités sur la prévision du temps et du climat.

Les paramètres atmosphériques présentent une forte variabilité sur des échelles de temps très différentes allant de la minute à la centaine d'années, voire bien au-delà. Les chapitres précédents montrent à suffisance des exemples de cette variabilité. En outre, l'évolution des variables qui y ont été décrites a une apparence erratique, souvent associée à des régularités globales telles que les variations saisonnières ou journalières de l'influx solaire, ou encore des changements de régimes abrupts ou plus doux. Tous ces comportements découlent de l'ensemble des lois physiques et chimiques qui régissent la dynamique du système climatique constitué par l'atmosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, la biosphère et la lithosphère. L'une des questions centrales dans ce contexte est de savoir dans quelle mesure ces phénomènes peuvent être décrits par des modèles représentant le mieux possible les différentes composantes du climat et dans quelles limites ils peuvent être prévus.

**Parmi ces composantes, l'atmosphère est sans doute la composante pour laquelle nos connaissances sont les plus grandes puisqu'elle constitue le milieu naturel dans lequel nous vivons.** Néanmoins, même dans ce cas, notre expérience de tous les jours nous indique que notre capacité de prévision de son évolution reste très limitée, même avec les ordinateurs puissants actuellement à notre disposition. Il apparaît notamment qu'après une dizaine de jours, la prévision du temps obtenue à partir des modèles ne se distingue plus d'une prévision purement aléatoire qui ne tiendrait compte que de la période de l'année concernée. La figure 1 illustre cette dynamique dans le cadre du modèle opérationnel global de prévision du temps du Centre de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMNT). Clairement, l'erreur (quadratique moyenne) représentée selon l'axe vertical pour la température à deux niveaux de pression de 500 hectopascal et 850 hectopascal sur l'ensemble de la Belgique, croît en fonction de l'échéance de prévision. Cette perte progressive de prévisibilité peut être attribuée à deux sources distinctes : (i) la présence d'imperfections dans la modélisation qui affecte la prévision et (ii) la propriété de sensibilité aux conditions initiales par laquelle toute erreur commise sur les conditions initiales d'un système va progressivement croître au cours du temps. Sur base de la figure 1, les deux sources d'erreurs ne peuvent être distinguées, mais il est possible de montrer que la source dominante dans ce cas précis est l'erreur sur les conditions initiales (Vannitsem et Nicolis, 2008).

Les deux propriétés que nous venons de décrire brièvement, à savoir la variabilité prononcée des variables atmosphériques d'apparence erratique et la sensibilité aux conditions initiales, sont les deux facettes visibles d'une dynamique propre aux modèles atmosphériques connue sous le nom de dynamique chaotique ou dynamique aperiodique. Il est important de souligner que cette dynamique n'est pas liée à notre connaissance et notre description imparfaite des lois d'évolution de l'atmosphère, mais fait partie intégrante de la gamme de dynamiques possibles régies par ces lois.

Les variables atmosphériques auxquelles s'intéressent principalement les météorologues et les climatologues sont le vent, la température, la pression, la densité, les différentes phases de l'eau, la quantité d'aérosols, ainsi que les différents constituants chimiques qui composent les masses d'air. Leur évolution est décrite par les équations de base de la dynamique des fluides, de la thermodynamique et de la cinétique chimique, auxquelles s'ajoutent tout une série de relations décrivant les changements de phase de l'eau et les différents processus d'absorption, d'émission et de diffusion des radiations par les constituants présents dans l'air. L'une des particularités essentielles de ces équations est qu'elles sont, par nature, non linéaires<sup>30</sup>. Cette caractéristique est à l'origine de la dynamique chaotique que nous venons de mentionner précédemment et constitue un élément central des travaux théoriques et pratiques effectués dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques, discipline à la frontière de la physique et des mathématiques.

<sup>30</sup> Une réponse d'un système sera qualifiée de linéaire si elle est proportionnelle à l'amplitude de l'action et obéit au principe de superposition, c'est-à-dire que l'effet de plusieurs actions correspond à la somme de ces différentes actions. Une réponse est non linéaire si elle ne tombe pas dans cette catégorie.

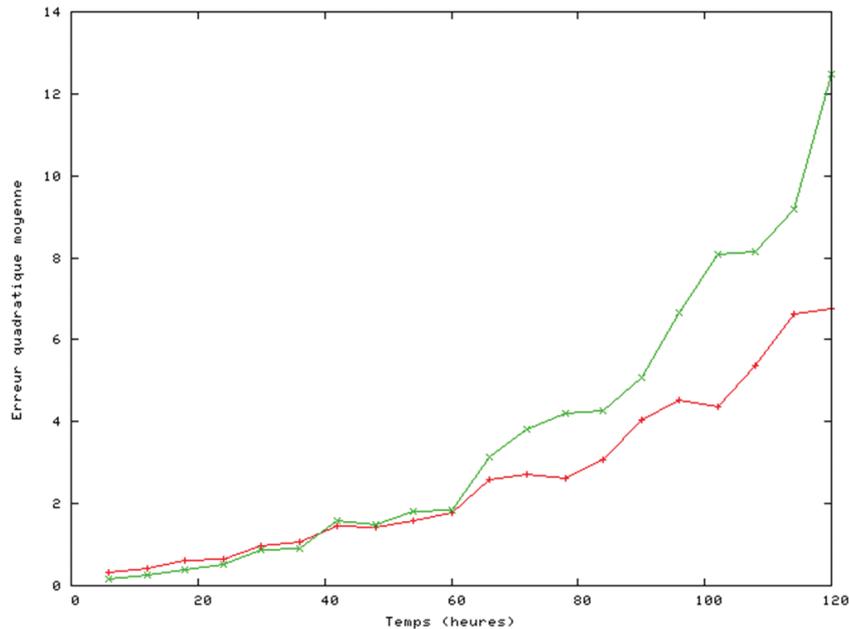


Figure 1. Erreur quadratique, moyennée sur deux hivers et sur l'ensemble de la Belgique, pour la température aux niveaux de pression à 500 hectopascal (approximativement 5 kilomètres de hauteur), courbe verte, et à 850 hectopascal (approximativement 1 kilomètre de hauteur), courbe rouge. Les résultats proviennent de la prévision du modèle du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMET).

Cette théorie, au-delà de sa capacité à expliquer l'apparition de solutions de type chaotique dans les systèmes non linéaires, permet de décrire la vaste « zoologie » des solutions possibles de ces systèmes, portant le nom d'attracteurs. Ces attracteurs peuvent coexister pour un système donné et l'application de perturbations appropriées à ce genre de système peut alors, dans certaines conditions, induire des passages d'une solution à l'autre. Cela donne lieu à des transitions plus ou moins rapides entre les solutions telles que celles qui ont été décrites de façon empirique au chapitre 1 pour les températures ou les précipitations. Ces transitions peuvent avoir un caractère naturel si le forçage qui les induit est de source naturelle, comme par exemple un accroissement de l'énergie solaire atteignant la Terre, ou être de nature anthropique si le forçage est provoqué par l'homme telle qu'une exploitation excessive des ressources locales de végétation.

Un exemple spectaculaire de ces transitions entre états différents est donné par l'évolution des précipitations dans la région sahélienne (Afrique de l'Est) qui montre une alternance de périodes de sécheresses et de périodes plus humides. Ces transitions entre états ont fait l'objet d'une modélisation simplifiée à partir d'un modèle non linéaire qui reproduit remarquablement l'évolution entre ces deux états (Demarée et Nicolis, 1990).

### Le climat et la prévisibilité des moyennes.

De façon classique, on définit le climat comme l'ensemble des propriétés statistiques de l'atmosphère (moyennes, variances des différentes variables d'intérêt telles que la température ou les précipitations). La description de sa dynamique part des mêmes équations de base que celles utilisées pour la prévision du temps, adaptées pour décrire les quantités statistiques auxquelles on s'intéresse et augmentées des couplages aux autres composantes du climat également modélisées, ainsi que des forçages externes à variations lentes souvent (légitimement) négligées lors de la prévision du temps. Pour les océans, la modélisation de base suit la même approche que pour l'atmosphère, à la différence que le fluide est maintenant un liquide composé d'eau et de sel (et d'autres composés chimiques ou biologiques tels que le phytoplancton). Pour la cryosphère, un modèle dynamique de glace est nécessaire et pour la biosphère, un modèle décrivant les différents types de végétation et de couverture à la surface terrestre. Dans ce contexte, **l'une des difficultés majeures réside dans la modélisation précise des flux de toutes natures entre ces différentes composantes du système climatique** (par exemple les flux de chaleur, l'évapotranspiration, les flux de différents gaz dont les gaz à effet de serre, etc.).

Néanmoins, bien que ces statistiques soient fortement influencées par les autres composantes du système climatique (par exemple l'hydrosphère ou la cryosphère) évoluant sur des échelles de temps plus longues, elles doivent également garder la marque du comportement erratique de l'atmosphère décrit à la section précédente. Cette constatation naturelle ouvre dès lors la question de savoir, au vu de l'horizon limité de la prévision du temps, dans quelle mesure le climat est prévisible.

