



Contribution à la climatologie du Luxembourg



Analyses historiques,
scénarios futurs



Christian Ries (éditeur)

43 2005

Travaux scientifiques
du Musée national
d'histoire naturelle
Luxembourg



Ferrantia est une revue publiée à intervalles non réguliers par le Musée national d'histoire naturelle à Luxembourg. Elle fait suite, avec la même toponymie aux TRAVAUX SCIENTIFIQUES DU MUSÉE NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE DE LUXEMBOURG.

Comité de rédaction:

Eric Buttini
Guy Colling
Edmée Engel
Thierry Helmingier
Marc Meyer

Mise en page:

Romain Bei

Design:

Service graphique du MNHN

Prix du volume: 10 €

Rédaction:

Musée national d'histoire naturelle
Rédaction Ferrantia
25, rue Munster
L-2160 Luxembourg

tel +352 46 22 33 - 1
fax +352 46 38 48

Internet: <http://www.naturmusee.lu>
email: ferrantia@mnhn.lu

Echange:

Exchange MNHN-SNL
c/o Musée national d'histoire naturelle
25, rue Münster
L-2160 Luxembourg

tel +352 46 22 33 - 1
fax +352 46 38 48

Internet: <http://www.mnhnl.lu/biblio/exchange>
email: exchange@mnhnl.lu

Page de couverture:

1. Nicolas Bodson (1802-1871), professeur à l'Athénée royal grand-ducal de Luxembourg, le premier à faire des observations météorologiques quotidiennes systématiques au Luxembourg.
2. Appareils météorologiques sur le site de l'aéroport de Luxembourg dans les années 1950. © Service météorologique de l'aéroport.
3. Crue de la Sûre à Reidorf en janvier 2003. © CREBS, Luxembourg.

Titre:

Christian Ries (éditeur): Contribution à la climatologie du Luxembourg. Analyses historiques, scénarios futurs.

Date de publication:

16 mars 2005
(réception du manuscrit: 22 octobre 2004)

Impression:

Imprimerie Graphic Press Sàrl, Mamer, Luxembourg

Ferrantia

43

Contribution à la climatologie du Luxembourg Analyses historiques, scénarios futurs

Christian Ries (éditeur)

Luxembourg, 2005

Table des matières

Préface	7
Massard Jos A.: Aspects de l'histoire de la météorologie au Luxembourg	
Résumé	9
Abstract	9
Zusammenfassung	9
Introduction	10
Le début des observations météorologiques scientifiques	10
L'oeuvre du professeur François Reuter	11
Le premier service météorologique officiel	14
La création du service météorologique de l'aéroport	16
L'oeuvre du professeur Eugène Lahr	16
Vers des horizons nouveaux	18
Bibliographie	18
Droge G., Hoffmann L., Pfister L.: Les archives climatiques quantitatives de Luxembourg-ville: analyse primaire des longues séries chronologiques (1838-2003)	
Résumé	21
Abstract	21
Zusammenfassung	21
1. Introduction: de l'importance des observations climatologiques au long cours	22
2. Inventaire et modalités d'observation des longues séries climatologiques à Luxembourg-ville	25
2.1. Périodes et sites d'observation retenus	25
2.2. Collecte de l'information climatologique et historique des mesures	26
2.2.1. Inventaires des paramètres climatologiques exploitables sur plus d'un siècle	26
2.2.2. Instrumentation et mode opératoire	27
3. De la donnée brute à la donnée critiquée	33
3.1. Panorama méthodologique	33
3.2. Organigramme de la procédure de critique et d'homogénéisation des séries temporelles	34
3.2.1. La température de l'air	34
3.2.2. Les précipitations	40
3.2.3. La durée d'insolation	41
4. Résultats de la procédure de critique et d'homogénéisation des longues séries climatologiques	42
4.1. La température de l'air	42
4.1.1. Les séries quotidiennes de température moyenne (1854-1888/1947-2003)	42

4.1.2. Les séries mensuelles de températures extrêmes (1947-2003)	43
4.1.3. Les séries mensuelles de température moyenne (1838-2003)	44
4.1.4. Comparaison des températures moyennes mensuelles homogénéisées de la « station climatologique de Luxembourg-ville » et de Metz-Frescaty sur la période 1899-2003	47
4.1.5. Comparaison des températures moyennes mensuelles homogénéisées de la « station climatologique de Luxembourg-ville » et du fichier CRU (Climate Research Unit) sur la période 1851-2003	47
4.2. Les précipitations	48
4.2.1. Les séries quotidiennes (1854-1888/1947-2003)	48
4.2.2. Les séries mensuelles et annuelles (1854-2003)	48
4.2.3. Comparaison des cumuls de précipitation annuels de la «station climatologique de Luxembourg-ville» et de Trèves (série homogénéisée ECA)	49
4.3. La durée d'insolation	49
4.3.1. Les séries quotidiennes (1947-2003)	49
4.3.2. Les séries mensuelles et annuelles (1931-2003)	50
5. Conclusions	50
Remerciements	52
Bibliographie	53
Annexes	55

Pfister L., Drogue G, Poirier C., Hoffmann L.: Evolution du climat et répercussions sur le fonctionnement des hydrosystèmes au Grand-Duché de Luxembourg au cours des 150 dernières années

Résumé	85
Abstract	85
Zusammenfassung	86
1. Introduction	86
2. Hydro-climatologie du Grand-Duché de Luxembourg	87
2.1. La base de données hydro-climatologiques	87
2.2. Le régime hydrologique des cours d'eau luxembourgeois	88
3. Analyses de séries hydro-climatologiques historiques au Grand-Duché de Luxembourg	88
3.1. Analyse des séries pluviométriques	90
3.1.1. Variations observées dans les séries pluviométriques	90
3.1.2. Recherche de tendances dans les séries pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg	92
3.1.3. Variabilité spatiale des modifications subies par les champs pluviométriques	94
3.2. Analyse des séries limnimétriques	95
3.2.1. Variations observées dans les séries limnimétriques	95
3.2.2. Recherche de tendances dans les séries hydrométriques au Grand-Duché de Luxembourg	95
3.2.3. Variabilité spatiale des tendances observées sur les séries d'observations limnimétriques	97
4. Conclusion	98
Remerciements	99
Bibliographie	99

Drogue G., Hoffmann L., Matgen P., Pfister L., Leviandier T.: Trajectoire climatique et réponse hydrologique à l'horizon 2050: l'exemple de deux cours d'eau luxembourgeois

Résumé	101
Abstract	102
Zusammenfassung	102
1. Introduction	102
1.1. Les données historiques	103
1.2. Etablissement des scénarios climatiques futurs: outils et terminologie	103
1.2.1. Les modèles numériques de circulation générale	104
1.2.2. Incertitudes sur les projections climatiques	106
1.3. Le problème du transfert d'échelle	107
1.3.1. Panorama des méthodes existantes	107
1.3.2. Du bon usage des extraits de MCG pour l'établissement de scénarios climatiques	109
1.4. Choix du modèle pluie-débit	109
1.5. Les variables hydrologiques	111
2. Matériel et méthodes	111
2.1. Présentation du MCG et des scénarios climatiques utilisés	111
2.1.1. Le modèle de circulation générale atmosphérique HadCM3	111
2.1.2. Les scénarios climatiques testés	112
2.2. Le générateur stochastique de climat	112
2.2.1. Les séries de précipitation	114
2.2.2. Les séries de température journalières	117
2.3. Le modèle hydrologique MHR	118
2.4. Méthodologie générale adoptée pour l'étude d'impact	119
2.4.1. Désagrégation d'échelle des séries climatiques par voie statistique	119
2.4.2. Bassins versants expérimentaux	121
3. Résultats et discussion	123
3.1. Calage et contrôle du modèle pluie-débit	123
3.2. Corrélations entre séries climatiques locales et simulées au point de grille	123
3.3. Corrélations entre séries climatiques locales et indices atmosphériques	124
3.3.1. Validation de la procédure de désagrégation régionale	127
3.3.2. Scénarios climatiques désagrégés	130
3.3.3. Impact des scénarios climatiques sur les variables hydrologiques	131
4. Conclusion	134
Remerciements	135
Bibliographie	136

Préface

Christian Ries

Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg
25 rue Münster, L-2160 Luxembourg
cries@mnhn.lu

Nous marquons l'an 1 de l'entrée en vigueur du protocole de Kyoto, un peu plus de 7 ans après sa signature (UNFCCC 1997). Le protocole de Kyoto vise à prévenir un péril certain et aux conséquences probablement désastreuses pour l'ensemble de l'humanité. Une demi-décennie auparavant, au sommet de Rio en 1992, la majorité des pays adoptèrent la Convention sur le changement climatique fixant l'objectif de stabiliser les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation d'origine anthropique dangereuse du système climatique (Kempf 2005).

En 20 ans la « diplomatie climatique » a progressé à une vitesse surprenante et l'opinion publique a pris conscience des enjeux posés par le réchauffement climatique. Elle a transformé un objet de controverse scientifique en l'un des instruments appelés à modeler les rapports géopolitiques du 21^{ème} siècle (Kempf 2005).

Si le grand public est loin de s'y retrouver dans le débat scientifique sur le changement climatique, il a en général retenu les contradictions entre plusieurs hypothèses fortement médiatisées. Source des difficultés majeures sont les séries de données disponibles à l'homme pour les paramètres climatiques : par exemple, concernant la variation de la température sur terre en fonction de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, nous disposons surtout de données indirectes, les mesures directes couvrant uniquement quelque 150 années ! Pour les périodes précédant le milieu du 19^{ème} siècle, les climatologues ont recours à des données indirectes ; pour le futur ils établissent des projections sur une centaine d'années avec variation des hypothèses.

Le monde scientifique est aujourd'hui pratiquement unanime que le phénomène du réchauffement est une réalité. Il prédit un réchauffement de la terre entre 1,4 et 5,8°C jusqu'à la fin du 21^{ème} siècle (BBC News 2005).

Les modèles les plus récents tentent d'expliquer le changement tout d'abord au niveau des facteurs naturels tels que variabilité climatique naturelle, radiation solaire, émissions volcaniques. Ces tentatives ont échoué. Ensuite ils introduisent les facteurs anthropiques dans le modèle. Il en ressort que l'effet de serre est bel et bien le facteur le plus significatif, atteignant un niveau de confiance statistique de 95% (Rincon 2005). « If you take this data and combine it with a decade of earlier results, the debate about whether or not there is

a global warming signal here and now is over at least for rational people » conclut Tim Barnett (in: Rincon 2005).

Le réchauffement, même si la canicule de 2003 a donné lieu à des interprétations peu fondées, reste une donnée peu perceptible pour le grand public dans nos contrées alors que d'autres régions de la planète en sont désormais fortement affectées. Rappelons la fonte massive des glaciers au sommet de grands massifs montagneux, p.ex. les Alpes et les Andes, ou la désertification rapide de régions agricoles en Afrique du Sud, encore fertiles il y a à peine une décennie.

Les reconstitutions du climat des deux derniers millénaires laissent de moins en moins de place au doute : les quatre années les plus chaudes jamais enregistrées sont intervenues lors de la dernière décennie. Le phénomène s'accompagne d'un cortège de désordres climatiques – les phénomènes extrêmes – tels qu'inondations, sécheresses, ouragans (Morin 2005).

Au-delà de la littérature scientifique tel le présent ouvrage, l'intéressé pourra, grâce à Internet, étudier ces phénomènes sur des sites didactiques multimédias (cf. BBC News 2005) et procéder à ses propres expérimentations en ligne (Matthews 2005). Le groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat rassemble en ligne l'ensemble des rapports visant à établir la réalité du changement climatique (IPCC 2005). Des scientifiques actifs dans le domaine de la climatologie animent un site de discussion sur les sciences du climat pour le public et les journalistes (RealClimate 2005).

La littérature grand public se multiplie à mesure que la thématique se clarifie au niveau scientifique (cf. p. ex. Le Treut & Jacques 2004, Jouzel & Déroise 2004). Au fur et à mesure des avancées scientifiques, les voix sceptiques se font de plus en plus rares, quoique parfois fortement médiatisées (cf. Lomborg 2004).

Qu'en est-il de la recherche au Luxembourg sur le climat ? Quelles contributions ? Au vu des capacités réduites que présente un petit pays tel le nôtre, une recherche efficace et la diffusion voire l'application des résultats n'est possible que si les efforts sont joints au-delà des institutions et organismes impliqués. Une coopération entre les acteurs luxembourgeois concernés s'impose au vu de l'urgence de disposer de données et de modèles fiables dans le contexte du changement climatique.

La parution du présent recueil d'articles marque le début d'une collaboration concrète entre plusieurs institutions et organismes luxembourgeois : L'ASTA, l'Administration des services techniques de l'agriculture ; le CREBS, Cellule de recherche en environnement et biotechnologies auprès du Centre de recherche public Gabriel Lippmann ; le MNHNL, le Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg et la SNL, la Société des naturalistes luxembourgeois.

Cette collaboration permettra sans doute d'approfondir nos connaissances sur le climat de nos régions et contribuera certainement à l'effort de recherche, d'analyse et de modélisation au niveau européen.