Les équations d'évolution du climat sont d'une complication considérable et il y a souvent avantage à réduire considérablement la description des phénomènes de telle façon à réduire la difficulté du problème qui nous intéresse, tout en gardant les ingrédients essentiels qui en font sa particularité. C'est ainsi que des modèles très simples ont vu le jour décrivant des phénomènes spécifiques, tels que le modèle de circulation océanique de Stommel (voir par exemple Dijkstra, 2005) décrit par 2 équations différentielles ordinaires non linéaires (qualifié de modèle de basse dimension), ou encore des modèles de taille intermédiaire (se situant entre les modèles de basse dimension et les modèles opérationnels de prévision du temps et du climat). L'avantage fondamental de ces systèmes est de permettre une étude exhaustive tout en gardant les ingrédients essentiels de la dynamique de base.

Plusieurs travaux ont été effectués à l'IRM dans le cadre de ce type de modèles simplifiés. Un exemple est fourni à la figure 2 où l'évolution de l'erreur est représentée en fonction de l'échéance de prévision pour un modèle atmosphérique de taille intermédiaire, encore suffisamment réaliste pour décrire de façon satisfaisante la dynamique des échelles synoptiques aux latitudes moyennes. La courbe rouge correspond à l'évolution de l'erreur pour les variables du modèle d'origine et la courbe bleue à celle des moyennes temporelles sur 10 jours. L'erreur a été normalisée par son erreur initiale pour faciliter la comparaison. Il apparaît clairement que la croissance initiale de l'erreur est similaire dans les deux cas et que la convergence asymptotique vers une valeur constante (suggérée par la convergence vers les deux plateaux) se produit pour des mêmes échelles de temps.

Ce résultat montre clairement que la limite de prévisibilité de quantités statistiques telles que les moyennes temporelles est identique à celle du système d'origine et que la dynamique reste chaotique. Il s'ensuit que l'amélioration des prévisions au travers d'une opération de moyennisation temporelle des quantités d'intérêt est à première vue sans objet, puisque l'horizon de prévisibilité semble du même ordre de grandeur que celui du système original.

Ces résultats suggèrent que le choix de la condition initiale de la composante atmosphérique doit jouer relativement peu de rôle dans la problématique de la prévision climatique puisque l'erreur sature rapidement après une dizaine de jours, mais cela n'exclut pas que certaines informations peuvent être tirées d'une prévision plus longue au travers de l'influence d'autres composantes du climat dont l'évolution est beaucoup plus lente. Dans le cadre d'un modèle couplé Océan-atmosphère, Goswami et Shukla (1991) montrent, par exemple, que la saturation de l'erreur est beaucoup plus lente que celle déduite dans les modèles purement atmosphériques et que des informations utiles peuvent être tirées au niveau saisonnier ou interannuel. Notons toutefois que bien que ces résultats soient encourageants, certains changements rapides et difficilement prévisibles, liés à la nature non linéaire des autres composantes du climat et de leur couplage avec l'atmosphère, peuvent également survenir tels que ceux que nous allons maintenant esquisser.

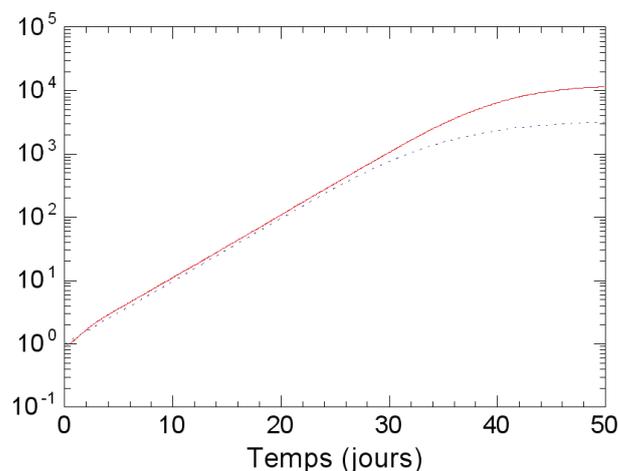


Figure 2. Evolution de la moyenne de l'erreur (valeur absolue de l'erreur) en fonction de l'échéance de prévision pour la variable instantanée (en l'occurrence, la fonction de courant, reliée au vent généré par le modèle) du système étudié (courbe rouge) et la même variable moyennée sur 10 jours (courbe bleue). Ce résultat est tiré de Vannitsem et Nicolis (1998).

### L'influence des autres composantes du système climatique.

**De nombreuses études ont démontré le rôle prépondérant dans la dynamique du climat des océans et des glaces, agissant sur des échelles de temps plus longues que celles de l'atmosphère.** Leur interaction avec l'atmosphère peut donner lieu à des «surprises» climatiques qui peuvent être lourdes de conséquences.

Un premier exemple de ces effets relativement soudains est fourni par la succession des périodes glaciaires et interglaciaires durant l'ère quaternaire, séparées par des phases de transition dont la durée est souvent beaucoup plus courte que celles de ces périodes elles-mêmes. Un premier élément d'explication de cette évolution a été fourni par la ressemblance frappante de ces changements successifs avec les variations de l'excentricité de l'orbite terrestre (Berger, 1981). Mais l'absence d'une cohérence parfaite entre ces deux « cycles » et la variabilité importante de la durée des phases glaciaires et interglaciaires restaient encore à élucider. Une explication complète de ce comportement a ensuite été apportée par la description de l'interaction complexe des changements d'excentricité de l'orbite terrestre (et donc de l'influx solaire) avec la température globale de la surface de la Terre dont la dynamique obéit à une équation non linéaire. Ces études sur les glaciations du quaternaire sont notamment à l'origine du développement d'une théorie importante en physique, la résonance stochastique, qui explique comment un système non linéaire peut répondre à des perturbations de très faibles amplitudes (Nicolis, 1982, 1991).

Un autre exemple de comportement lié à la présence de non-linéarités dans les composantes du climat est la possibilité d'une interruption de la circulation, dite thermohaline, d'un courant important qui traverse l'ensemble des océans du globe. Ce transport est déterminé par les différences de densité des masses d'eau océanique qui se répartissent sur le globe, elles-mêmes associées aux différences de température et salinité (Dijkstra, 2005). Ce courant joue un rôle essentiel dans les transferts de chaleurs et de masse au sein des océans du globe, et donc contribue considérablement à la répartition énergétique sur la Terre. Une interruption éventuelle de ce courant global pourrait avoir des conséquences désastreuses sur les climats régionaux (Baruch, 2007). Imaginer un instant que le Gulf-Stream, courant océanique faisant partie de la circulation thermohaline venant du Sud de l'Atlantique et longeant nos côtes, s'arrête ; les conséquences sur le climat dans nos régions seraient un refroidissement local spectaculaire.

Ce type de transition entre ces deux régimes différents pourrait résulter de la présence de ce que l'on appelle, dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques, une bifurcation. Elle caractérise la manière dont un système va changer de régime (c'est-à-dire d'attracteur) sous l'influence d'une modification de certains paramètres qui contrôlent son état. Pour reprendre l'exemple donné ci-dessus, la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord est, notamment, contrôlée par la quantité d'eau douce qui pénètre dans l'océan au niveau du pôle. Si cette quantité devient trop importante (par exemple, suite à la fonte rapide des glaces du pôle), la circulation pourrait en être fortement perturbée, voire

s'arrêter ou s'inverser, et induire rapidement tout une série de changements locaux dont les conséquences peuvent être catastrophiques. La figure 3 illustre ce phénomène au travers d'un diagramme de bifurcation schématisé tiré d'un modèle simplifié qualitatif décrivant la circulation thermohaline au niveau de l'Atlantique Nord. Clairement si dans ce modèle on augmente l'apport en eau douce, le système va passer successivement d'un état unique stable où la circulation est intense (points rouges en haut du diagramme) vers une situation où deux états possible sont stables, l'un intense et l'autre faible (ou de circulation inversée), et ensuite vers une situation où l'état stable correspond à une circulation de faible intensité (ou de circulation inversée). De plus si à un instant donné on se trouve dans l'état de circulation intense et qu'on augmente l'apport en eau douce, on glisse le long de la courbe supérieure et ensuite on peut basculer rapidement vers l'état de faible circulation (ou d'inversion de circulation) représenté par la courbe inférieure.

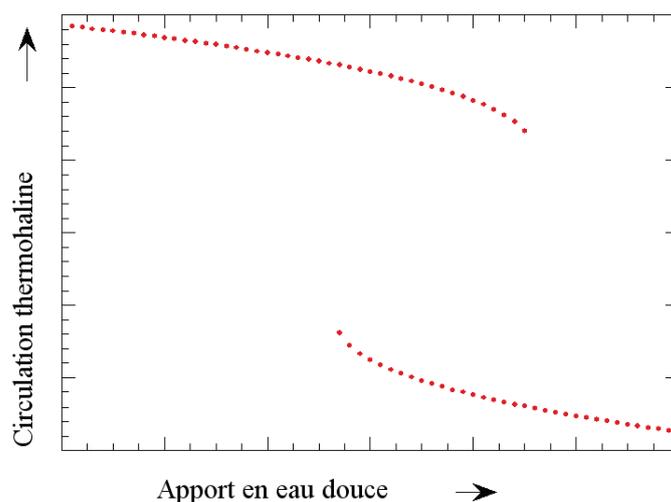


Figure 3. Diagramme de bifurcation de l'intensité de la circulation thermohaline dans l'Atlantique Nord en fonction de l'apport en eau douce au pôle Nord.

De façon générale, la présence de non-linéarités dans le système climatique peut avoir des conséquences inattendues surtout en présence de forçages dépendants du temps tels que l'accroissement des gaz à effets de serre ou encore la déforestation rapide des terres du globe qui modifie l'albédo et donc la quantité d'énergie solaire qui peut être stockée par la Terre et l'atmosphère. **La variation d'un paramètre tel que ceux-là peut induire un passage d'un état climatique donné vers un autre et la modification complète des propriétés statistiques du système.**

Comme nous en avons discuté plus haut, la condition initiale introduite pour l'atmosphère devrait jouer relativement peu de rôle sur la dynamique du climat. Ce n'est pas le cas des autres composantes climatiques puisque celles-ci évoluent sur des échelles de temps plus longues et leur limite de prévisibilité se trouve au-delà de celle de l'atmosphère. Il est donc légitime de penser que les choix spécifiques de conditions initiales utilisés pour les océans ou la distribution de glace doit jouer un rôle important, et ce, même sans modification des forçages discutés plus haut. Il est également légitime de se demander quel est l'effet des modifications de ces forçages sur la dynamique de la transition entre les multiples solutions stables apparaissant au sein du système tels que ceux représentés à la figure 3. Cette question a récemment été abordée à l'IRM dans le cadre de modèles simples et il est apparu que l'état initial instantané du système au début de la modification du paramètre concerné et la vitesse de changement de ce paramètre ont des conséquences inattendues telles que la persistance dans un état donné, alors que cet état n'est plus stable en l'absence de modifications du forçage (Nicolis et Nicolis, 2004). L'ensemble de ces effets doivent être pris en compte lors d'une projection climatique.

## Le problème de l'erreur de modélisation.

L'utilisation de modèles climatiques de différentes complexités permet de mieux comprendre la dynamique des changements climatiques. Mais du point de vue de la prévision, toute la difficulté réside dans une très bonne représentation des processus climatiques et de leurs interactions au sein d'un modèle. Tout cela passe à la fois par l'analyse de systèmes très simples permettant une étude approfondie des mécanismes agissant sur le climat et le développement de modèles très détaillés tenant compte de tous les processus présents. Ces efforts peuvent conduire à une estimation de l'évolution future du climat et à une évaluation de son horizon de prévisibilité. Mais cette tâche est, à l'heure actuelle, loin d'être accomplie au vu de l'ensemble des incertitudes qui planent encore sur les processus en jeu et leurs impacts sur le climat (Baruch, 2007). La présence de ces incertitudes ouvre dès lors la question de savoir d'une part quel est l'impact de ces incertitudes sur les projections climatiques actuelles et d'autre part comment tenir compte de ces incertitudes dans les projections futures.

La question de l'impact de l'erreur de modélisation sur la prévision ne se pose pas uniquement pour les modèles climatiques mais également pour les modèles de prévision du temps. Comme par exemple dans la figure 1 où l'impact des deux types d'erreurs est présent, à savoir l'erreur sur la condition initiale et l'erreur de modélisation puisque le modèle de prévision n'est qu'une représentation toujours imparfaite de la réalité. Cette question est largement abordée actuellement à l'IRM au travers du développement d'une théorie fondamentale de la dynamique de l'erreur de modélisation et de sa correction. **Il apparaît que la présence d'une erreur de modélisation peut avoir des conséquences importantes sur la prévision telles que par exemple de manquer une transition vers un régime différent du système étudié.** De plus, si le système est chaotique, l'erreur de modélisation subit au même titre que l'erreur sur les conditions initiales une croissance qui, au final, conduira le système à devenir complètement imprévisible après un certain laps de temps (Nicolis, 2004; Vannitsem, 2006).

## Vers une approche probabiliste de la prévision climatique.

L'ensemble des incertitudes évoquées jusqu'à présent, à savoir l'incertitude sur les conditions initiales, sur la présence d'erreurs de modélisation ainsi que sur les projections futures des forçages externes ou internes au système climatique tels que les émissions de gaz à effet de serre, doivent être prises en compte pour permettre une évaluation fiable de l'évolution du climat. Ceci ne peut se faire qu'au travers d'une prévision probabiliste.

Cette approche a été adoptée depuis plus d'une dizaine d'années dans le contexte de la prévision du temps par les différents centres météorologiques principaux fournissant des prévisions globales à l'échelle journalière et saisonnière. L'approche opérationnelle de ce type de prévision se base soit sur un ensemble de prévisions du modèle à notre disposition en partant de différentes conditions initiales, soit en utilisant un ensemble de modèles différant dans la spécification des propriétés d'évolution de certains processus physiques, soit encore au travers d'une combinaison des deux techniques.

L'intérêt majeur de cette approche est à la fois de donner une estimation de l'erreur de prévision, mais également d'évaluer la probabilité d'occurrence de certains événements météorologiques tels que les événements extrêmes. Un exemple de prévision probabiliste de différentes variables météorologiques (précipitations, vitesse du vent à 10 mètres, température à 2 mètres) pour la région brabançonne est donné à la figure 4. Ce type de représentation de la prévision probabiliste s'appelle un panache, en référence au panache de fumée qu'on peut observer régulièrement dans notre ciel. Mais ce panache donne ici une information sur la probabilité d'occurrence de certaines valeurs de la variable d'intérêt. La ligne continue en gras donne la moyenne de la distribution de probabilité à une échéance donnée (l'échéance de prévision est donnée suivant l'axe horizontal). La zone pleine plus foncée de part et d'autre de la moyenne couvre le domaine pour lequel la probabilité de la valeur de la variable est de 50 %. Le domaine couvert à la fois par la zone foncée et la zone claire correspond à une probabilité de 80 %. Il y a donc 20 % de chance de se trouver en dehors du domaine délimité par les courbes continues fines.

Il apparaît clairement qu'au début de la prévision probabiliste, le domaine possible de valeurs pour la variable est petit, suggérant que la prévision avec une unique intégration du modèle est de bonne qualité (l'incertitude sur l'évolution du système est petite). Par contre, progressivement le domaine des valeurs possibles des variables concernées augmente, indiquant une plus faible qualité d'une prévision unique (l'incertitude sur l'évolution du système est relativement grande).

**Dans le cadre de la prévision climatique, cette approche commence à faire son chemin au travers de l'utilisation de plusieurs conditions initiales et de plusieurs modèles légèrement différents** (Palmer, 2000). Mais il faut s'attendre à ce que les incertitudes soient encore plus grandes au niveau de certains processus physiques (tels que la dissolution du dioxyde de carbone dans les océans), dont on commence seulement à tenir compte dans la modélisation du climat (Baruch, 2007), mais aussi vis-à-vis des projections futures de la production de gaz à effet de serre, de certains polluants pouvant avoir un effet stabilisateur sur le réchauffement de la planète, les feux de forêts ou l'activité volcanique. Il apparaît donc vraisemblable que l'ensemble des incertitudes sur notre climat futur ne sont pas prises en compte et que la fourchette d'évolutions possibles est plus grande que celle actuellement avancée dans les rapports récents sur l'évolution du climat.

Cette approche probabiliste prônée depuis longtemps par les centres de prévision météorologique gagne à s'étendre à l'ensemble de la problématique de la prévision climatique, ainsi qu'aux réponses socio-économiques qu'il faut fournir pour une gestion correcte des biens et des personnes.

## 2. Etude d'impact hydrologique.

### Faut-il s'attendre à plus d'inondations ou plus de sécheresses dans le futur ?

**Les impacts de changements climatiques sur le cycle de l'eau pourraient affecter un grand nombre de secteurs de la société.** Cette éventualité est souvent mise en avant chaque fois que surviennent des inondations répétées ou que se prolongent des épisodes de sécheresse.

Etant donné la cascade d'incertitudes associées aux projections pour le futur discutée précédemment, il est évident que la réponse à ce problème est loin d'être immédiate. Néanmoins, il est possible d'effectuer des études de sensibilité d'un modèle hydrologique face aux scénarios proposés par les climatologues. Cette analyse ne peut se faire qu'au travers de l'utilisation de modèles hydrologiques appropriés, capables de décrire les caractéristiques principales du cycle de l'eau et son forçage par les variables météorologiques. L'information utilisée consiste généralement en des différences entre les sorties de modèles pour le futur et la période de référence pour ce qui concerne les moyennes mensuelles de la température et des précipitations. Les changements d'autres variables, comme l'ensoleillement ou la vitesse du vent, qui influent sur l'évaporation sont aussi pris en compte. Un modèle hydrologique est alors utilisé ; un modèle hydrologique décrit le cycle de l'eau – accumulation et fonte d'une éventuelle couche de neige, interception de la pluie par la végétation, infiltration dans le sol, dessèchement et ré-humectation du sol, alimentation des aquifères, ruissellement.

Utilisé dans un premier temps avec des données météorologiques observées, le modèle permet de calculer le débit d'une rivière en un point donné de même que les différentes composantes du cycle de l'eau dans le bassin versant considéré pendant une période de référence.

Dans un deuxième temps, la série d'observations météorologiques est altérée en tenant compte des modifications climatiques décrites par le scénario. Il en résulte une nouvelle série des débits et des autres composantes du cycle de l'eau. Les impacts sur le cycle hydrologique sont alors analysés en comparant les résultats des deux simulations réalisées avec le modèle hydrologique. Cette approche est purement statique dans le sens où le modèle hydrologique n'est pas utilisé en version couplée avec le modèle climatique. Ceci est aussi une limitation pouvant avoir des conséquences importantes comme nous en avons discuté précédemment.