Le présent numéro de Ferrantia regroupe approches historiques et prospectives :

1. Des sources historiques léguées par nos ancêtres, toujours préoccupés par le temps et son influence sur les cultures et les conditions de vie, aux débuts de l'observation scientifique jusqu'aux recherches actuelles sur le climat, Jos Massard retrace dans le premier article l'histoire de la météorologie au Luxembourg.
2. Quelle fiabilité accorder aux données météorologiques enregistrées depuis plus de 150 ans? Dans ce deuxième article, Gille Drogue, Lucien Hoffmann et Laurent Pfister abordent la problématique de l'homogénéisation des données sur la base des archives climatiques de Luxembourg-ville, préalable à toute analyse multi-décennale de la variabilité climatique.
3. Dans un troisième article, Laurent Pfister, Gilles Drogue, Christelle Poirier et Lucien Hoffmann combinent les archives climatiques et hydrologiques pour documenter le fonctionnement de nos hydrosystèmes en relation avec le climat. Il en ressort que les précipitations hivernales augmentent fortement depuis le milieu du 20^{ème} siècle ce qui induit un accroissement sensible des débits des cours d'eau en période hivernale.
4. Cette analyse permet aux auteurs du dernier article de développer une projection vers l'horizon 2050. Gilles Drogue, Lucien Hoffmann, Patrick Matgen, Laurent Pfister et Thierry Leviandier tentent de quantifier les répercussions des variations futures du climat sur nos hydrosystèmes fondées sur deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre, article s'insérant parfaitement dans le contexte du réchauffement climatique.

J'adresse mes remerciements au comité de rédaction et au service de mise en page de la série Ferrantia du MNHNL pour les critiques et travaux de mise en page ainsi qu'aux « referees » pour la lecture critique des articles.

Je remercie également le Fonds National de la Recherche du Luxembourg pour son soutien financier à la parution de ce volume.

Finalement je tiens à remercier les auteurs pour l'excellente collaboration lors de l'édition de ce volume et, en leur nom, je dédie ce volume à la mémoire de Christelle Poirier, décédée le 22.01.2005 à Strasbourg, co-auteur du troisième article du présent recueil (Pfister et al.).

Bibliographie

- BBC News 2005. - Guide to climate change. BBC News UK edition. En ligne sur Internet. URL: http://news.bbc.co.uk/1/shared/spl/hi/sci_nat/04/climate_change/html/climate.stm [22.02.2005]
- IPCC 2005. - Intergovernmental Panel on Climate Change. En ligne sur Internet. URL: <http://www.ipcc.ch/> [22.02.2005]
- Jouzel J. & Debroise A. 2004. - Le Climat : jeu dangereux. Collection Quai des Sciences, Dunod. 224 p., ISBN 2100069632.
- Kempf H. 2005. - Kyoto an 1. Le Monde daté 16.02.2005, Dossier: I.
- Le Treut H. & Jacques G. 2004. - Le changement climatique. Collection COI Forum Océans, Editions UNESCO. 160 p., ISBN 92-3-203938-9.
- Le Treut H. & Jancovici J.-M. 2004. - Effet de serre. Allons-nous changer le climat ? Flammarion, 223 p., ISBN 2-08-080081-7.
- Lomborg B. 2004. - L'écologiste sceptique. Le véritable état de la planète. Le Cherche-Midi, 752 p., ISBN n° 2-74910-184-0
- Matthews B. 2005. - Java Climate Model. En ligne sur Internet. URL: <http://climatechange.unep.net/jcm/> [22.02.2005]
- Morin H. 2005. - Le réchauffement planétaire, les risques qu'il induit et les débats qu'il suscite. Le Monde du 16.02.2005, Dossier: II
- RealClimate 2005. - RealClimate, site de discussion sur les sciences du climat pour le public et les journalistes. En ligne sur Internet. URL: <http://www.realclimate.org/> [22.02.2005]
- Rincon P. 2005. - Greenhouse gases 'do warm oceans'. BBC News, online Science/Nature. URL: <http://news.bbc.co.uk/go/pr/fr/-/2/hi/science/nature/4275729.stm> [22.02.2005]
- UNFCCC 1997. - Protocole de Kyoto A. La convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques. En ligne sur Internet. URL: http://unfccc.int/files/cooperation_and_support/cooperation_with_international_organisations/application/pdf/kpfrench.pdf [22.02.2005]

Aspects de l'histoire de la météorologie au Luxembourg

Jos. A. Massard

1a, rue des Romain

L-6478 Echternach

E-mail: jmassard@pt.lu

Résumé

Les premières observations météorologiques au Luxembourg ont été faites par le professeur Nicolas Bodson (1802-1871) à partir de l'hiver 1837 jusqu'en 1852. Parallèlement, le professeur P.J.J. van Kerckhof (1813-1876) a également fait des relevés, mais il n'en reste guère de traces. Le grand pionnier de la météorologie luxembourgeoise a été le professeur François Reuter (1819-1908) dont les observations publiées dans plusieurs ouvrages et articles ont couvert la période de 1854 à 1894. Une partie en a été publiée de façon posthume en 1917 par le professeur Guillaume Soisson (1866-1918). Le premier service météorologique officiel – rattaché à l'administration des services agricoles – a été créé en 1907. En 1946, l'installation de l'aéroport de Luxembourg a nécessité la création d'un service météorologique spéci-

Abstract

The first meteorological observations in Luxembourg were made by professor Nicolas Bodson (1802-1871), beginning in winter 1837 and ending in 1852. At the same time professor P.J.J. van Kerckhof (1813-1876) made records too, but unfortunately they are mostly lost. The greatest pioneer of Luxembourg meteorology was professor François Reuter (1819-1908) with observations ranging from 1854 to 1894 and published in several books and articles. His last records were published posthumously in 1917 by professor Guillaume Soisson (1866-1918). The first official weather service was created in 1907 and attached to the 'Administration des services agricoles' (Administration of agricultural services). In 1946, the opening of the airport of Luxembourg required the creation of a specific weather service linked to the airport. In 1950 professor Eugène Lahr (1897-1981), observer

Zusammenfassung

Die ersten meteorologischen Beobachtungen in Luxemburg wurden von Professor Nicolas Bodson (1802-1871) zusammengetragen (ab dem Winter 1837 bis ins Jahr 1852). Parallel hierzu machte Professor P.J.J. van Kerckhof (1813-1876) ebenfalls Aufzeichnungen, von denen jedoch nur noch einige Blätter erhalten geblieben sind. Der große Pionier der luxemburgischen Meteorologie war Professor François Reuter (1819-1908), dessen Beobachtungen von 1854 bis 1894 reichten und ihren Niederschlag in mehreren Büchern und Artikeln fanden. Seine letzten Aufzeichnungen wurden 1917 posthum von Professor Guillaume Soisson (1866-1918) veröffentlicht. Der erste amtliche Wetterdienst wurde 1907 bei der Ackerbauverwaltung (Administration des services agricoles) eingerichtet. 1946 erforderte die Inbetriebnahme des Flughafens von Luxemburg die Einrichtung eines besonderen, dem Flughafen angeleg-

fique lié à l'aéroport. En 1950 le professeur Eugène Lahr (1897-1981), observateur de la station météorologique de premier ordre de Luxembourg-Limpertsberg, a publié les résultats d'un siècle d'observations météorologiques faites au Luxembourg, un ouvrage fondamental pour la météorologie du Grand-Duché qui a été complété en 1964 par la publication d'un ouvrage de synthèse sur le temps et le climat du Luxembourg. L'« Annuaire météorologique et hydrologique » édité depuis 1949 par l'Administration des services techniques de l'agriculture reste une intarissable source de données météorologiques. Les publications du STATEC (Service central de la statistique et des études économiques) fournissent également des informations sur le climat.

of the weather station of Luxembourg-Limpertsberg, published the results of one century of meteorological observations made in Luxembourg, a fundamental work for the meteorology of the Grand Duchy which was completed in 1964 by the publication of a comprehensive work on the weather and the climate of Luxembourg. The 'Annuaire météorologique et hydrologique' (Weather and hydrological directory) published since 1949 by the 'Administration des services techniques de l'agriculture' (Administration of the engineering departments of agriculture) remains a precious weather data source. Some of the publications of the STATEC (Service central de la statistique et des études économiques, Central service of statistics and economic surveys) also provide information on the climate.

erten Wetterdienstes. 1950 fasste Professor Eugène Lahr (1897-1981), Beobachter der Wetterstation von Luxemburg-Limpertsberg, die Resultate von 100 Jahren meteorologischen Beobachtungen in Luxemburg in einer für die Meteorologie des Großherzogtums grundlegenden Arbeit zusammen. Sie wurde 1964 durch die Veröffentlichung einer Synthese über das Luxemburger Wetter und Klima ergänzt. Das seit 1949 durch die Verwaltung der technischen Dienste der Landwirtschaft (Administration des services techniques de l'agriculture) herausgegebene Jahrbuch (Annuaire météorologique et hydrologique) stellt eine sehr ergiebige Klima-Datenquelle dar. Die Publikationen des offiziellen statistischen Dienstes STATEC (Service central de la statistique et des études économiques) liefern ebenfalls eine Reihe von Informationen über das Klima des Landes.

Introduction

Dans le troisième tome de son « *Histoire du Duché de Luxembourg et Comté de Chiny* » publié à Luxembourg en 1742, le jésuite Jean Bertholet parle de « pluies presque continuelles » qui à partir de l'an 1030 s'abattirent sur le duché de Luxembourg, la province de Trèves et l'Empire allemand tout entier pendant trois années consécutives et ne permirent pas de labourer ni d'ensemencer les terres. Il s'en suivit une terrible famine: « Lorsque les greniers furent épuisés, les pauvres eurent recours à l'herbe des prairies et aux racines des arbres. Cette nourriture ne suffisant pas, on mangea et on vendit publiquement de la chair humaine. On poussa la fureur plus loin, et les hommes allaient, pour ainsi dire, à la chasse les uns des autres, s'attaquant sur les grands chemins, non pour se voler, mais pour se manger. » (Bertholet 1742: 111)

Est-ce que cette famine a vraiment conduit à ces excès ? Difficile à dire. Mais, en tout cas elle révèle l'importance capitale que des phénomènes météorologiques peuvent jouer dans la vie des gens et d'un pays.

Ainsi, toujours selon Bertholet (tome 8 publié en 1743), le début du 17^e siècle fut marqué au Luxembourg par des « ouragans et des vents si impétueux, que les maisons de la campagne en furent renversées, les tours abattues, les arbres déracinés, et les villages détruits. Outre cela il y eut des pluies si considérables que tous les vallons furent inondés. » (Bertholet 1743: 57)

L'été pluvieux de 1708 fut suivi d'un hiver particulièrement long et rude. Les semis des céréales d'hiver furent détruits par le gel et les céréales de printemps ne purent être semées à temps. Selon certaines sources, la température baissa jusqu'à -30 degrés. De nombreux vignobles furent victimes du froid. Les arbres fruitiers éclatèrent sous l'effet du gel, et dans les forêts indigènes, où il y eut de considérables dégâts, même les gros chênes subirent ce sort. De nombreux moutons moururent de froid; les chroniqueurs racontent - et c'est à peine croyable ! - que des oiseaux seraient tombés du ciel, frappés en plein vol par le gel. L'année 1709 devint une année de grande famine (Schon 1955: 255; Muller 1968: 140, Lascombes 1988: 126s).

Les effets du climat n'ont pas toujours été aussi dramatiques, mais il est évident que le temps et son influence sur les cultures et les conditions de vie a toujours préoccupé nos ancêtres. Leurs observations patiemment accumulées au cours des siècles ont donné lieu à une sorte de météorologie empirique dont les saints de glace sont l'un des exemples les mieux connus. Au nombre de trois, il s'agit au Luxembourg de St Pancrace (12 mai), St Servais (13 mai) et St Boniface (14 mai). Des nombreux dictons météorologiques qui

guidaient l'action de nos ancêtres la majeure partie est passée à l'oubli. Tousch (1985) nous en rappelle les principales. Citons à titre d'exemple:

« *Sonn am Januar, e schlecht Joër* » (Si le soleil brille en janvier, l'année sera mauvaise); à rapprocher du dicton français: « *Quand à Noël, on se chauffe au soleil, le jour de Pâques, on se chauffe à la bûche de Noël* ».

« *Vill Niewel am Hierscht, vill Schnéi am Wanter* » (S'il y a beaucoup de brouillard en automne, il y aura beaucoup de neige en hiver).

Certains dictons sont plutôt goguenards: « *Reent et am Mä, ass den Abrel ferbäi* » (S'il pleut en mai, alors l'avril est passé.) D'autres, par contre, ont une connotation plus dramatique: « *Zënt Jokop bréngt Brout oder Hongersnout* » (St Jacques - 25 juillet - apporte le pain ou la faim). Et des famines directement ou indirectement causées par la météorologie, le Luxembourg en a connu encore au 19^e siècle; celle de 1816 fut atroce; les gens eurent faim en 1831, en 1840, 1842 et 1847. La disette de 1853/1854 fut la dernière de cette espèce (Calmes 1968: 179).