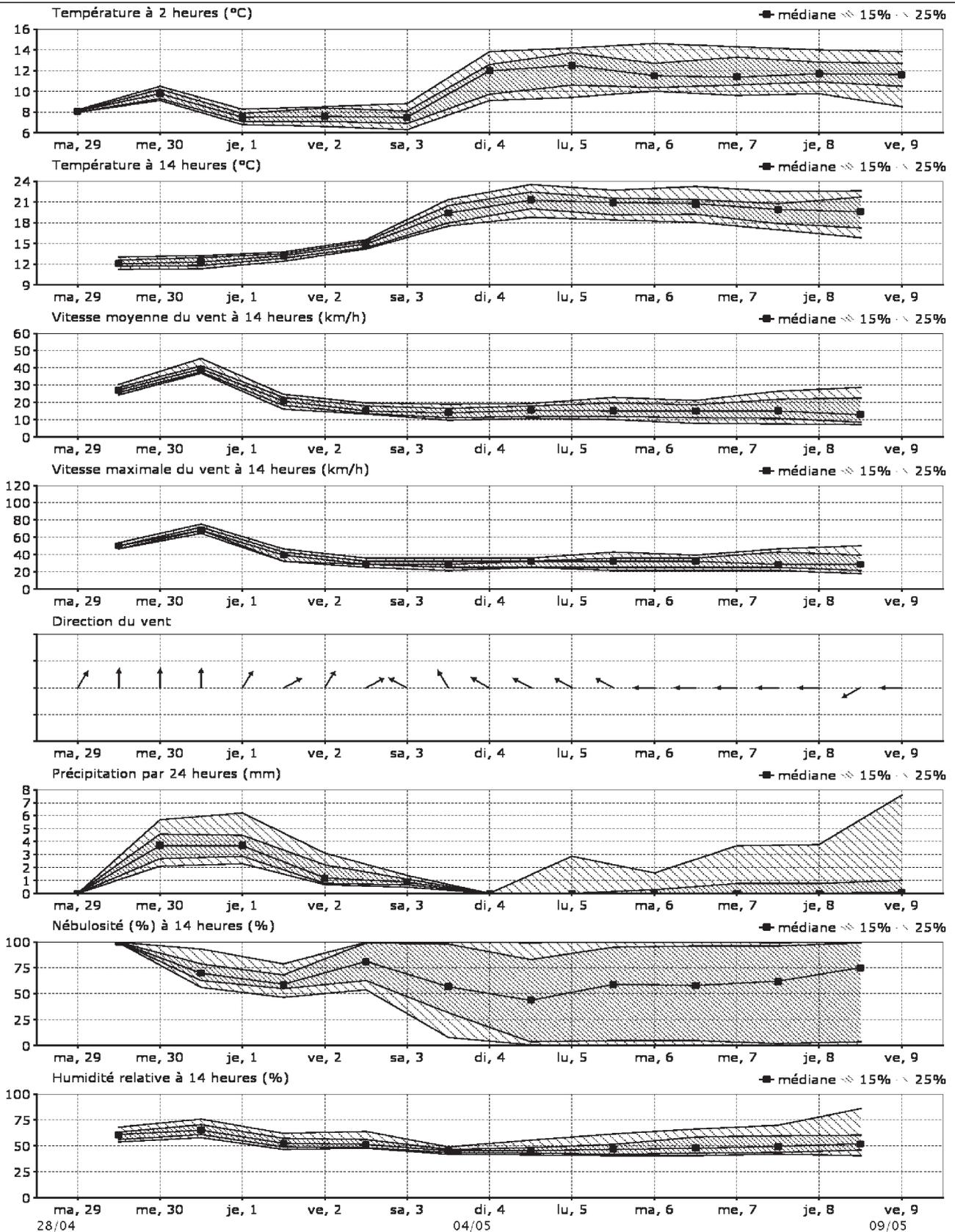


Figure 4. Représentation de la prévision probabiliste en date du 29 avril 2008 du Centre de Prévision à Moyen Terme pour la région brabançonne et sur une période de dix jours. Cette prévision probabiliste est obtenue à partir d'un ensemble de 51 prévisions d'une version du modèle du Centre partant de conditions initiales légèrement différentes (cf. aussi chapitre 4).

Une des toutes premières publications scientifiques au niveau international sur le sujet témoigne que dès les années 1980, l'IRM s'est intéressé aux impacts possibles de changements climatiques sur l'hydrologie. La méthode décrite ci-dessus fit d'ailleurs autorité et le premier rapport du GIEC de 1990 y fit référence. Par la suite, plusieurs projets dont certains financés par la Politique Scientifique Fédérale Belge ont permis de mettre en évidence que les réponses des bassins versants différaient en raison de leurs caractéristiques propres, principalement leur capacité d'infiltration et d'accumulation dans des aquifères (nature des sols, topographie...). En effet, l'absorption puis la restitution progressive de quantités de pluies accrues ou, au contraire, le soutien du débit en été par des volumes d'eau accumulés en hiver peuvent amortir les effets de changements dans les régimes des précipitations. Finalement, l'analyse de sensibilité du cycle hydrologique a été généralisée aux bassins de la Meuse et de l'Escaut, en Belgique mais aussi en amont en France. Les scénarios climatiques utilisés alors avaient été sélectionnés par le GIEC (1998): ces scénarios ont été construits à partir des résultats de simulations de modèles prenant en compte les interactions entre l'océan et l'atmosphère dans les conditions d'une augmentation de la concentration en gaz à effet de serre de 1 % par an jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle. La figure 5 permet de comparer les changements de la température et des précipitations pour la Belgique pour la période (2070-2099) par rapport à une période de référence (1961-1990). Ces scénarios simulent une augmentation de la température quelle que soit la saison. D'après ces scénarios, les précipitations diminueraient en été par rapport à la période de référence et augmenteraient en hiver.

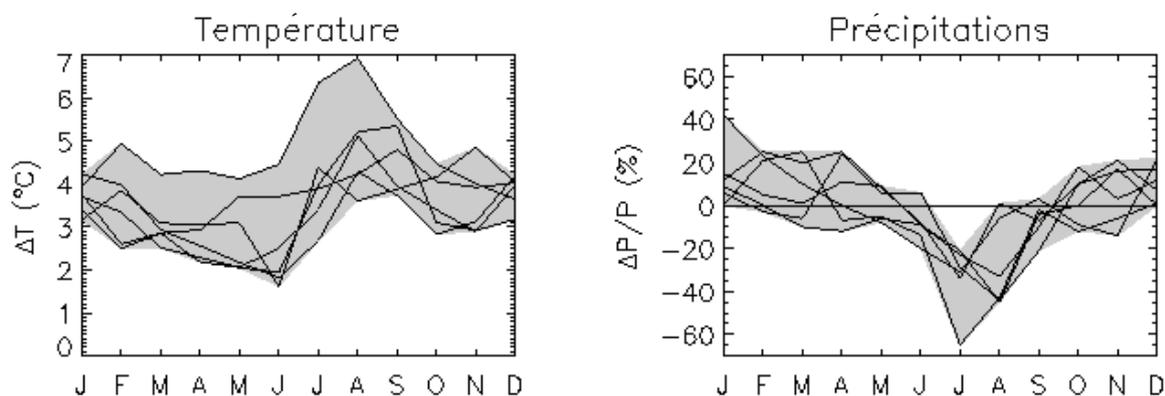


Figure 5. Scénarios proposés par le GIEC pour les changements de température (T) et les changements relatifs des précipitations (P) ; projections pour la Belgique et pour la période de 2070 à 2099. Les courbes correspondent aux résultats de simulations obtenues avec trois modèles climatiques différents ; pour un de ces modèles, les résultats de quatre simulations réalisées à partir de conditions initiales légèrement différentes sont pris en compte.

La figure 6 permet de se rendre compte quels seraient les impacts de tels changements climatiques sur le cycle de l'eau pour le bassin de l'Escaut en amont d'Anvers. Les impacts sur le débit mensuel moyen (écoulement) sont calculés comme les différences entre, d'une part, les moyennes mensuelles des débits simulés par le modèle hydrologique avec des données météorologiques observées et, d'autre part, les moyennes des débits simulés avec les données modifiées selon les scénarios de la Figure 6. **Si en été, les impacts consistent clairement en une diminution du débit moyen, en ce qui concerne l'hiver, les impacts sont incertains.** La figure 6 montre aussi les impacts sur l'évapotranspiration, c'est-à-dire les quantités d'eau évaporées à partir du sol ou transpirées par les plantes. Les quantités évaporées seraient plus importantes toute l'année (puisqu'il ferait plus chaud) sauf en été puisque que, selon le modèle hydrologique, les réserves en eau du sol auraient diminué.

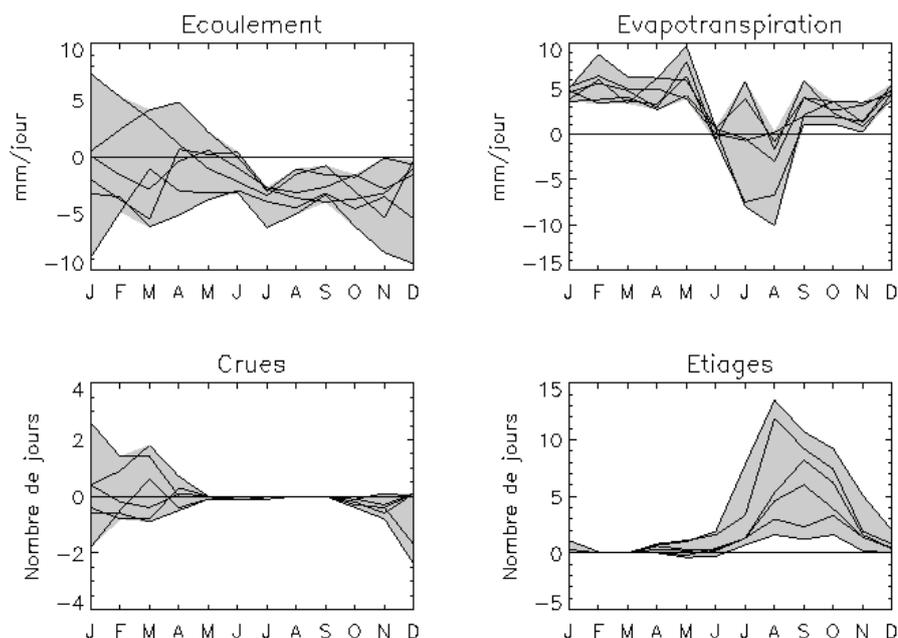


Figure 6. Impacts hydrologiques calculés à l'IRM des scénarios climatiques sur l'écoulement (débit rapporté à la superficie du bassin versant), sur l'évapotranspiration, sur le nombre de jours de crues et sur le nombre de jours d'étiage de l'Escaut.

Pour compléter cette analyse de risque, les impacts des scénarios sur la fréquence des crues et des étiages ont été estimés en comparant les séries de débits simulées pour le climat actuel et celles obtenues avec un climat modifié. Ayant fixé un seuil de crues, le nombre de jours pour lesquels ce seuil est dépassé dans les séries simulées pour des changements climatiques est comparé au nombre de jours correspondant pour le climat actuel. Remarquons que **les impacts sur le nombre de jour de crues sont incertains**, même pour la période la plus éloignée pour laquelle les scénarios semblaient prévoir davantage de précipitations en hiver. De manière similaire, on a observé que **le nombre de jours d'étiages a quant à lui clairement augmenté**, quel que soit le scénario utilisé. Les résultats pour le bassin de la Meuse sont très similaires à ceux présentés à la figure 6.

Cette analyse de sensibilité met en évidence de grandes incertitudes. Pourtant les scénarios climatiques utilisés ne représentent pas toute l'incertitude quant au futur. Pour donner un exemple, des scénarios climatiques plus récents, prenant en compte l'incertitude sur l'évolution des émissions des gaz à effet de serre, devraient être utilisés. L'information plus détaillée disponible actuellement permet aussi d'affiner la méthodologie utilisée pour les études de sensibilité – ce qui est en cours dans un projet auquel participe l'IRM.

### 3. Conclusion

La théorie des systèmes dynamiques fournit un cadre naturel pour l'étude des propriétés dynamiques de l'atmosphère et du climat. Elle permet à la fois de mettre en lumière les comportements possibles de ces systèmes et de proposer de nouvelles démarches permettant d'améliorer leur prévision, et ce notamment par l'intermédiaire de la prévision probabiliste. L'IRM participe à l'application et au développement des outils et techniques qui permettent de mieux comprendre cette dynamique.

**Ces travaux mettent en garde contre l'idée d'effectuer des projections climatiques sur des dizaines, voire des milliers d'années, sans fournir un indice de fiabilité.** Ils révèlent également la nécessité de prendre en compte l'ensemble des incertitudes affectant la prévision au travers d'une approche probabiliste, qui en outre a le mérite de permettre une estimation de l'occurrence probable d'événements extrêmes.

Les recherches fondamentales et leurs applications potentielles continuent à faire parties intégrantes des activités de l'IRM. Un axe important dans ce contexte est une meilleure compréhension des propriétés dynamiques des modèles atmosphériques et climatiques, et en particulier de leurs événements extrêmes. Mais également une description générale de la dynamique de l'erreur quelle qu'en soit l'origine (de modélisation et/ou sur les conditions initiales), ou encore la correction a posteriori des erreurs de prévision. L'étude de l'impact hydrologique des changements climatiques se poursuit également sur des projections climatiques et sur des échelles régionales plus précises.

## Chapitre 4. L'aide à la décision et à l'adaptation

### 1. Phénomènes extrêmes et adaptation au climat

Parmi les problèmes que pourraient poser les changements climatiques, l'augmentation de certains phénomènes extrêmes préoccupe l'attention de la communauté internationale. Cependant, il devrait être encourageant de savoir que malgré l'évolution de la vulnérabilité des environnements et de la société, les impacts de certains phénomènes météorologiques peuvent heureusement être atténués grâce à des progrès substantiels dans leurs prévisions ; progrès d'ores et déjà engrangés et surtout progrès plus substantiels encore à venir pourvu qu'on y mette le prix.

Il est utile de savoir qu'aujourd'hui partout dans le monde les recherches en prévisions météorologiques (auxquelles l'IRM participe activement) s'orientent selon deux voies qui peuvent être combinées avec profit :

- **Les méthodes dites « déterministes »** cherchent à augmenter la résolution de la modélisation. Les mailles des modèles sont de plus en plus fines de manière à intégrer de mieux en mieux tous les phénomènes météorologiques et en particulier ceux au développement spatial peu étendu.
- **Les méthodes dites « prévisions d'ensembles »** cherchent à mieux prendre en compte le caractère chaotique de l'atmosphère (responsable de la croissance des petites erreurs commises sur les conditions initiales, comme nous en avons parlé déjà au chapitre 3). Dans cette approche, on construit non pas une prévision mais un ensemble de prévisions déterministes pour un jour donné, partant chacune de conditions initiales légèrement différentes. Le pronostic (météorologique dans ce cas-ci, mais la logique est la même pour les prévisions climatiques) dès lors en termes de « risque » consiste à évaluer la probabilité d'occurrence de certains événements météorologiques sur une zone donnée à un instant donné.

L'intérêt croissant pour les questions climatiques et les progrès en modélisation météorologique notamment nous ont créé des opportunités pour développer avec plusieurs partenaires (publics ou privés) un certain nombre de services dont nous décrivons ici brièvement les principes.

a) Les services fédéraux responsables de la surveillance de la sécurité et de la santé publiques ont établi des collaborations fécondes avec l'IRM pour installer des **systèmes d'alerte** à certains moments précis où les conditions météorologiques pourraient être dommageables aux personnes ou aux biens. Citons notamment les alertes à la canicule particulièrement mobilisatrices de la cellule de vigilance-santé au cours de l'été 2003 qui attirait l'attention sur la vulnérabilité de certaines personnes parmi les plus fragiles de notre société face à ce type d'événements extrêmes. Par ailleurs, l'attention des services de la santé à d'autres périodes de l'année est elle aussi maintenue pour faire face aux vagues de froids toujours possibles et susceptibles de faire des ravages parmi les personnes les plus fragiles de notre société ou de provoquer des dommages économiques.

b) Les services régionaux responsables de la surveillance des fleuves et des rivières ont fait appel à l'IRM tant pour alimenter leurs **modèles de pré-alertes** (cf. figure 1) que pour les **analyses climatologiques des risques** (cf. figure 2).

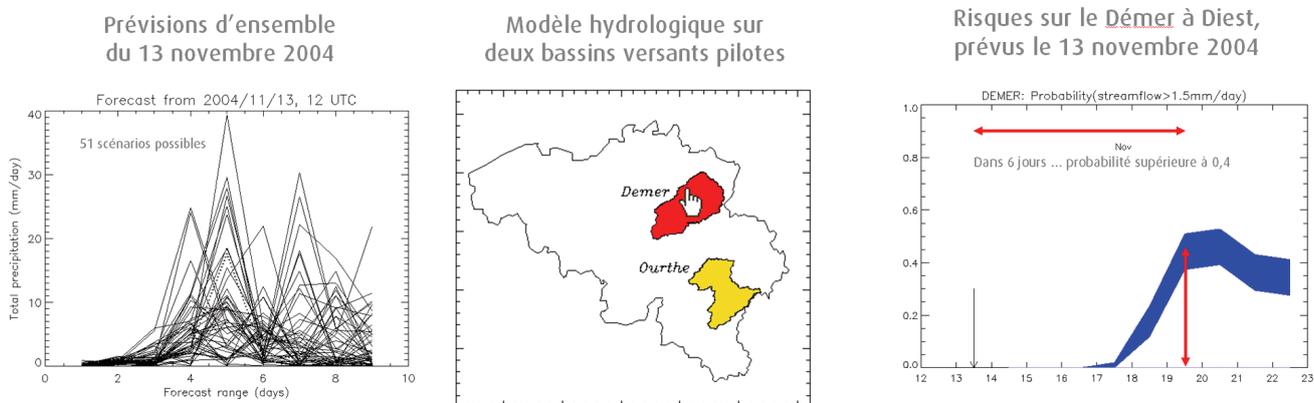


Figure 1. Prédiction des risques de crues, à 9 jours d'échéance.

- Dans l'exemple ci-dessus, le seuil de débit choisi correspond à une valeur qui a été dépassée dans 5 % des observations. Ce seuil n'est pas très sévère et a été choisi afin d'inclure un nombre suffisant d'événements pour valider la méthode en utilisant les archives du Centre Européen depuis 1997.
- L'étude a conclu que les prévisions de probabilités sont fiables : par exemple, une probabilité prévue de 0,4 correspond à un débit qui dépasse effectivement le seuil à 40 % des occasions. L'étude a aussi démontré que pour l'hiver, ces prévisions apportent une information jusqu'à 9 jours plus utile que la simple climatologie.