Le début des observations météorologiques scientifiques

Étant donné le rôle prépondérant que le climat jouait dans la vie, voire la survie, des gens, il est évident que les scientifiques se vouèrent à son étude dès lors qu'ils commencèrent à disposer à partir du 17^e siècle des instruments ainsi que des connaissances mathématiques et physiques requises. Les relations entre les lois physiques et les variations atmosphériques furent étudiées par les grands hommes de science de l'époque: Galilée, Kepler, Descartes, Torricelli, Pascal, Bacon, Boyle, Hooke, Mariotte, Newton, Bernoulli et autres Lavoisier. Dès le 18^e siècle des observations météorologiques furent faites au niveau mondial de manière plus ou moins régulière (Kipgen 1983). Et le Luxembourg, bien que peu équipé en hommes et en matériel, tenta de suivre le mouvement, avec retard, mais tout de même !

Le premier à faire des observations météorologiques quotidiennes systématiques au Luxembourg a été Nicolas Bodson (1802-1871). Professeur de mathématiques au collège communal de Bouillon à partir de 1829, il fut nommé professeur de sciences physiques et mathématiques à l'Athénée royal grand-ducal de Luxembourg en 1837. Son installation solennelle qui eut lieu le 21 mars 1837 en présence des autorités et des fonctionnaires publics, fut relatée dans le détail par le « *Journal de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg* »; elle fut marquée par une allocution de Mathieu-Lambert Schrobildgen (1789-1883),

membre du bureau d'administration de l'Athénée, et un discours prononcé à son tour par Bodson (Journal de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg 1837).

Les observations de Bodson s'étaient de l'hiver 1837 jusqu'en 1852. Il en a subsisté un registre commencé le 1^{er} janvier 1838, mais qui n'a donné lieu à aucune publication de la part de son auteur (Lahr 1950). Ni la notice nécrologique rédigée en 1871 par le directeur de l'Athénée Nicolas Gredt, ni la notice biographique publiée par Auguste Neyen ne mentionnent d'ailleurs les travaux météorologiques de Bodson alors qu'ils citent ses publications physiques et mathématiques (Gredt 1871, Neyen 1876).

A partir de 1840, Bodson profitait de la collaboration d'un collègue, le Hollandais Petrus-Johannes-Jacobus van Kerckhoff (1813-1876), qui enseignait la physique et, surtout, la chimie à l'Athénée à partir de novembre 1837 jusqu'à sa démission en février 1848. Il devint ensuite directeur de l'école industrielle de Maastricht, un poste qu'il abandonna lorsqu'en 1851 la chaire de chimie lui fut offerte à l'université de Groningue. En 1868, il devint professeur à l'université



Nicolas Bodson (1802-1871)



Petrus-Johannes-Jacobus van Kerckhoff (1813-1876)

d'Utrecht (Willems 1939, Lahr 1950, Gloden 1954). Parallèles à celles de Bodson, les observations météorologiques que van Kerckhoff fit au Luxembourg avaient probablement démarré en 1840, et cela, à ce qu'il paraît, sur l'initiative du renommé astronome, mathématicien et statisticien belge Adolphe Quetelet (1796-1874), pionnier de la météorologie en Belgique. Malheureusement, il ne reste pas de traces des travaux météorologiques de van Kerckhoff, à l'exception de quelques feuilles volantes avec les moyennes calculées par lui et retrouvées dans le registre météorologique de Bodson (Lahr 1950).

L'oeuvre du professeur François Reuter

Mais, désormais le terrain était bien préparé, et en 1853 François Reuter (1819-1908), professeur de chimie à l'Athénée où il avait succédé à van Kerckhoff, son ancien professeur, reprit le flambeau, sur invitation de ce dernier et de Christophorus Henricus Buys Ballot (1817-1890), professeur de l'université d'Utrecht, qui allait devenir le premier directeur de l'Institut météo-



Christophorus Henricus Buys Ballot (1817-1890)

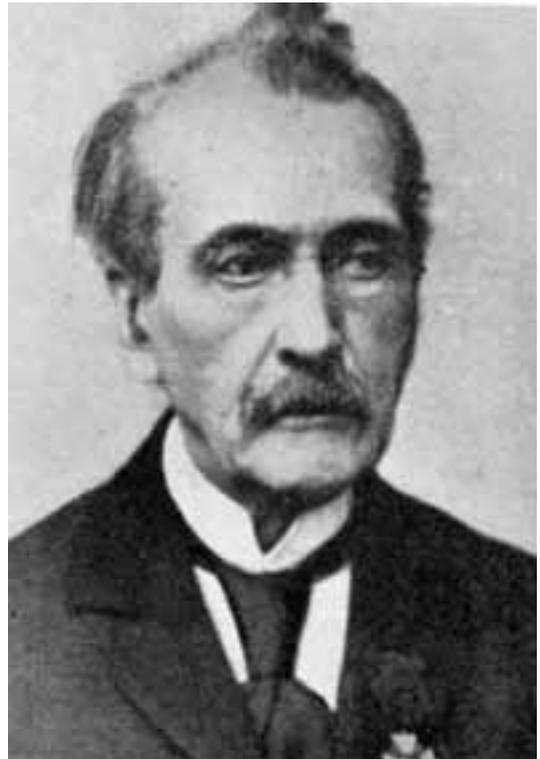
rologique des Pays-Bas fondé en 1854 (Reuter 1887). Buys Ballot poursuivait depuis quelques années le rêve de la création d'un réseau européen de stations météorologiques installées à Utrecht, Paris, Bruxelles, Greenwich, Munich, etc. dans lequel le Luxembourg pourrait donc s'intégrer avantagement.

En 1854 Buys Ballot fut nommé membre honoraire de la « Société des sciences naturelles du Luxembourg ». Reuter fut l'un des membres fondateurs de cette société créée en 1850, et intégrée plus tard en tant que « Section des sciences » à l'Institut grand-ducal au moment de sa création en 1868. Il en a été le secrétaire de 1850 à 1853, et le président de 1870 à 1906.

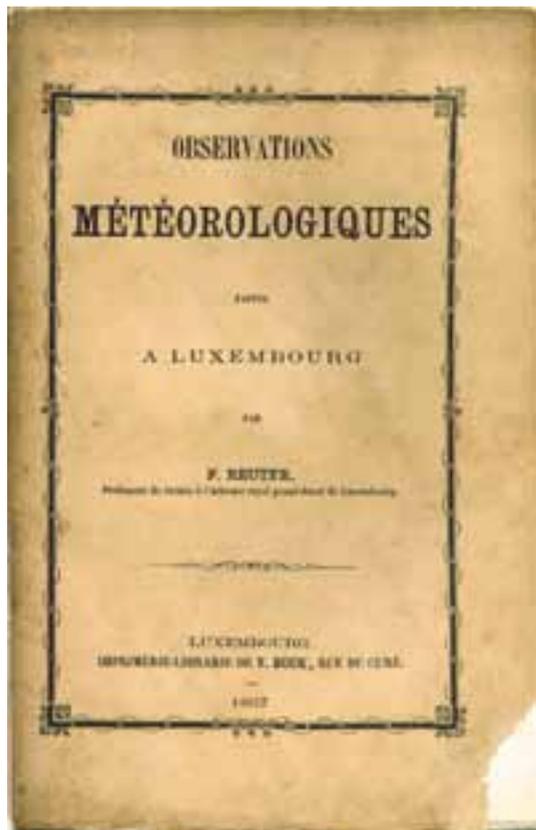
Reuter s'était adonné à la recherche dès 1845, où il se fit remarquer par une note concernant l'« Analyse de l'eau de Mondorf » insérée dans le « Courrier de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg ». En 1848, le « Journal für praktische Chemie » publia un article sur le fulmicoton que Reuter avait rédigé en collaboration avec van Kerckhoff. Dans les multiples articles que Reuter publiait par la suite il aborda généralement des questions de chimie, souvent d'un point de vue inhabituel: analyse d'échantillons de verre provenant du cimetière gallo-romain de Steinfort (1849) et du contenu d'un lacrymatoire découvert entre Bigonville et Wolvelange (1852); composition chimique de certaines roches luxembourgeoises: minerais d'antimoine de Goesdorf (1853), calcaires du

Grand-Duché (1854), minerais de fer d'alluvion (1855), minettes ou minerais de fer en roche (1864, 1867). L'analyse de l'eau de la fontaine de Saint-Pirmin située près de Kaundorf et réputée pour ses qualités guérisseuses, ne révéla aucun composant susceptible de justifier cette réputation du point de vue chimique (1863). Il se préoccupa encore de la composition de l'eau des prisons et de celle de la conduite qui alimentait la ville de Luxembourg (1879) (Willems 1939, Massard 1989).

La pièce maîtresse de son oeuvre scientifique restent ses « *Observations météorologiques* » publiées par la Société des sciences naturelles comme mémoires hors série. Le premier volume fut publié en 1867; les observations y consignées commencent le 1er janvier 1854 et finissent le 31 décembre 1863. Pendant ces douze ans, Reuter a observé, « trois fois par jour, la hauteur barométrique, la direction du vent, la température et l'état du ciel, et une fois par jour, la quantité d'eau tombée, par mètre carré » (Reuter 1869). D'autres volumes suivirent: deuxième volume en 1874 (années 1864 à 1873), troisième volume en 1887 (années 1874 à 1883), quatrième volume en 1887 (moyennes de 1854 à 1883), cinquième volume en 1890 (années 1884 à 1888, moyennes de 1884 à 1888 et de 1854 à 1888) (Reuter 1867, 1874, 1887, Reuter-Chomé 1887, 1890).



François Reuter (1819-1908)



Premier volume des « Observations météorologiques » de F. Reuter (1867)

En 1867, le directeur-général des finances avait engagé F. Reuter à faire chaque année un résumé de ses observations, d'où une première notice (années 1866 et 1867) insérée dans le bulletin de l'année 1868 de la Société des sciences naturelles (Reuter 1869), suivie par d'autres se rapportant aux années 1867 et 1868 (Reuter 1870a), 1869 (Reuter 1870b), 1870 (Reuter 1872), 1871 (Reuter 1873). Trop occupé sans doute par la rédaction des volumes successifs de ses « Observations » et redoutant peut-être le double emploi Reuter, qui ajoutait désormais le nom de famille de sa femme au sien, ne reprit ces résumés qu'après une interruption d'une vingtaine d'années: année 1893 (Reuter-Chomé 1894) et année 1894 (Reuter-Chomé 1896).

Jusqu'en 1880, Reuter transmettait régulièrement ses observations à Buys Ballot. Elles étaient intégrées dans les « *Meteorologische Waarnemingen in Nederland* », une publication périodique parue sous ce titre de 1852/53 à 1864 dont le successeur fut le « *Nederlands Meteorologisch Jaarboek* ».

La somme des observations accumulées par Reuter fut énorme. Pour bien mesurer son mérite, il faut savoir qu'il travaillait dans des conditions difficilement imaginables. Ses appareils étaient empruntés ou fabriqués par lui-même. Son baromètre avait été payé par l'observatoire de Groningue, ses thermomètres étaient ceux du cabinet de physique de l'Athénée, son hygromètre, il l'avait payé de ses deniers; son pluviomètre, il l'avait bricolé lui-même. Afin de disposer enfin d'un équipement adapté, Reuter avait sollicité en 1876 de la part de la chambre des députés un crédit pour l'établissement d'une station météorologique digne de ce nom. Bien qu'appuyée par le directeur général (c.-à-d. ministre) des travaux publics, sa demande fut rejetée par la chambre des députés (Lahr 1950: 7s). Mais Reuter ne se laissa pas décourager, comme ses publications ultérieures l'attestent. Les observations qu'il fit pendant la période de janvier 1889 à novembre 1894 n'ont été publiées qu'en 1917 (Reuter & Soisson 1917). Remarquons que Ed. Worré a traduit en diagrammes les observations météorologiques faites par Reuter pendant la période 1854-1873 (E. Worré 1881).

A côté du travail monumental de Reuter, il convient de noter les quelques notices publiées dans les bulletins de la Société des sciences et de la Section des sciences au cours du 19^e siècle. Ainsi, F.C.



Jean-Pierre Glaesener (1831-1901)

Hartmann (1812-1879), capitaine du contingent fédéral luxembourgeois à Echternach, relata ses observations faites lors d'un orage avec coup de foudre à Echternach en août 1856 (Hartmann 1857). Le commissaire de district à Luxembourg et ancien garde général des eaux et forêts Alphonse de la Fontaine (1825-1896) étudia en détail les effets des grands froids de l'hiver 1879/1880 sur les végétaux et les animaux, alors que l'ingénieur des travaux publics Jean Worré (1817-1901) se pencha sur d'autres effets de cet hiver particulièrement froid (sol gelé jusqu'à 1,45 m de profondeur en février 1880, arbres routiers gelés, etc.) (de la Fontaine 1881, M.J. Worré 1881). La liste complète de ces notices se trouve dans la bibliographie établie par Willems (1950). Ne passons pas sous silence non plus la vingtaine de pages que le docteur Jean-Pierre Glaesener (1831-1901), médecin à Diekirch, a consacrées à la météorologie et la climatologie du Grand-Duché dans son livre « *Le Grand-Duché de Luxembourg historique et pittoresque* » (Glaesener 1885).