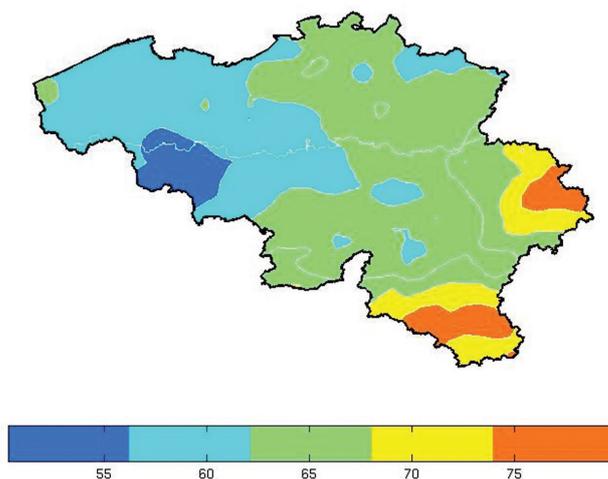


Figure 2. Exemple de carte de Belgique de précipitations extrêmes. Les seuils de dépassements en 24 heures, attendus en moyenne tous les 20 ans, sont déclinés suivant une échelle de couleur allant de 50 mm à 80 mm.

c) Regroupés au sein d'une **cellule interrégionale**, les services surveillant la qualité de l'air dans notre pays nous mettent à contribution depuis déjà plusieurs années. Le développement de la prévision numérique permet en effet d'anticiper de mieux en mieux les moments où les **conditions météorologiques seraient défavorables à la dispersion des polluants (cf. figure 3)**. Cette application mise au point à l'IRM par une équipe de modélisateurs devrait conduire pour toutes les régions du pays à des mesures d'anticipation favorables à la santé et conformes aux directives européennes en la matière. Quelques sociétés privées, pionnières dans leur volonté de diminuer leur impact environnemental, s'intéressent elles aussi à ces services d'alerte.

## BRUSSELS

ALADIN forecast initialized on MONDAY 8/12/2003 at 0 UT

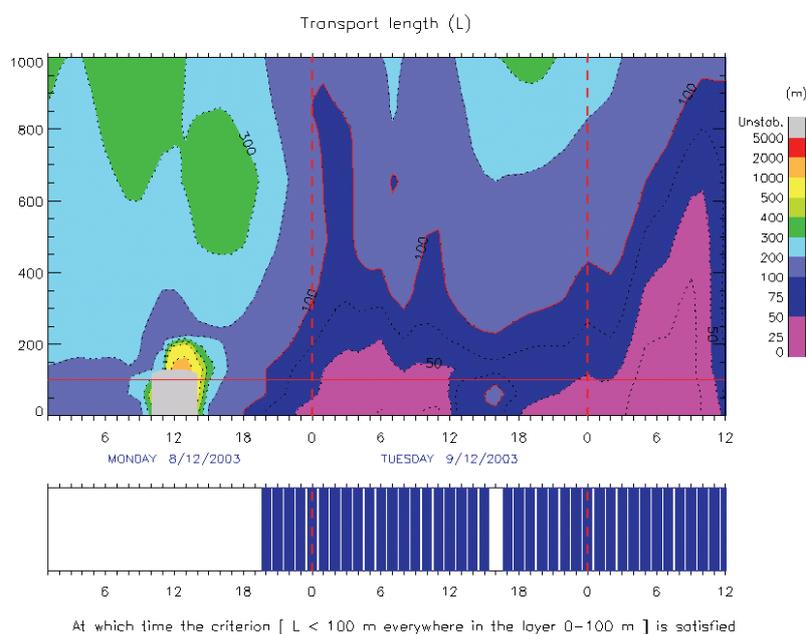


Figure 3. Prévission du 8/12/03 d'un épisode critique quant à la dispersion des polluants à Bruxelles (avec l'aimable autorisation de la Cellule interrégionale de l'environnement).

Dans le même ordre d'idées, les accidents industriels provoquant l'émanation de gaz toxiques peuvent être suivis par le centre de crise du gouvernement grâce à des modélisations toujours plus performantes. **Prévoir où se déplacera un nuage toxique, découvrir sa source** est aujourd'hui réalisable dans de bien meilleures conditions qu'autrefois. Des simulations d'accidents de ce type ont déjà été réalisées à l'échelle européenne grâce à la coopération entre services européens et à l'harmonisation de leurs outils. Ces expériences conduisent pas à pas entre autres à une harmonisation des méthodes d'alertes météorologiques à l'échelle européenne, comme on peut le découvrir sur le site Web suivant :

<http://www.meteoalarm.eu>

On peut citer aussi comme application intéressante de la météorologie, sa contribution cruciale à la surveillance en matière d'incidents ou d'accidents nucléaires. L'IRM participe aux exercices simulant les accidents nucléaires sur notre territoire ou ailleurs.

d) Tous ceux qui s'investissent dans **l'aménagement des territoires**, seront intéressés par les caractéristiques de notre climat obtenues grâce entre autres, rappelons-le, aux observateurs volontaires du climat nous aidant dans cette mission de récolte sur l'ensemble du territoire fédéral, de validation et de gestion de nombreuses données. La vulnérabilité de l'environnement aux aléas des conditions météorologiques peut être mieux prise en compte qu'autrefois. Comment construire, où installer des bassins d'orages, où installer des éoliennes, comment améliorer le rendement énergétique des nouvelles constructions... autant de questions qui s'éclairent aujourd'hui grâce entre autres à une nouvelle approche du risque et du potentiel climatiques.

e) Le suivi en temps quasi réel de l'évolution de certains paramètres climatologiques permet aujourd'hui d'apporter une aide à la décision pour certains secteurs plus spécifiques et particulièrement sensibles (dans le domaine agricole par exemple). Par exemple, l'indice de sécheresse « KBDI » est calculé à partir des températures journalières maximales et des cumuls de précipitations. La figure 4 illustre l'évolution annuelle de cet indice pour différentes années dans le passé au cours desquelles des épisodes de sécheresse se sont produits. L'épisode d'avril-mai 2007 (en mauve) se caractérise par sa précocité printanière, mais son intensité peut être relativisée comparativement à d'autres épisodes plus anciens plus sévères (dont celui de 1976 en bleu, le plus grave jusqu'à aujourd'hui, et celui de 2006 en vert, sévère jusqu'à la fin du mois de juillet). La courbe en jaune donne l'évolution annuelle moyenne de cet indice calculée sur une période de 30 ans.

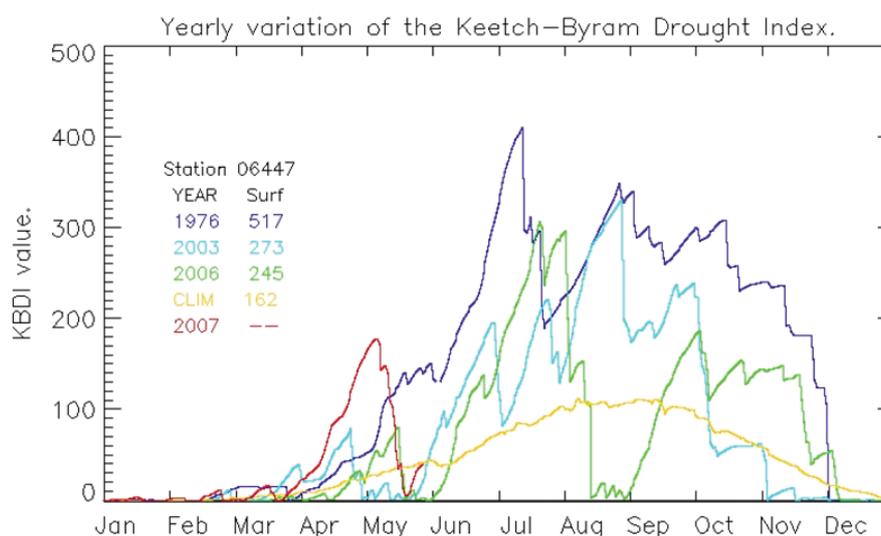


Figure 4. Un exemple d'indice de sécheresse dont le suivi en temps quasi réel peut apporter une aide à la décision dans les domaines d'activités particulièrement sensible à ce phénomène (cf. le texte pour l'explication de la figure).

## 2. Etude de scénarios climatiques : le projet « 3INBO »

En cette année 2008, l'Institut Royal Météorologique collabore avec le KNMI (l'Institut Royal Météorologique des Pays Bas) et la section hydraulique de la KULeuven (Université Catholique de Louvain) au projet intitulé « Berekening van Klimaatscenario's voor Vlaanderen » et commandé par un Institut dépendant du Ministère de la Communauté Flamande, en l'occurrence l'« Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek (INBO) ».

Ce projet se poursuit parallèlement au projet « Climate Change Impacts – Hydrology (CCI-HYDR) » de la Politique scientifique fédérale auquel prennent part des scientifiques de la KUL et de l'IRM.

Les scénarios climatiques sont des projections qui tentent le mieux possible de décrire un climat futur consistant et cohérent. **Insistons encore sur le fait que les scénarios climatiques ne sont pas des prévisions météorologiques à long terme.** Dans ce sens, ils ne décrivent pas le temps attendu ni un jour donné, ni un mois donné, ni même une année donnée mais seulement une moyenne des conditions météorologiques ainsi que la probabilité des phénomènes extrêmes à l'avenir. Les scénarios climatiques représentent les changements prévus dans les caractéristiques statistiques des températures, des précipitations, des vents et d'autres variables climatologiques sur une période climatologique de 30 ans.

Les scénarios climatiques sont construits au départ d'un grand nombre de sorties de modèles prenant en compte tant les influences globales que locales et dans lesquelles l'impact de différents scénarios d'émission est étudié. Les sorties des modèles climatiques peuvent être combinées avec des séries de variables climatiques. On développe un logiciel dans lequel de longues séries historiques sont combinées aux résultats d'un scénario pour décrire un climat futur. De cette façon, on introduit l'information sur les variations annuelles, sur les fluctuations naturelles du passé et sur la variabilité spatiale.

## CONCLUSIONS

Faut-il rappeler au lecteur que la distinction entre la contribution naturelle et celle due à l'homme aux changements climatiques est devenue un problème important en ce début de 21<sup>e</sup> siècle ? Assez régulièrement, le débat public est malheureusement victime de la confusion entre différentes notions. De plus, qu'il s'agisse d'expliquer les mécanismes à l'œuvre dans le réchauffement global ou d'en préciser les impacts négatifs, l'approche doit encore progresser tant parmi la communauté scientifique que parmi tous ceux qui s'impliquent dans les processus de décisions collectives les plus consensuelles possibles.

Par cette publication nous avons voulu informer sur nos activités et apporter notre contribution dans le cadre de la problématique autour du changement de climat.

Grâce à ses équipes de recherche fondamentale, aux observateurs, aux prévisionnistes, aux informaticiens et aux autres membres du personnel, l'IRM a contribué et contribue au progrès dans la compréhension des phénomènes atmosphériques. L'IRM compte rester actif dans la problématique du climat, par ses projets de recherche et en apportant à la collectivité des services utiles dans le cadre des prises de décisions relatives aux énergies, à l'environnement, à l'aménagement des territoires et à l'adaptation aux changements climatiques. Ce travail se veut une étape dans cette voie.

**A l'issue d'un travail que nous avons souhaité accessible à tous, nous voudrions souligner l'importance du principe de précaution dans quatre domaines d'applications.**

**La recherche scientifique.** Depuis trente ans, la recherche fondamentale dans la compréhension du système climatique (sans oublier ses retombées dans la recherche appliquée) a fait incontestablement des avancées (dans la modélisation des facteurs qui y sont à l'œuvre, dans l'approfondissement de son histoire, dans ses interactions avec le monde vivant toujours susceptible de créer des surprises ou dans les perturbations naturelles ou anthropiques qu'il peut connaître). Elle est, néanmoins, loin d'être aboutie. L'erreur serait de croire que, désormais, en cette matière tout serait compris. Il s'agit au contraire d'encourager les jeunes chercheurs à approfondir notre connaissance du climat. Il est nécessaire pour cela de leur proposer des perspectives de carrières à long terme afin qu'ils puissent développer de manière efficace leur créativité au service de la collectivité.

**La surveillance du climat.** Les réseaux d'observations en surface doivent absolument être pérennisés et même renforcés. Ils sont indispensables à la validation et à l'amélioration des données issues des satellites offrant, quant à eux, une vue globale de notre planète à la résolution de plus en plus fine. Ces types d'approches sont complémentaires et toutes indispensables à une surveillance du climat global et des climats régionaux. L'observation spatiale récente dans ce domaine offre des perspectives sans doute mais qui ne sont réellement prometteuses que grâce à une adéquation avec le travail d'observation « depuis le sol ». Des réseaux d'observations étendus et fiables sont aussi indispensables à la validation des modèles climatiques.

**La prévention des calamités.** La surveillance des phénomènes météorologiques extrêmes doit être soutenue sans relâchement. Elle implique des moyens et de la main d'œuvre qualifiée en amont et en aval de la prévision météorologique. Elle bénéficie de techniques qui peuvent encore sans doute s'améliorer mais qui, étant bien appliquées dès aujourd'hui, nous préparent mieux aux phénomènes que les hommes affronteront demain dans un environnement qui risque d'être plus vulnérable.

**La qualité de l'environnement.** Le large consensus actuel pour diminuer la dépendance de la société aux combustibles fossiles repose sur des arguments scientifiques pertinents et l'argument climatique n'en est qu'un parmi d'autres. Les choix vers cette orientation devraient pouvoir être adoptés « sans regret » puisqu'ils pourraient non seulement diminuer les risques d'un basculement induit du climat mais aussi, à plus court terme, améliorer la qualité générale de notre environnement et favoriser l'émergence d'un développement « plus propre ».

**Malgré ces mises en garde élargissant le principe de précaution habituellement évoqué à propos du changement de climat, concluons sur une note optimiste :** de notre point de vue, les avancées scientifiques relatives aux changements de climat et aux risques météorologiques devraient contribuer à apporter de nouvelles opportunités pour un meilleur développement réconciliant l'homme et son environnement.

## Pour en savoir plus

### a) Publications tout public, ouvrages de vulgarisation et rapports techniques

#### Climat de la Belgique

BROUYAUX, F. et C. TRICOT, 2007. Etude en support au « Plan Pluies » pour la Région de Bruxelles-Capitale, Marché de services pour IBGE-BIM 2006.

BROUYAUX, F., MORMAL, P., TRICOT, C. et M. VANDIEPENBEECK, 2004. La Belgique au fil du temps. Les événements météorologiques marquants du vingtième siècle en Belgique, IRM et le Roseau vert (eds), 223 p.

MORMAL, P. et C. TRICOT, 2004. L'aperçu climatique des Hautes-Fagnes, IRM, Publication scientifique et technique n°36, 32 p.

SNEYERS, R., 1981. Les séries climatologiques de Bruxelles-Uccle. La température de l'air, IRM, Publ. Série B, n°110, 39 p.

SNEYERS, R. et M. VANDIEPENBEECK, 1995. Notice sur le climat de la Belgique, IRM, Publication scientifique et technique n°2, 62 p.

VANDIEPENBEECK, M., 1996. Fluctuations récentes dans les séries climatologiques de Bruxelles-Uccle (Belgique), Publication de l'Association Internationale de Climatologie, 1997, vol 9.

VANDIEPENBEECK, M., TRICOT, C., TEMPELS, J. et A. JOUKOFF, 1995. Le climat de la Belgique change-t-il ?, in « Etat de l'Environnement wallon 1994 », 211-219.

#### Climatologie générale et Climatologie dynamique

BARUCH, J. O. (Coordinateur), 2007. Les trois inconnues du CLIMAT, Dossier, La Recherche, 414, 31-49.

MOHYMONT, B. et G. DEMAREE. Généralisation linéaire par morceaux de la formule de Montana pour l'établissement des courbes IDF des précipitations à Uccle, Belgique, soumis en 2007 pour publication dans "La Houille Blanche, Revue internationale de l'Eau".

NICOLIS, C., 1991. Le climat peut-il basculer ?, La recherche, 232, 584-587.

SNEYERS, R., 1975. Sur l'analyse statistique des séries d'observations, Note Techn. n°143, Organisation Météorologique Mondiale, Genève, 192 p.

### b) Publications spécialisées classées par chapitre auquel elles se rapportent

#### Chapitre 1. L'évolution du climat en Belgique

DEMAREE, G., 1990. Did an abrupt global climate warming occur in the 1920 ?, in « Contribution à l'étude des changements de climat », IRM, Publ. Série A, n°124.

GELLENS, D., 2002. Combining regional approach and data extension procedure for assessing GEV distribution of extreme precipitation in Belgium, J. of Hydrology, 268, 113-126.

MANN, H. B., 1945. Non parametric test against trend, Econometrika, 13, 245-259.

PETTIT, A. N., 1979. A non parametric approach to the change-point problem, Appl. Statis., 28, 126-135.

SNEYERS, R., BÖHM, R. and S. VANNITSEM, 1992. Climatic changes in the Austrian Alps during the period 1775- 1989, Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 15, 195-199.

VANDIEPENBEECK, M., 1995. Practice climate change detection in the case of a special alternative to randomness, Proceedings of the 6th International Meeting on Statistical Climatology, University College Galway, Ireland, 25-28.

VANDIEPENBEECK, M., 1998. On a recent urban effect in the time series of the temperature in different stations in Belgium, Proceedings of the 2nd European Conference on Applied Climatology, sur Cd-ROM, édité par le Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Vienna, Austria.

VANNITSEM, S. et G. DEMAREE, 1991. Détection et modélisation des sécheresses au Sahel. Proposition d'une méthodologie, Hydrol. continent., 6, 155-171.