Le premier service météorologique officiel

Le flambeau si longtemps porté par Reuter fut repris pour un moment, par piété, mais sans trop d'enthousiasme, par son successeur à la chaire de chimie à l'Athénée, le professeur Émile d'Huart (1861-1918) qui finit par se consacrer exclusivement à ses travaux de chimie. Il n'en restait pas moins que le besoin de la création d'un véritable service météorologique persistait, et en 1905 la section des sciences de l'Institut grand-ducal institua même une commission chargée d'étudier l'organisation d'un tel service qui fut d'ailleurs créé en 1907 et rattaché à l'administration des services agricoles (Lahr 1950).

Le but de ce service était de fournir aux cultivateurs un bulletin quotidien de prévision du temps pouvant servir de guide dans les travaux agricoles (Soisson 1917).

De 1907 à 1926, l'employé des services agricoles Nicolas Welfring (1887-1945) dirigeait ce service dont la première station météorologique complète était installée à Limpertsberg (Luxembourg-Ville), avenue Pasteur, dans le jardin attenant la maison d'habitation du préposé.

En 1912, le professeur de sciences naturelles Joseph Robert (1880-1918) avait pris l'initiative d'installer une station météorologique à Diekirch. Jour par jour, il communiquait ses observations à ses élèves en les affichant dans l'auditoire de biologie, en plus il publiait dans le journal local « *Der Landwirt* » des relevés hebdomadaires, des comptes rendus mensuels et annuels ainsi que les tableaux des mesures du débit de la Sûre au pont de Gilsdorf. Son décès, à l'âge de 38 ans, mit une



Joseph Robert (1880-1918)

fin brutale à cette activité (Klein 1918, Lahr 1950).

En 1917, le professeur de physique Guillaume Soisson (1866-1938) publia les moyennes météorologiques de la station de Luxembourg dans son ouvrage consacré aux observations de Fr. Reuter (Reuter & Soisson 1917). Soisson a d'ailleurs été directeur général des travaux publics et de l'agriculture en 1915/16 et de 1923 à 1925, avec l'industrie comme ressort supplémentaire (Lang 1967, Anonyme 1938). Soisson avait installé en 1916 une station météorologique privée dans le cabinet de physique du Lycée de Garçons de Luxembourg avec tous les instruments d'une station de second ordre. Les observations étaient faites par son appareil Grégoire Gillen qui, plus tard, allait être promu préposé du service météorologique de l'aéroport de Luxembourg. Ces observations n'ont pas été publiées, pis que cela, elles ont disparu lors de l'occupation allemande 1940-1944 (Lahr 1950: 14s).

Vers 1917, le service météorologique officiel de Luxembourg se présentait de la manière suivante (Reuter & Soisson 1917): Il était en correspondance avec l'observatoire d'Aix-la-Chapelle. Les observations comportaient la détermination de la pression barométrique, de la température, de l'état hygrométrique de l'air, de la quantité d'eau tombée, de la direction du vent, etc. Il existait deux stations

de premier ordre, Luxembourg et Wiltz, et deux stations de second ordre, Clémency et Berdorf, en outre une vingtaine de stations pluviométriques distribuées sur l'ensemble du pays. Les éléments des observations étaient transmis chaque jour du 1^{er} mai au 1^{er} novembre vers 8.00 heures du matin par voie télégraphique à l'observatoire d'Aix-la-Chapelle, Vers 11.00 heures du matin un bulletin de prévision était expédié à Aix-la-Chapelle et distribué par la poste centrale de Luxembourg aux cabines téléphoniques publiques ainsi qu'aux principales administrations locales du pays. Ce bulletin était en plus publié par la presse.

D'un autre côté, la carte météorologique rédigée à Aix-la-Chapelle était distribuée chaque jour dans la matinée par la poste aux communes et aux abonnés. Les personnes initiées à la lecture de la carte pouvaient ainsi en déduire des conclusions pratiques sur les variations du temps pendant les jours à venir.

Attaché en 1923 au service de vérification des poids et mesures, Welfring éprouvait des difficultés à assurer ses charges de météorologue. En 1926, il fut remplacé dans ce domaine par un autre employé des services agricoles, Aloyse Grégoire, né à Vichten en 1877. Il s'en suivit le déplacement de la station vers Strassen.



Guillaume Soisson (1866-1938)



Nicolas Welfring (1887-1945)

Le développement du service météorologique connut certains revers. En 1922 déjà, la suppression des crédits budgétaires afférents avait entraîné la suspension des stations pluviométriques, et il fallait attendre 1938 pour voir leur réinstallation sous l'impulsion du professeur Albert Gloden (1901-1966), auteur de la première carte pluviométrique du Luxembourg éditée par l'imprimerie E. Huss à Luxembourg. Il la présenta à ses collègues de la Société des Naturalistes en novembre 1936 et l'expliqua par la suite dans divers articles (Heuertz 1936, Gloden 1937, 1947).

L'occupation allemande mit fin à l'autonomie du service. A partir du 1^{er} avril 1941 le réseau des stations du Grand-Duché de Luxembourg était pris en charge par le « Reichsamt für Wetterdienst » à Berlin auquel il fallait remettre tout le matériel d'observation et l'ensemble des archives.

A la fin de la guerre, le réseau météorologique était en ruines, à l'exception de la station de Strassen qui fonctionnait encore. Par arrêté grand-ducal du 6 octobre 1945, le service agricole fut réorganisé. Le réseau météorologique sinistré fut reconstitué grâce aux efforts du nouveau directeur de l'administration des services agricoles, Mathias Gillen, et du nouveau chef de la section météorologique et hydrographique, Jean-Pierre Engels.



Albert Gloden (1901-1966) (Source: P. Diederich, Athenäum, 1932-1946. Luxembourg 2001)

A côté du réseau météorologique il ne manquait plus qu'un réseau limnimétrique. Un premier limnomètre avait été installé au Luxembourg à Goebelsmuhle par les Allemands, et il fallait attendre 1972 pour voir l'installation d'une seconde station, à Esch-sur-Alzette, lors du redressement de l'Alzette (Kipgen 1983).

La création du service météorologique de l'aéroport

En 1946, au moment où l'aéroport de Luxembourg fut installé au « Findel » (commune de Sandweiler), le ministre des transports de l'époque décida la création immédiate d'un service météorologique rattaché à l'aéroport. Grégoire Gillen, l'appareilleur du Lycée de garçons de Luxembourg mentionné plus haut et qui avait eu comme première mission de s'occuper de l'organisation de l'aéroport, devint chef du service météorologique qui comportait trois observateurs placés sous son autorité: Michel Zeyen, Erny Kayser et Albert Probst auxquels allait se joindre vers la fin de l'année un quatrième observateur, à savoir Henri Becker. La première observation (très rudimentaire) fut faite le 18 octobre 1946. L'histoire de ce service est racontée en détail par Neu (1996).



Grégoire Gillen, premier chef du service météorologique de l'aéroport, en 1948, entouré par deux des observateurs du service, Albert Probst (à droite) et Arthur Morn (à gauche). (Source: Neu 1996)

Cet ouvrage contient en plus quelques pages avec des données du Grand-Duché de 1946 à 1995.

L'œuvre du professeur Eugène Lahr

En 1950, le professeur Eugène Lahr (1897-1981) publia son ouvrage « *Un siècle d'observations météorologiques appliquées à l'étude du climat luxembourgeois* » préfacé par Mathias Gillen, directeur de l'administration des services agricoles de 1945 à 1952, qui releva que Lahr collaborait depuis de longues années avec l'administration des services agricoles en sa qualité d'observateur de la station météorologique de premier ordre de Limpertsberg. Cet ouvrage est le fruit d'un travail de très longue haleine rassemblant et analysant l'ensemble des données météorologiques recueillies au Luxembourg à partir de 1838, complétées par des données phénologiques, une chronique viticole débutant en l'an 1626 et une chronique, année par année, du temps observé au Luxembourg au cours du 19^e siècle, de l'an 1838 à l'an 1900. Les particularités du climat luxembourgeois sont documentées par de nombreuses cartes (cartes des isobares, des isothermes, des isoplèthes de l'humidité relative, des isohygres, des isohyètes). Le livre comporte encore un historique détaillé auquel le présent texte est largement redevable, ainsi qu'un index bibliographique étoffé par des données biographiques.

En 1964, Lahr paracheva son oeuvre par la publication de l'ouvrage « *Temps et climat au Grand-Duché de Luxembourg* » édité par le Ministère de l'agriculture, l'Administration des services agricoles et le Service météorologique et hydro-



Eugène Lahr (1897-1981) (au milieu) avec Alphonse Arend (à droite) et J. Schaack (à gauche). Détail d'une photo des professeurs de l'Athénée 1953-54. (Source: L'Athénée et ses grands anciens, vol. 2, 2003)

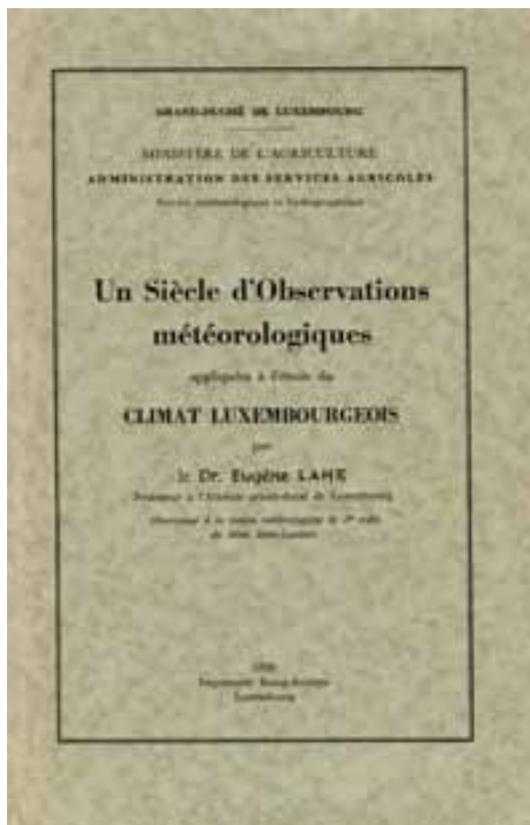
graphique. La préface est due à Camille Hansen, directeur de l'administration des services agricoles de 1952 à 1977. Selon la formulation de l'auteur lui-même, ce livre « réalise la synthèse de toutes les observations de 1838 à 1960 et cherche à mettre au point les conditions dans lesquelles évolue le temps moyen du pays ».

Eugène Lahr était né à Haut-Bellain le 21 avril 1897. Docteur en sciences naturelles, il fut nommé professeur de chimie à l'Athénée, après avoir enseigné cette branche au Lycée de jeunes filles d'Esch-sur-Alzette de 1926 à 1937. Membre de la Société des naturalistes luxembourgeois à partir de 1917, il en a été le secrétaire de 1938 à 1946. Il fut admis comme membre de la section des sciences de l'Institut grand-ducal en 1946. Lahr était observateur-météorologiste de la station de Luxembourg-Ville (Mont Saint-Lambert, c.-à-d. quartier de Limpertsberg) à partir du 1^{er} juin 1946. Démission honorable de ses fonctions de professeur à l'Athénée de Luxembourg lui fut accordée par l'arrêté grand-ducal du 22 septembre 1958, avec mise à la retraite à partir du 1^{er} octobre 1958. Lahr est mort le 31 mai 1981. A côté des deux ouvrages cités, Lahr a rédigé des contributions au bulletin du STATEC et au bulletin de la Société des Naturalistes ainsi que divers articles biographiques et autres (Ministère de l'Éducation nationale 1959: 11, Massard 1990, Lahr 1964).

En 1939, Lahr se préoccupait de l'orage bien particulier qui commençait à menacer le Luxembourg

en dépit de son statut de pays neutre, d'où deux ouvrages relevant des problèmes de la défense aérienne: le premier sur la formation des équipes de défense aérienne (*Ausbildung der Luftschutz-Mannschaften*. Luxembourg-Stadt: Luftschutzdienst, 1939, 28 p.), le second sur les gaz toxiques (*Giftgase und ihre Abwehr: Eigenschaften, Erkennung und Vernichtung der Kriegsgifte: praktischer Leitfaden für alle Freunde des Luftschutzdienstes / hrsg. im Auftrage des Obersten Rates für passiven Luftschutz von Eugen Lahr*. - Luxembourg: Ch & A Munshausen, 1939, 76 p.).

En 1933, Lahr avait contribué au Programme publié à la clôture de l'année scolaire 1932-1933 des Lycées grand-ducaux de jeunes filles de Luxembourg et d'Esch-sur-Alzette par une dissertation de 96 pages sur la structure de la matière, les atomes et les transmutations des atomes intitulée « *Der Stein der Weisen. Atombau und Atomzertrümmerung.* » (Willems 1939).



« Un siècle d'observations météorologiques appliquées à l'étude du climat luxembourgeois ». Luxembourg, 1950.