## Chapitre 2. Quelques éléments du système climatique étudiés à l'IRM

### Le rayonnement solaire, et le rôle des aérosols.

- CHEYMOL, A. and H. DE BACKER, 2003. Retrieval of the aerosol optical depth in the UV-B at Uccle from Brewer ozone measurements over a long time period 1984-2002, *J. Geophys. Res.*, 108(D24), 4800, doi:10.1029/2003JD003758.
- CHEYMOL, A., DE BACKER, H., JOSEFSSON, W. and R. STUBI, 2006. Comparison and validation of the aerosol optical depth obtained with the Langley plot method in the UV-B from Brewer ozone spectrophotometer measurements, *J. Geophys. Res.*, 111, D16202, doi:10.1029/2006JD007131.
- DEWITTE, S., 2007. The European climate anomaly in 2006 as seen by the Geostationary Earth Radiation Budget instrument, *Eumetsat Conference Proceedings*, available online as <http://gerb.oma.be/gerb/Publications/2006climateanomaly.pdf>.
- DEWITTE, S., CROMMELYNCK, D., MEKAOUI, S. and A. JOUKOFF, 2005. Measurement and uncertainty of the long term total solar irradiance trend, *Solar Physics*, 224, 209-216.
- DEWITTE, S., L. GONZALEZ, N. CLERBAUX, A. Ipe, C. Bertrand, B. De Paepe, "The Geostationary Earth Radiation Budget Edition 1 data processing algorithms", *Advances in Space Research*, Vol. 41, No 11, pp 1906-1913, 2008, doi:10.1016/j.asr.2007.07.042.
- MEKAOUI, S., S. DEWITTE, "Total Solar Irradiance measurement and modelling during cycle 23", *Solar Physics*, Vol. 247, pp. 203-216, doi:10.1007/s11207-007-9070-y, 2008.

### L'ozone

- AUSTIN, J. and R. J. WILSON, 2006. Ensemble simulations of the decline and recovery of stratospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 111, D16314, doi:10.1029/2005JD006907.
- DE BACKER, H., 1999. Homogenisation of ozone vertical profile measurements at Uccle, *Publication scientifique et technique n°7, IRM, ISSN D1999/0224/007*, 26pp, available online as <ftp://ftp.kmi-irm.be/dist/meteo/hugo/publ/1999/o3prof.ps>.
- DELCLOO, A. and H. DE BACKER, 2005. Modelling planetary boundary layer ozone, using meteorological parameters at Uccle and Payerne, *Atmospheric environment*, 39 (28), 5067-5077, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.05.013.
- LEMOINE, R. and H. DE BACKER, 2001. Assessment of the Uccle ozone sounding time series quality using SAGE II data, *J. Geophys. Res.*, 106, 14515-14523.
- STOLARSKI, R. S. and S. M. FRITH, 2006. Search for evidence of trend slow-down in the long-term TOMS/SBUV total ozone data record: the importance of instrument drift uncertainty, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 4057-4065.
- YANG, E.-S., CUNNOLD, D. M., SALAWITCH, R. J., MC CORMICK, M. P., RUSSEL III, J., ZAWODNY, J. M., OLTMANS, S. and M. J. NEWCHURCH, 2006. Attribution of recovery in lower-stratospheric ozone, *J. Geophys. Res.*, 111, D17309, doi:10.1029/2005JD006371.

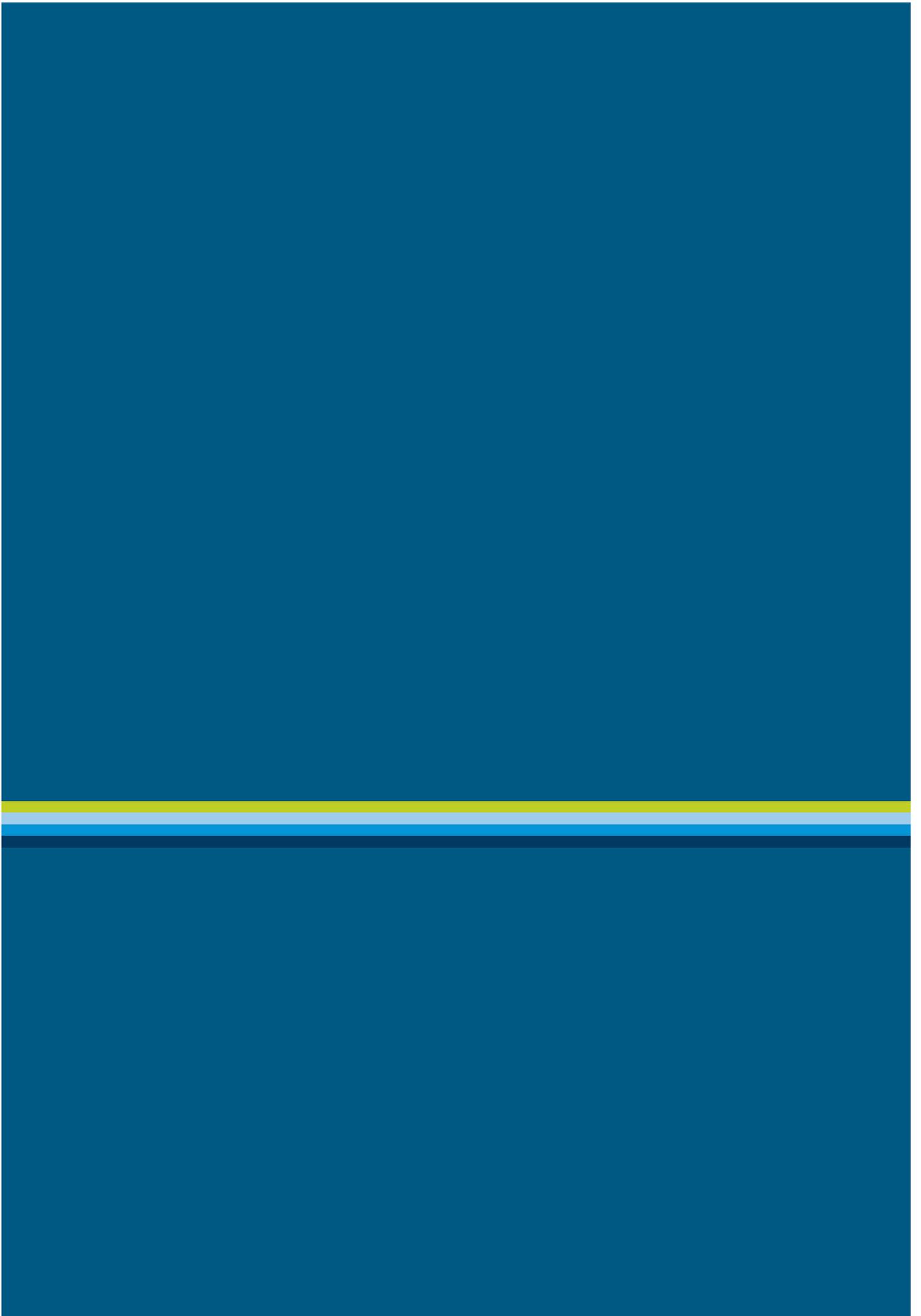
## Chapitre 3. Recherches sur la prévision et la modélisation climatiques

- BERGER, A. 1981. *Climatic variations and variability: facts and theories*. Reidel, Dordrecht.
- DEMAREE, G. and C. NICOLIS, 1990. Onset of sahelian drought viewed as a fluctuation-induced transition, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 116, 221-243.
- DE WIT, M. J. M., VAN DEN HURK, B., WARMERDAM, P. M. M., TORFS P. J. J. F., ROULIN, E. and W. P. A. VAN DEURSEN, 2007. Impact of climate change on low-flows in the River Meuse, *Climatic Change*, 82, 351-372.
- DIJKSTRA, H. A., 2005. *Nonlinear physical oceanography*, Springer, 532 p.
- GELLENS, D. and E. ROULIN, 1998. Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 210, 242-258.
- GOSSWAMI, B. and J. SHUKLA, 1991. Predictability of a coupled Ocean-Atmosphere model, *J. Climate*, 4, 3-22.
- NICOLIS, C., 1982. Stochastic aspects of climatic transitions - Response to a periodic forcing, *Tellus*, 34, 1-9.
- NICOLIS, C., 2004. Dynamics of model error: The role of unresolved scales revisited, *J. Atmos. Sci.*, 61, 1740-1753.
- NICOLIS, C. and G. NICOLIS, 2004. Noisy limit point bifurcation with slowly varying control parameter, *Europhys.* 66, 185-191.

- 
- PALMER, T.N., 2000. Predicting uncertainty in forecasts of weather and climate, *Rep. Prog. Phys.*, 63, 71-116.
- ROULIN, E., 2007. Skill and relative economic value of medium-range hydrological ensemble predictions, *Hydrology and Earth System Science*, 11, 725-737.
- VANNITSEM, S., 2006. The role of scales in the dynamics of parameterization uncertainties, *J. Atmos. Sci.*, 63, 1659-1671.
- VANNITSEM, S. and C. NICOLIS, 1998. Dynamics of fine-scale variables versus averaged observables in a T21L3 quasi-geostrophic model, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 124, 2201-2226.
- VANNITSEM, S. and C. NICOLIS, 2008. Dynamical properties of Model Output Statistics forecasts, *Mon. Wea. Rev.* 136, 405-419.

#### **Chapitre 4. L'aide à la décision et à l'adaptation**

- KNMI, 2006. *Klimaat in de 21e eeuw. Vier scenario's voor Nederland*, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, 16 p.
- MOHYMONT, B., DEMAREE, G. R. and D. N. FAKA, 2004. Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa – comparison of techniques and results, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, 375-387.
- TERMONIA, P. and A. QUINET, 2004: A new transport index for predicting episodes of extreme air pollution, *J. Appl. Meteor.*, 43, 631-640.



Publié par l'institut royal météorologique de Belgique, 3 avenue Circulaire 1180 Bruxelles. Editeur responsable Dr. H. Malcorps

ISBN 02008/0224/049