Vers des horizons nouveaux

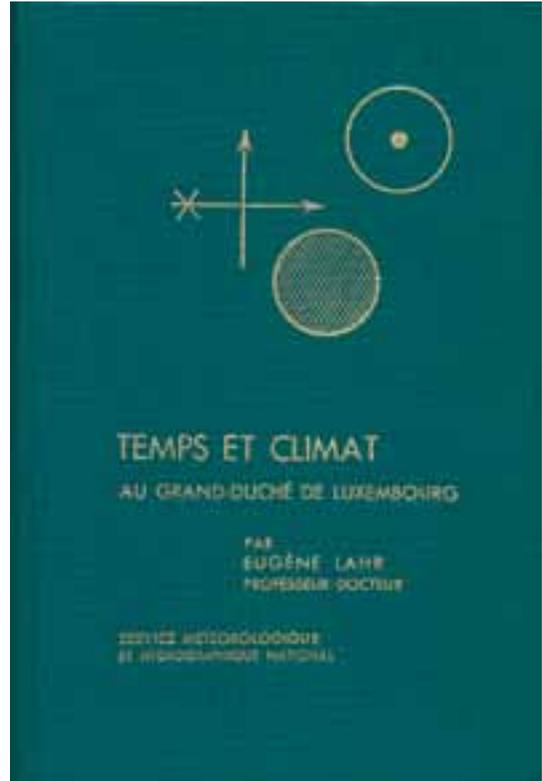
Un relevé chronologique établi par Alex Storoni (1988) dresse une liste (incomplète) des publications parues dans le domaine de la climatologie entre 1933 et 1984. En 1971, l'ingénieur des eaux et forêts Robert Faber, décédé dans sa soixante-dixième année en 1990, a édité un ouvrage sur la climatologie du Grand-Duché de Luxembourg avec de nombreuses cartes (Faber 1971). Dix ans plus tard, l'Administration des services techniques de l'agriculture a sorti de nouvelles cartes climatologiques (Boon 1981). En 1992, le professeur de géographie Paul Lafontaine a étudié les variations climatiques d'après les séries météorologiques de Luxembourg de 1838 à 1990 (Lafontaine 1992).

Les articles d'ordre météorologique insérés dans le bulletin de la Société des Naturalistes luxembourgeois ont été répertoriés par Massard & Geimer (1990).

Relevons encore que l'« *Annuaire météorologique et hydrologique* » que l'Administration des services techniques de l'agriculture édite depuis 1949 reste une intarissable source de données météorologiques et que les bulletins, les indicateurs rapides et l'annuaire du STATEC fournissent eux aussi des données météorologiques. Notons enfin que la problématique liée aux inondations que le pays a connues dans la dernière décennie a suscité des études hydrologiques et climatiques de nos bassins versants dont notamment celui de l'Alzette (Pfister *et al.* 2000, Pfister & Hoffmann 2002), un domaine déjà abordé en 1982 par Monique Kremer dans son mémoire scientifique d'aspirant-professeur (Kremer 1982).

Bibliographie

- Anonyme 1938. - Ehrenprofessor Wilhelm Soisson †. Luxemburger Wort 1938, Nr. 241 (29. Aug.): 4.
- Bertholet, J. 1742. - Histoire ecclésiastique et civile du Duché de Luxembourg et Comté de Chiny, tome 3. Luxembourg, A. Chevalier, LIII-(3)-432-LXXII p. édition anastatique parue sous le titre: Histoire du Duché de Luxembourg et Comté de Chiny, tome 3, Éditions du Musée en Piconrue, Bastogne 1997).
- Bertholet, J. 1743. - Histoire ecclésiastique et civile du Duché de Luxembourg et Comté de Chiny, tome 8. Luxembourg, A. Chevalier, (3)-197-CC-100 p. (édition anastatique parue sous le titre: Histoire du Duché de Luxembourg et Comté de Chiny, tome 8, Éditions du Musée en Piconrue, Bastogne 1997).
- Boon, W. 1981. - Cinquante nouvelles cartes climatologiques du Grand-Duché de Luxembourg publiées par le Service de météorologie et de



« Temps et climat au Grand-Duché de Luxembourg ». Luxembourg, 1964.

- l'hydrologie. Luxembourg, Ministère de l'agriculture. Administration des services techniques de l'agriculture, Service de la météorologie et de l'hydrologie, 52 p., cartes.
- Calmes, A. 1968. - Au fil de l'histoire. Vol. 1. Luxembourg, Impr. Saint-Paul, 286 p.
- de la Fontaine, A. 1881. - Effets des grands froids de l'hiver 1879-1880, en particulier sur les règnes végétal et animal avec un état statistique à l'appui. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 18 (1881): 63-117.
- Faber, R. 1971. - Climatologie du Grand-Duché de Luxembourg. Publication du Musée d'Histoire Naturelle et de la Société des Naturalistes Luxembourgeois. Luxembourg, 1971, 48 p.
- Glaesener, J.P. 1885. - Le Grand-Duché de Luxembourg historique et pittoresque. Diekirch, Justin Schroell, 399 p.

- Gloden, A. 1937. - Les précipitations au Grand-Duché de Luxembourg avec une carte pluviométrique. Tiré à part: Bulletin trimestriel, No 17, Office de Statistique du Grand-Duché de Luxembourg, mai 1937, 5 p.
- Gloden, A. 1947. - Variabilité de la cote pluviométrique mensuelle pour Luxembourg et Strassen. Bulletin de la Société des Naturalistes luxembourgeois, 52 (1947): 47-51, 3 tab.
- Gloden, A. 1954. - Un éminent professeur de chimie de l'Athénée de Luxembourg: le Hollandais Petrus-Johannes-Jacobus van Kerckhoff, 1813-1876. Biogr. natn. Luxemb., fasc. 6: 347-353.
- Gredt, N. 1871. - Schulnachrichten. Athénée Roy. G.-D. de Luxembourg, Programme 1870-1871: 30-41 [Nécrologie N. Bodson: 31-32].
- Hartmann, F.K. 1857. - Beobachtungen bei dem Entstehen eines Gewitters und über den daraus erfolgten Blitzschlag zu Echternach am 15. August 1856. Bull. Soc. Sci. nat. G.-D. Luxemb., 4, 1857: 66-76
- Heuertz, F. 1936. - Séances hebdomadaires: Lundi, 23.11.1936. Bull. Soc. Nat. luxemb., 46 (1936): 195-196.
- Journal de la Ville et du Grand-Duché de Luxembourg 1837, No 23: 2, No 24: 1-3.
- Kipgen, R. 1983. - La météorologie à travers l'histoire, in V. Fischbach (dir.): Administration des services techniques de l'agriculture, 1883-1983: 198-203.
- Klein, E.J. 1918. - Joseph Robert †, 1880-1918. Ein freundschaftliches Gedenkblatt. Bull. Soc. Nat. luxemb., 12 (1918): 117-132.
- Kremer, M. 1982. - Niederschlag, Abfluß und Verdunstung in den Flußgebieten Luxemburgs. Luxembourg, mémoire scientifique d'aspirant-professeur, 111 p.
- Lafontaine, P. 1992. - Variations climatiques d'après les séries météorologiques de Luxembourg (1838-1990), in Reflets du Lycée Hubert Clement. Esch-sur-Alzette: 193-199.
- Lahr, E. 1950. - Un siècle d'observations météorologiques appliquées à l'étude du climat du Grand-Duché de Luxembourg. Administration des Services agricoles, Luxembourg, Imprimerie Bourg-Bourger, 287 p.
- Lahr, E. 1964. - Temps et climat au Grand-Duché de Luxembourg. Luxembourg, Imprimerie Bourg-Bourger, 289 p.
- Lang, C. 1967. - Le personnel de l'enseignement secondaire et supérieur du Grand-Duché de Luxembourg, 1839-1922. Travail statistique de Félix Heuertz (1922), complété par Charles Lang (1967). Publs Minist. Educ. natn Luxemb.: 1-125.
- Lascombes, F. 1888. - Chronik der Stadt Luxemburg: 1684-1795. Luxembourg, Eigenverlag des Autors, 576 p.
- Massard, J.A. 1989. - La vie scientifique, in M. Gerges (éd.): Mémorial 1989: la Société luxembourgeoise de 1839 à 1989. Luxembourg, Les Publications Mosellanes: 408-440.
- Massard, J.A. 1990. - La Société des Naturalistes Luxembourgeois du point de vue historique. Bull. Soc. Nat. luxemb., 91 (1990): 5-214.
- Massard, J.A. & Geimer G. 1990. - Table générale des publications de la Société de Botanique du Grand-Duché de Luxembourg (1874-1905) et de la Société des Naturalistes Luxembourgeois (1891-1989), avec index analytique des matières. Bull. Soc. Nat. luxemb., 91 (1990): 215-455.
- Ministère de l'Éducation nationale 1959. - Chroniques des établissements d'enseignement secondaire et normal 1958-1959. Luxembourg, Impr. Saint-Paul, 259 p.
- Muller, P.J. 1968. - Tatsachen aus der Geschichte des Luxemburger Landes. Luxembourg, Vlg. «De Frendeskres» u. Impr. Bourg-Bourger, 574 p.
- Neu, F. 1996. - L'aéroport de Luxembourg, le Service météorologique: 50 années d'histoire commune, 1946-1996. Luxembourg, Service météorologique Luxembourg, 149 p.
- Neyen, A. 1876. - Biographie Luxembourgeoise. Histoire des hommes distingués originaires de ce pays considéré à l'époque de sa plus grande étendue ou qui se sont rendus remarquables pendant le séjour qu'ils y ont fait. Tome 3. Luxembourg, J. Joris, 490+XXXI+XII p. + table gén. alphabét.
- Pfister, L. & Hoffmann L. (eds) 2002. - Experimental hydroclimatological atlas of the Alzette River Basin - Grand Duchy of Luxembourg. Luxembourg: Centre de recherche public Gabriel Lippmann, 61 f.: tabl., cartes.
- Pfister, L., Iffly J.F., El Idrissi A. & Hoffmann L. 2000. - Vérification de l'homogénéité physiogéographique, hydrologique et climatique du bassin de l'Alzette (Grand-Duché de Luxembourg) en vue d'opérations de régionalisation. Archs Inst. g.-d. Luxemb. Sect. Sci. nat. phys. math., NS 43: 239-253.
- Reuter, F. 1867. - Observations météorologiques faites à Luxembourg [de 1854-1863]. - Luxembourg, V. Bück, 2p.+124 p.
- Reuter, F. 1869. - Résumé des observations météorologiques faites à Luxembourg [années 1866-1867]. Publications de la Société des sciences naturelles G-D Luxembourg, 10 (1867-1868): 255-265.

- Reuter, F. 1870a. - Résumé des observations météorologiques faites à Luxembourg [années 1867-1868]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 11 (1869-1870): 110-119.
- Reuter, F. 1870b. - Résumé des observations météorologiques faites à Luxembourg [année 1869]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 11 (1869-1870): 120-128.
- Reuter, F. 1872. - Résumé des observations météorologiques faites à Luxembourg [année 1870]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 12 (1872): 119-128.
- Reuter, F. 1873. - Résumé des observations météorologiques faites à Luxembourg [année 1871]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 13 (1873): 360-379.
- Reuter, F. 1874. - Observations météorologiques faites à Luxembourg [de 1864-1873]. Deuxième volume. Luxembourg, V. Bück, 2p+135p+1p.
- Reuter, F. 1887. - Observations météorologiques faites à Luxembourg [1874-1883]. Troisième volume. Luxembourg, V. Bück, 2p.+120 p.
- Reuter, F. & Soisson G. 1917. - Observations météorologiques faites à Luxembourg par F. Reuter dont les années 1889-1895 ont été mises en ordre par G. Soisson, suivies des moyennes météorologiques de la station de Luxembourg pour les années 1908-1915. Luxembourg, V. Bück, 96 p.
- Reuter-Chomé, F. 1887. - Observations météorologiques faites à Luxembourg. Moyennes de la période de 1854-1883. Quatrième volume. Luxembourg, V. Bück, 2p.+120 p.
- Reuter-Chomé, F. 1890. - Observations météorologiques faites à Luxembourg de 1884-1888. Moyennes de 1884-1888 et de 1854-1888. Cinquième volume. Luxembourg, V. Bück, 1p+50p+59p.
- Reuter-Chomé, F. 1894. - L'année 1893 [Observations météorologiques]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 23 (1894): 1-28.
- Reuter-Chomé, F. 1896. - L'année 1894 [Observations météorologiques]. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 24 (1896): 1-27.
- Schon, A. 1955. - Zeittafel zur Geschichte der Luxemburger Pfarreien von 1500-1800. Heft 2. Esch/Alzette: 129-256.
- Storoni, A. 1988. - Éléments d'une bibliographie de géographie du Luxembourg. 3. Climatologie. Galerie 6 (1): 135-138.
- Tousch, P. 1985. - Von Bräuchen, Sitten und Aberglauben: Ein Luxemburger Lexikon. Luxembourg, RTL Edition, 344 p.
- Willems, A. 1939. - Chimie et professeurs de chimie de 1839-1939, in Un siècle de vie intellectuelle 1839-1939. Ed. Journal des Professeurs, Eich, Impr. Kasel: 301-328.
- Willems, A. 1950. - Vie et activité de la Section des Sciences Naturelles, Physiques et Mathématiques de l'Institut Grand-Ducal de Luxembourg de 1850-1950. Archs Inst. g.-d. Luxemb., Sect. Sci. nat. phys. math, N.S., 19: 9-27.
- Worré, E. 1881. - Diagrammes des observations météorologiques faites à Luxembourg par F. Reuter, professeur de chimie, pendant la période 1854-1873. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 18 (1881): annexes [2 cartes: hauteurs moyennes annuelles du baromètre, du thermomètre, de l'eau tombée; hauteurs moyennes par mois du baromètre, hauteurs moyennes par mois de l'eau de pluie].
- Worré, M.J. 1881. - Notice sur quelques effets du grand froid qui régnait pendant l'hiver 1879-1880. Publications de l'Institut grand-ducal de Luxembourg, Section des sciences naturelles et mathématiques, 18 (1881): 56-62.

Les archives climatiques quantitatives de Luxembourg-ville: analyse primaire des longues séries chronologiques (1838-2003)

Gilles Drogue, Lucien Hoffmann, Laurent Pfister

CREBS-Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann,
162a, Avenue de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg,
Grand-Duché de Luxembourg.

Auteur correspondant:
e-mail: drogue@crppl.lu
tél: (352) 47 02 61 404
fax: (352) 47 02 61 449

Résumé

Les observations météorologiques instrumentales ont débuté au Luxembourg au cours de la première moitié du 19^{ème} siècle. A la faveur de mesures répétitives et peu à peu normalisées, les archives climatologiques luxembourgeoises se sont étoffées au fil du temps et permettent aujourd'hui de retracer l'évolution des principaux paramètres météorologiques depuis plus de 150 ans. Les données brutes contenues dans ces archives climatiques demandent néanmoins un travail d'homogénéisation destiné à soustraire, autant que possible,

l'effet des vicissitudes des conditions de mesure sur les observations météorologiques. L'objet de cet article est donc d'appliquer une méthodologie d'homogénéisation permettant de contrôler les longues séries chronologiques de précipitations, de température de l'air et de durée d'insolation enregistrées à la « station climatologique de Luxembourg-ville » pour *in fine*, garantir leur « exploitabilité » et entreprendre des analyses sur la variabilité climatique multi-décennale au Luxembourg.

Abstract

Instrumental meteorological observations were initiated in the Grand-Duchy of Luxembourg since the early 19th century. Systematic and progressive standard meteorological measurements allowed building up climatological archives, which provide today a historical perspective of the main meteorological parameters over more than 150 years. Nevertheless, it is absolutely necessary that raw data contained in these climatological archives

be subject to a homogenization procedure in order to remove any instrumental artefacts on the meteorological observations. The aim of this paper is therefore to apply a homogenization methodology for controlling the reliability of long-term rainfall, air temperature and sunshine duration series recorded in Luxembourg-city in order to be able to perform multi-decadal climatic variability analyses in the Grand-Duchy of Luxembourg.

Zusammenfassung

Meteorologische Messungen werden in Luxemburg seit Anfang des 19. Jahrhunderts durchgeführt. Durch die zunehmende Verbreitung anerkannter Messmethoden konnte das luxemburgische Klimadatenarchiv im Laufe der Zeit vergrößert werden und erlaubt heute die Analyse der Veränderungen der wichtigsten meteorologischen Parameter seit mehr als 150 Jahren. Die klimatologischen Rohdaten erfordern nicht desto weniger eine Homogenisierung um die durch die Messgeräte

bedingten fehlerhaften Daten zu entfernen. Das Ziel dieser Studie ist die Anwendung einer Methode zur Homogenisierung der verfügbaren Datenreihen um die Auswertung langfristiger chronologischer Datenreihen der Niederschlagsmengen, der Lufttemperaturen und der Sonnenscheindauern, gemessen an der Klimastation Luxemburg-Stadt, zu ermöglichen, um eine Studie des Klimawandels in Luxemburg zu unternehmen.

1. Introduction: de l'importance des observations climatologiques au long cours

Étés caniculaires...récession des langues glaciaires... fonte des inlandsis polaires...pluies diluviennes... passage de l'ouragan Lothar sur l'Europe du Nord-Ouest... Autant de phénomènes climatiques « anormaux » ou paroxystiques qui défrayent régulièrement la chronique et déclenchent une vague médiatique s'interrogeant sur le dérèglement de la machine climatique. Depuis quelques années, l'occurrence fréquente d'événements météorologiques extrêmes, doublée du réchauffement climatique planétaire, incitent la communauté scientifique à se pencher sur l'existence d'un changement climatique global, et à ses conséquences potentielles pour les sociétés actuelles et les générations futures, exposées à une vulnérabilité croissante face aux aléas climatiques. Exemple d'une mobilisation internationale d'experts scientifiques sur ce sujet, le troisième rapport d'avancement du GIEC (Groupement d'Experts Intergouvernemental d'Etude sur le Climat ou IPCC en anglais) dresse un panorama général du changement climatique contemporain à l'échelle planétaire (GIEC 2001). Deux questions occupent une place centrale au sein du débat sur l'évolution climatique récente:

- S'agit-il d'un réel changement, marqué par une rupture avec les régimes climatiques pré-industriels que nous avons connus jusqu'ici et de surcroît irréversible ou plutôt d'un cycle ou d'une crise climatique, pour reprendre l'expression de Pierre Rognon parlant du climat sahélien (in Kandel 1998), ponctuelle et réversible, déjà expérimentée au cours de l'histoire de la machine climatique ?
- Quels sont les mécanismes explicatifs de cette évolution climatique et quelle est la part de responsabilité de l'homme, par ses activités, dans les changements observés ?

Pour apporter des éléments de réponse à cette double problématique, il est primordial d'analyser les régularités et la variabilité naturelle du climat à l'échelle des temps longs, pour en comprendre la dynamique et le fonctionnement global et régional, hors de toute interférence anthropogénique. Pour documenter l'histoire du climat et pallier l'absence d'observation directe des variables climatiques en une région donnée, les paléoclimatologues ont recours aux données biophysiques multi-proxy (cernes des arbres, carottes glaciaires, varves lacustres, etc.) qui permettent indirectement, après une phase de calibration sur une période où mesures climatiques et proxy son conjointement disponibles, de reconstituer les fluctuations saisonnières de température ou de précipitation sur plusieurs siècles (e.g. Mann *et al.* 1998; Luterbacher *et al.* 2003; Shabalova & Van Engelen 2003). Les historiens du climat utilisent les rendements

agricoles, la date des vendanges ou encore les crises de subsistance pour estimer les variations de température ou de précipitations et plus globalement, la variabilité climatique pluri-séculaire (e.g. Souriau & Yiou 2001; Nordli *et al.* 2003). Une synthèse magistrale, illustrant l'exploitation des sources documentaires pour reconstituer l'histoire du climat en Europe du XIII^e au XVIII^e siècle, vient d'ailleurs de paraître sous la plume de Le Roy Ladurie (Le Roy Ladurie 2004). Même si l'éveil d'une conscience météorologique remonte sans doute à des temps immémoriaux, les conceptions aristotéliennes (384-322 av. J.-C.) posent les premières bases de l'instrumentation météorologique (Middleton 1969). Mais il faut attendre l'avènement de la météorologie moderne au XVII^e siècle avec l'invention du baromètre, du thermomètre et de l'hygromètre (Javelle *et al.* 2000) pour que l'observation météorologique devienne réellement systématique et quantitative. La mesure des principaux paramètres météorologiques ne se normalise que tardivement dans la plupart des pays occidentaux au cours de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle. La longueur réduite des séries chronologiques impose donc au climatologue un recul tenu pour considérer une manifestation climatique actuelle comme étant hors-norme d'un point de vue statistique voire sans précédent. En Europe de l'Ouest, il existe néanmoins de longues séries de température dont les 7 plus longues ont été recensées récemment dans une publication de la revue *Climatic Change* (Camuffo & Jones 2002). Celles-ci comprennent en outre, la plus longue série continue de température connue à ce jour et régulièrement mise à jour par le Met Office, qui débute en 1659 et concerne la région du centre de l'Angleterre (Manley 1974) (Fig. 1).

La collecte et l'analyse de données climatologiques à haute résolution spatiale et temporelle, effectuées à la faveur d'observations visuelles et d'instruments enregistreurs est donc une science jeune et un effort substantiel est nécessaire pour valoriser les archives climatologiques quantitatives encore dormantes dans certains pays. Les climatologues et les historiens du climat tentent de les exhumer et de les raccorder aux observations avérées, comme l'atteste par exemple le cas récent du Japon (Können *et al.* 2002). Dans la plupart des pays de l'Europe du Nord-Ouest, des stations météorologiques synoptiques ont été mises en service au cours de la seconde moitié du 19^{ème} siècle, fonctionnant souvent de pair avec les observatoires astronomiques intéressés par l'ensemble des phénomènes atmosphériques (Observatoire de Paris, de Bruxelles, d'Aix-la-Chapelle, etc.) et servant à la publication de cartes météorologiques publiées quotidiennement dans la presse (Javelle *et al.* 2000). Les données climatologiques ainsi comptabilisées permettent de connaître dans les grandes lignes l'évolution du climat des régions concernées sur plus d'un siècle. Depuis plusieurs années maintenant, s'appuyant

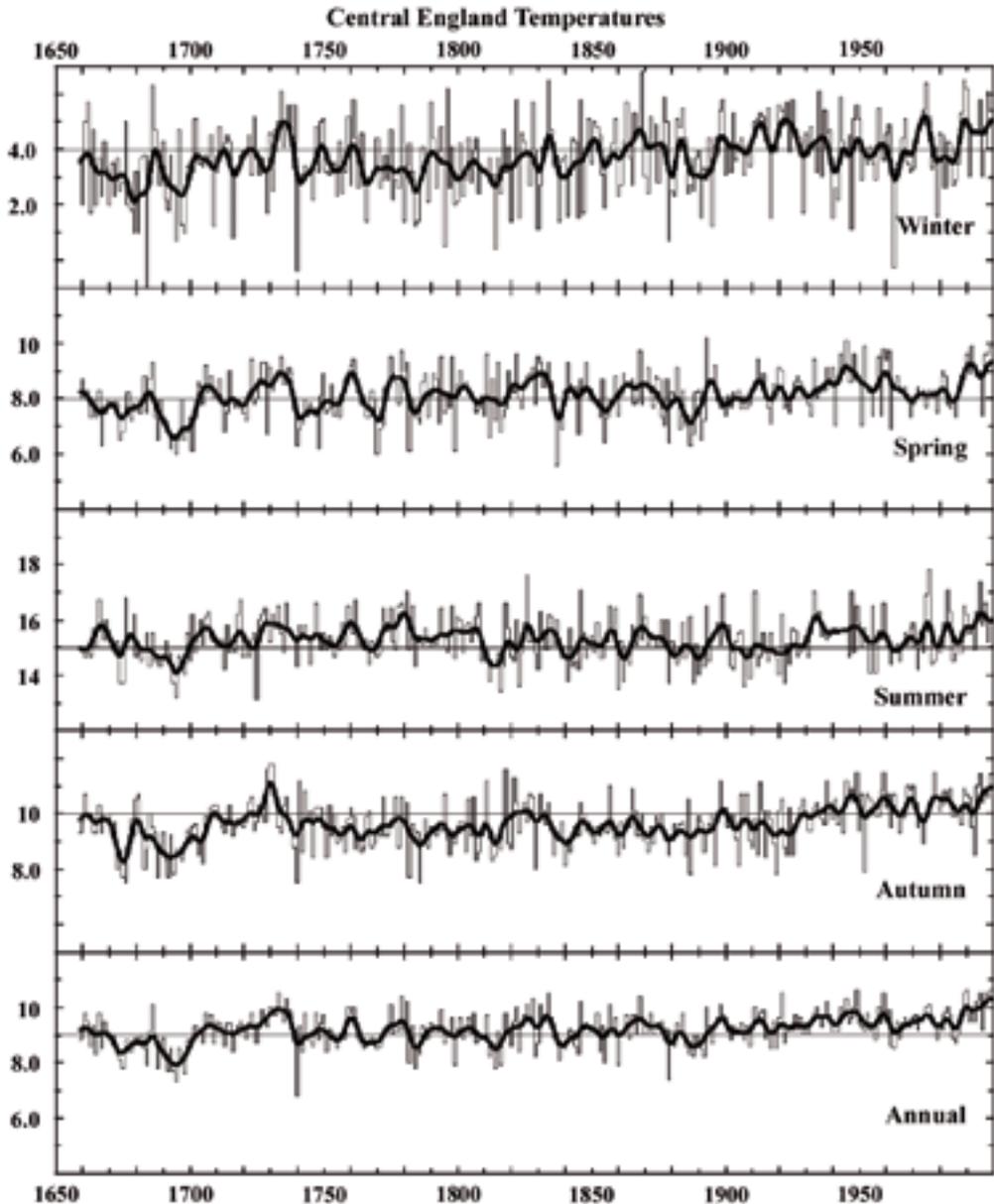


Fig. 1. Evolution saisonnière et annuelle de la température de l'air de 1650 à 2001 dans le centre de l'Angleterre (triangle Preston-Londres-Bristol).

Sources (accès libre):

www.cru.uea.ac.uk/cru/info/ukweather/

www.met-office.gov.uk/research/hadleycentre/CR_data/Monthly/HadCET_act.txt

sur ces séries climatologiques long terme et dans le but de détecter un éventuel changement climatique global, différentes équipes de climatologues dont celle de Philip Jones (Climate Research Unit de l'Université East Anglia au Royaume-Uni) ont

contribué à élaborer et mettre à jour une climatologie planétaire des principaux paramètres météorologiques sur un maillage formé de points de grille espacés de 5° en latitude et longitude. La Fig. 2 illustre à titre d'exemple, l'évolution

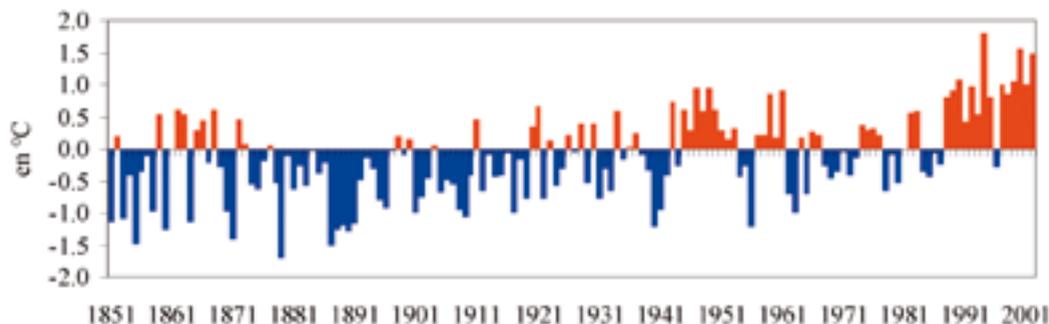


Fig. 2. Variations négatives et positives de la température annuelle par rapport à la normale 1961-1990 au cours des 150 dernières années au point de grille 47.5°N-7.5°E incluant le Grand-Duché de Luxembourg (d'après le fichier de données de Jones & Moberg (2003); en libre accès sur <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Les séries de température considérées se rapportent aux stations de: Luxembourg-ville (1878-2001), Payerne (1954-1970), Basel-Binningen (1755-1970), Zurich (1883-2001), Saentis (1883-2001), Genève Cointrin (1753-2001), Genève-ville (1961-1970), Lugano (1951-2001), Nancy-Essey (1951-2001), Strasbourg (1801-2001), Dijon (1951-2001), Saint-Bernhard (1818-1868), Darmstadt (1830-1930), Saarbruecken (1951-1970), Karlsruhe (1779-1930), Stuttgart (1952-1970), Stuttgart-Cannstadt (1961-2000), Friedrichshafen (1866-1976), Bregenz (1870-2001).

des anomalies de température au cours des 150 dernières années par comparaison à la normale climatique 1961-1990 de l'OMM (Organisation Météorologique Mondiale) au point de grille 47.5°N-7.5°E. Ces anomalies sont moyennées à partir des relevés de température effectués dans la maille 50-45°N/5-10°E incluant le Grand-Duché de Luxembourg.

La climatologie de Jones a pour vocation de fournir une image synoptique des variations climatiques contemporaines sur près de 150 ans, et par exemple, de régionaliser à l'échelle continentale l'ampleur du réchauffement climatique au cours du 20^{ème} siècle. Les résultats de Jones & Moberg (2003) présentent toutefois des limitations en raison notamment de la non prise en compte de certaines ruptures d'homogénéité liées aux vicissitudes des mesures climatologiques, pouvant affecter les nombreuses séries chronologiques long-terme prises en compte (Moisselin *et al.* 2002). Un objectif de premier plan dans l'étude des variations climatiques contemporaines consiste donc à constituer un échantillon aussi large que possible de longues séries climatologiques fiables et homogénéisées, c'est-à-dire apurées de tout artéfact expérimental, capables de retracer avec un niveau d'incertitude minimal la magnitude et les fluctuations des principales variables climatiques (pression atmosphérique, précipitation, température de l'air, ensoleillement). La disponibilité de séries de mesure plus que séculaires en un grand nombre de points de mesure permet alors de comparer les tendances statistiques entre régions climatiques, de vérifier la convergence des

tendances dégagées au sein d'une même unité climatique, d'en comprendre la variabilité spatiale et d'apprécier la variabilité du climat antérieur au 21^{ème} siècle, qualifié par certains d'anthropocène.

Le Grand-Duché de Luxembourg n'est plus une *terra incognita* climatologique depuis l'aube du 19^{ème} siècle, qui a vu, dans le sillage de l'émergence de la démarche expérimentale en météorologie, des savants luxembourgeois s'initier à l'observation systématique et quantitative du temps. Celle-ci s'est ensuite formalisée et densifiée, en 1907 avec la création des Archives du Temps puis au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale à la faveur de la mise en place d'un réseau de mesure national sous l'impulsion des pouvoirs publics. La critique et l'homogénéisation des observations météorologiques effectuées continuellement depuis plus de 150 ans à Luxembourg-ville forment l'ossature de nos investigations qui tendent à valoriser le patrimoine climatologique constitué au fil du temps par les générations successives d'observateurs bénévoles ou professionnels. Le fruit de ce travail devrait permettre d'appréhender plus objectivement la variabilité et les tendances historiques récentes du climat océanique et à dégradation continentale auquel est soumis le Grand-Duché de Luxembourg, et dans un second temps, de compléter et d'amender la climatologie de Jones au point de grille 47.5°N-7.5°E en fonction des séries climatiques homogénéisées au niveau de Luxembourg-ville.

2. Inventaire et modalités d'observation des longues séries climatologiques à Luxembourg-ville

Avant toute exploitation de longues séries climatologiques, il convient de rassembler autant d'informations que possible sur les périodes d'observation et les conditions d'acquisition des paramètres météorologiques (site de mesure, instrumentation employée, etc.), pour documenter toutes les sources potentielles d'influence que subissent les données climatologiques au cours du temps. L'ensemble de ces renseignements forme ce que les climatologues appellent communément les méta-données.

2.1. Périodes et sites d'observation retenus

D'après les documents d'archives quantitatives connus à ce jour, les premières observations météorologiques quantitatives à Luxembourg-ville ont été initiées en 1838 par Nicolas Bodson (Fig. 3). Les informations exploitées pour reconstituer les périodes et les sites d'observation successivement occupés par la « station climatologique de Luxembourg-ville » depuis cette date sont issues des deux ouvrages d'Eugène Lahr (Lahr 1950; 1964), professeur de chimie à l'Athénée Grand-Ducal, sur la période courant de 1838 à 1946, et des renseignements fournis par l'ouvrage de Neu (1996) du Service Météorologique de l'Aéroport, pour la période s'étendant de 1947 à 1996. Précisons d'emblée, étant donné la non unicité du site de la station de mesure de Luxembourg-ville, que nous entendons par « station climatologique de Luxembourg-ville » les parcs météorologiques qui se sont succédés de 1838 à 2003 et qui ont servi à mesurer certains paramètres météorologiques dans l'agglomération de Luxembourg-ville *sensu lato*, puisque nous englobons l'aéroport de Luxembourg (Luxembourg-Findel). L'historique de la « station climatologique de Luxembourg-ville » reproduit sur la Fig. 3 indique l'occurrence de 4 changements de site de 1838 à 1946 dans l'agglomération de Luxembourg-ville *sensu stricto*, avec une césure de 9 ans incluant les années allant de 1896 à 1906, suivis de 5 déplacements du parc météorologique à vocation aéronautique de Luxembourg-Findel dans un petit périmètre sur la période 1947-2003 recensés par Neu (1996). Les pérégrinations de la « station climatologique de Luxembourg-ville » sont retracées sur la Fig. 4. Les sites de mesure les plus éloignés sont distants d'une douzaine de kilomètres avec une dénivellation

maximale de 80 m environ. Nous verrons plus loin dans quelle mesure il est possible de combler les données manquantes de la période 1896-1906 et de soustraire l'influence des changements de site sur les chroniques de données climatologiques.

Notons que dans la perspective de créer des séries climatologiques continues couvrant la période 1838-2003 et représentatives du site de Luxembourg-ville, les séries de mesure enregistrées continûment à la station climatologique de Luxembourg-Findel sur la période 1947-2003 (Fig. 4 point F), ont été préférées à celles enregistrées au centre ou à la périphérie de Luxembourg-ville sur la même période. En effet, les changements de site qui ont affecté les mesures effectuées dans l'agglomération de la ville de Luxembourg à partir de 1946 sont susceptibles d'avoir induit des perturbations plus importantes sur les paramètres climatologiques que les changements de site du parc météorologique de Findel-aéroport: la clôture de la station climatologique du professeur Lahr en 1976 située au Limpertsberg (pied du château d'eau) à 330 m d'altitude relayée par la station climatologique de Luxembourg-Beggen située à 238 m d'altitude dans un contexte topographique de fond de vallée en offre un exemple probant. Les conditions de site (altitude, exposition, dégagement) successives du parc météorologique du Findel-aéroport (Fig. 4 point F) sont moins susceptibles, sans pour autant être négligeables, d'avoir influencé fortement les observations météorologiques, comme les résultats de la procédure d'homogénéisation le montreront plus tard. De surcroît, celui-ci occupe la même position en sommet de plateau que les sites d'observation d'avant-guerre dont l'altitude était légèrement inférieure (Fig. 3).

Sur la période s'échelonnant de 1838 à 1946, les séries climatologiques collationnées dans Lahr (1950; 1964) pour Luxembourg-ville ont donc été aboutées aux séries climatologiques du Findel-aéroport enregistrées de 1947 à 2003, moyennant une procédure d'homogénéisation décrite plus loin. Après application de celle-ci aux longues séries de précipitation, de température de l'air et d'ensoleillement enregistrées à la « station climatologique de Luxembourg-ville », tout se sera donc passé comme si les observations météorologiques avaient eu lieu depuis l'origine, sur le site et dans les conditions de mesure actuels du parc météorologique de l'aéroport du Findel à 369 m d'altitude sur un plateau dégagé.

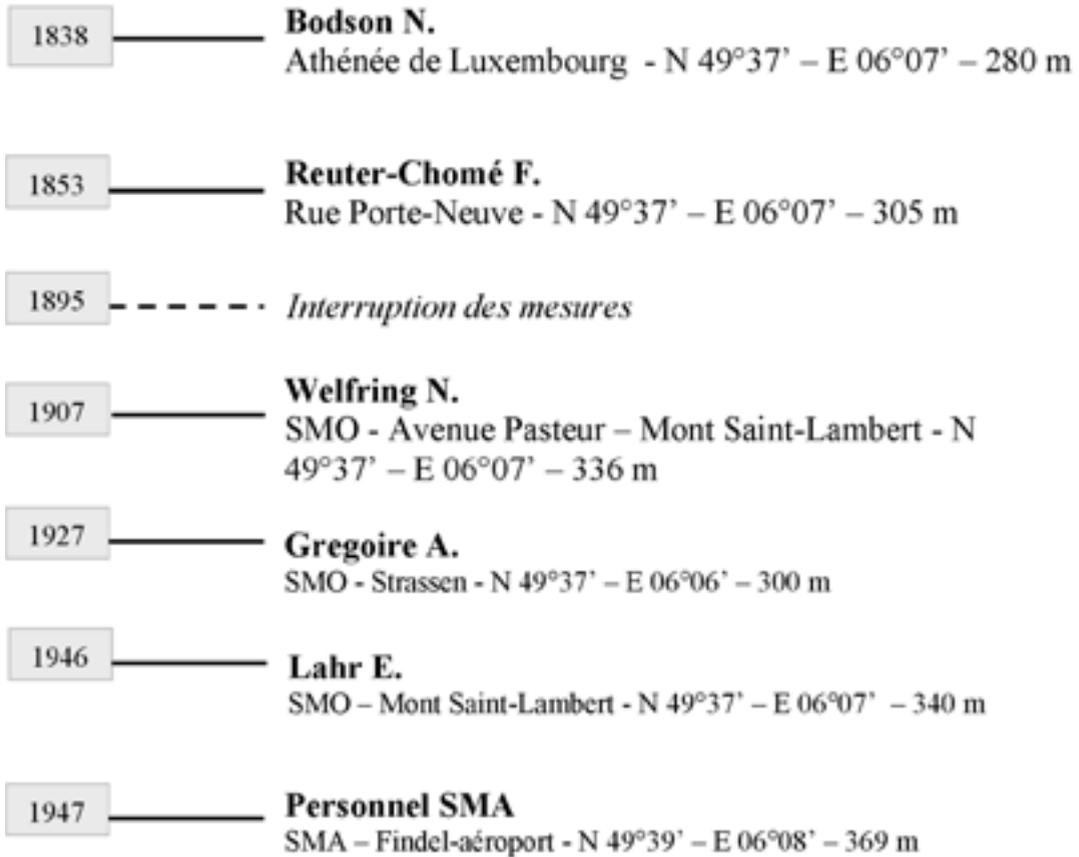


Fig. 3. Observateurs successifs à la «station climatologique de Luxembourg-ville». SMO: Service Météorologique Officiel - SMA: Service Météorologique de l'Aéroport. Le Mont Saint-Lambert correspond en partie au quartier de l'actuel Limpertsberg.

2.2. Collecte de l'information climatologique et historique des mesures

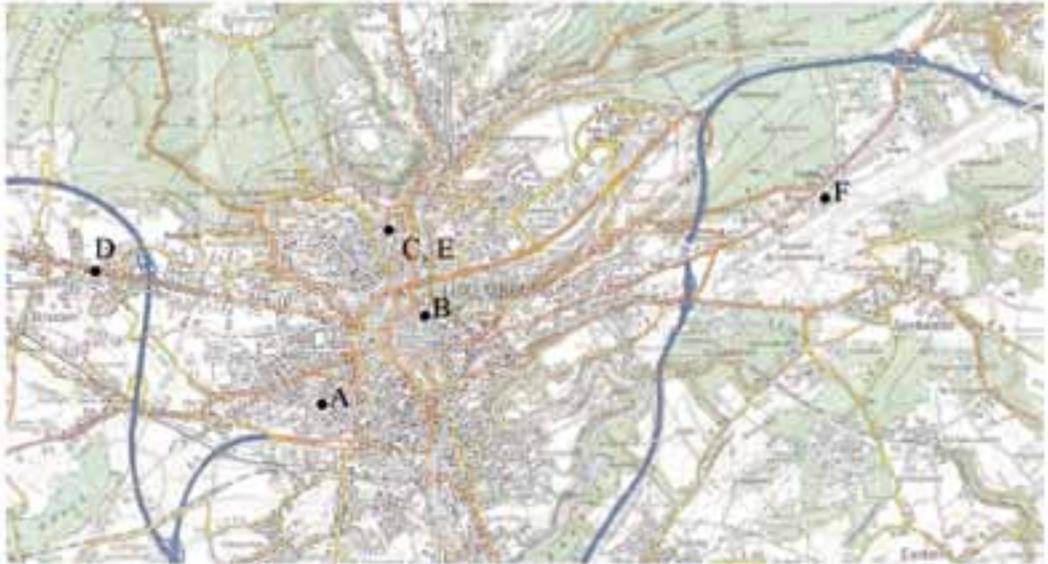
2.2.1. Inventaires des paramètres climatologiques exploitables sur plus d'un siècle

En l'état actuel de nos connaissances, les données journalières afférentes à la « station climatologique de Luxembourg-ville » couvrent deux périodes:

- 1854-1888: observations tri-journalières du professeur François Reuter-Chomé (1890), manuscrits disponibles à la Bibliothèque Nationale du Luxembourg et
- 1946-2003: observations journalières du professeur Lahr en 1946 consignées dans

l'Annuaire météorologique et hydrologique de l'ASTA (Administration des Services Techniques de l'Agriculture) et observations tri-journalières des observateurs successifs de la station de Luxembourg-Findel à partir de 1947 puis acquisition automatique à partir de 1985 (communication orale de E. Kirpach, chef-adjoint du SMA).

Pour les périodes de mesures antérieures ou intercalaires (1838-1853/1907-1945), seules les moyennes mensuelles et annuelles ont été publiées par Lahr (1950). Les paramètres climatiques observés au cours des 150 dernières années et documentés dans Lahr (1950) sont variés, à la fois quantitatifs (e.g. hauteur de pluie) et qualitatifs (e.g. nombre de jours avec sol recouvert de neige). Les paramètres climatiques pour lesquels nous avons reconstitué des séries temporelles continues d'au moins un siècle ont été sélectionnés soit parce que leur nature ne suppose pas la mise en œuvre d'une procédure de critique particulière, soit



Extrait de la carte topographique au 1/50 000 Luxembourg Sud
Source: Cadastre, Etat du Grand-Duché de Luxembourg, 2000

Fig. 4. Localisation géographique des sites successifs occupés par la « station climatologique de Luxembourg-ville » de 1838 à 2003 (d'après les renseignements fournis par Lahr (1950, 1964) et Neu (1996)). La localisation des points A, B, D est approximative.

parce qu'ils ont déjà fait l'objet de l'application de méthodes de critique et d'homogénéisation dans la littérature spécialisée. Ainsi par exemple, Lahr (1950) publie les extrêmes absolus de température mois par mois relevés de 1838 à 1949. L'exploitation directe de ces valeurs isolées est très difficile dans la mesure où nous ignorons l'impact des modalités de mesure successives sur les températures extrêmes absolues. De fait, les séries de nombres de jours de grand froid ($T_n < -10^\circ\text{C}$) ou de jours d'été ($T_x > 25^\circ\text{C}$) voire caniculaires ($T_x > 35^\circ\text{C}$) dérivés de ces températures extrêmes absolues que proposent Lahr (1950), risquent eux-aussi, d'être fortement biaisés sur une aussi longue période. En revanche, la correction de moyennes mensuelles ou annuelles est beaucoup plus aisée dans la mesure où la variabilité temporelle de ces valeurs est beaucoup moins forte ce qui rend la détection et l'estimation de l'amplitude de ruptures d'homogénéité beaucoup plus aisées. Les observations hygrométriques et anémométriques ont également été évincées dans la mesure où elles sont très sensibles au type de capteur utilisé et à son étalonnage, et d'autre part à l'environnement du site de mesure. Les relevés nivométriques effectués à la « station climatologique de Luxembourg-ville » antérieurement à 1947 et publiés dans Lahr (1950) correspondent à des données nominales (durée de la saison neigeuse, nombre de jours de sol couvert de neige) et quantitatives (hauteur maximale de la couche de

neige au sol). Compte tenu de la forte variabilité spatiale des chutes de neige efficaces, c'est-à-dire qui contribuent à accroître l'épaisseur du manteau neigeux au sol, il paraît difficile de reconstituer une série temporelle homogène pour ce type de paramètre climatique sur plus d'un demi-siècle. Les deux paramètres climatiques retraçant le temps sensible, l'état du ciel et la nébulosité, sont particulièrement subjectifs et fluctuent donc passablement d'un observateur météorologique à l'autre. Au total, les trois paramètres climatiques finalement retenus sont donc les précipitations météoriques, la température de l'air et la durée d'insolation.

2.2.2. Instrumentation et mode opératoire

Dans la grande majorité des pays occidentaux, aucune procédure standardisée n'était suivie avant 1875 pour l'implantation des capteurs et la mesure des grandeurs météorologiques (Parker 1994). Les premières normes formulées à l'égard de la mesure de la température de l'air par exemple (hauteur du thermomètre au-dessus du sol, protection du thermomètre contre les radiations solaires, etc.), ne sont apparues qu'en 1873 sous l'impulsion de la Royal Meteorological Society (Mawley 1897 cité par Parker 1994). Mestre (2000) signale qu'en

France, il a fallu attendre la deuxième moitié du 19^{ème} siècle pour que le pays se dote d'un réseau climatologique dense et exploitable, sous l'impulsion d'Urbain Le Verrier. Les observations météorologiques du 19^{ème} siècle à Luxembourg-ville ont donc été effectuées dans des conditions hétérogènes qui impliquent d'introduire des facteurs correctifs pour soustraire autant que possible leur impact sur le signal climatique.

2.2.2.1. Les mesures de température de l'air (1838-2003)

Selon Lahr (1950), Nicolas Bodson, premier observateur météorologique dont les registres mensuels ont été conservés intacts, a effectué ses lectures de température d'après l'échelle Réaumur avant de les convertir en degré Celsius pour le calcul de la moyenne diurne. Trois relevés quotidiens (Fig. 5) au lever du soleil, à midi et au coucher du soleil, ont été réalisés journalièrement par Nicolas Bodson de 1838 à 1852. L'observateur, avant de publier ces données de température, a effectué un certain nombre de corrections de ses mesures *in situ* constatant une surestimation de celles-ci. Il a également transformé ces lectures faites d'après l'échelle Réaumur en degrés Celsius. Ceci indique donc que Nicolas Bodson a très probablement utilisé un thermomètre à mercure gradué en

degrés Réaumur, avec 0° pour la température de la glace fondante et 80° pour celle de l'eau bouillante sous pression normale (Javelle *et al.* 2000). Lahr (1950) publie les données de température mensuelles brutes, diminuées de -0.9°C selon les recommandations de Nicolas Bodson. Aucune autre information n'est relatée par l'auteur sur l'environnement du thermomètre de Nicolas Bodson où sur les modalités de la mesure (hauteur du thermomètre, exposition, etc.). François Reuter-Chomé succède à Nicolas Bodson en 1853 et reprend le flambeau des observations météorologiques pendant plus de 30 ans. Son zèle et son assiduité d'observateur le conduisent à effectuer pas moins de 38325 observations en plus de trente ans de service sous forme de relevés tri-journaliers à 7h30, 12h00 et 19h30 de 1853 à 1875 puis à 06h30, 12h00 et 21h30 de 1876 à 1895 (Lahr 1950). Les renseignements sur les conditions d'implantation du dispositif de mesure du professeur Reuter-Chomé sont assez parcimonieux. Il précise tout au plus que ses observations ont été effectuées au second étage d'un immeuble dans la rue Porte-Neuve à Luxembourg-ville, un quartier situé aux marges du vieux Luxembourg à proximité du « glacis » (Fig. 4 point B). Toujours selon les manuscrits du professeur Reuter-Chomé, l'instrumentation était localisée côté est de l'immeuble à l'air libre. Aucune indication n'est fournie sur la

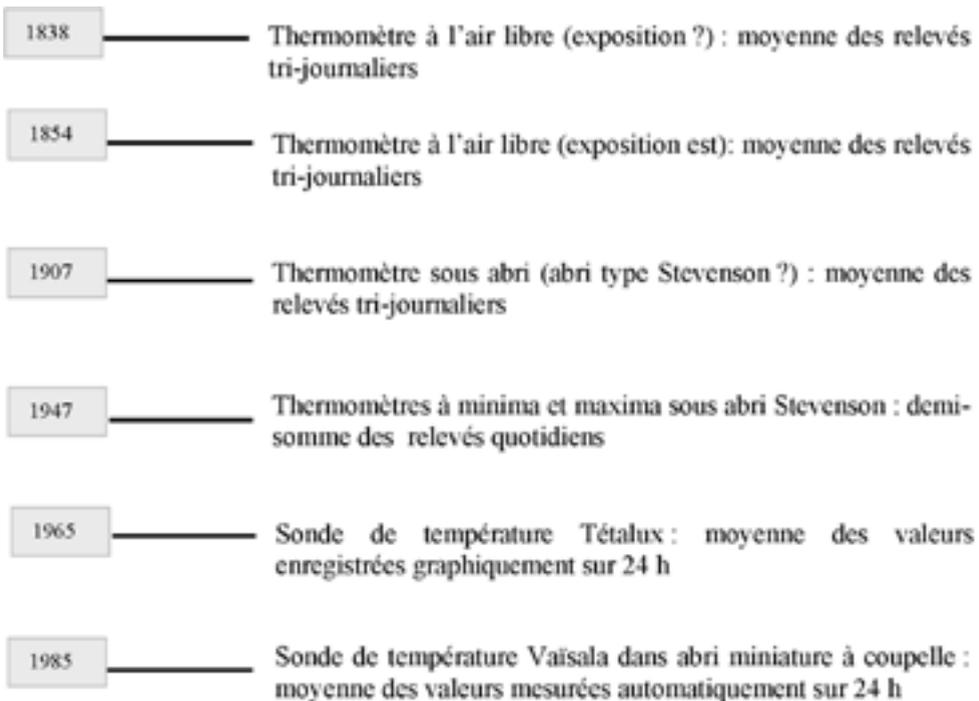


Fig. 5. Type de capteur et mode de détermination de la température moyenne journalière en vigueur de 1838 à 2003 à la «station climatologique de Luxembourg-ville».

hauteur du thermomètre au-dessus du sol qui permettait à François Reuter-Chomé d'effectuer des lectures de température d'une précision située entre 0.2°C et 0.5°C. La comparaison des températures tri-journalières relevées par François Reuter-Chomé aux moyennes de Trèves et Bruxelles le convainc de corriger les moyennes mensuelles et annuelles de -1.5°C de 1854 à 1889. Les moyennes mensuelles et annuelles brutes de température issues des relevés journaliers de François Reuter-Chomé sont publiées dans Lahr (1950). Après la période d'interruption qui suit l'arrêt des observations du professeur François Reuter-Chomé à l'automne 1895, un service météorologique officiel est créé en 1907 et rattaché à l'Administration des Services Agricoles. La « station climatologique de Luxembourg-ville » est alors implantée dans le jardin attenant à la maison de Nicolas Welfring, résidant dans l'avenue Pasteur au Mont Saint-Lambert (actuel Limpertsberg) (Fig. 4 point C). Les mesures de la température de l'air sont effectuées sous abri météorologique contenant en outre les thermomètres indiquant les minima et maxima dont il ne nous reste malheureusement que les extrêmes mensuels absolus et non moyens. La température de l'air est relevée quotidiennement à 7h, 13h et 21h pendant 19 ans de 1907 à 1926. Les moyennes mensuelles et annuelles brutes de température issues des relevés journaliers de Nicolas Welfring sont publiées dans Lahr (1950).

Aloyse Grégoire prend la succession de Nicolas Welfring comme observateur à la « station climatologique de Luxembourg-ville » transférée à Strassen (Fig. 4 point D). Selon toute probabilité, même si aucune mention explicite n'apparaît dans l'ouvrage de Lahr (1950), le même dispositif que celui du Mont Saint Lambert est utilisé à Strassen. La période d'occupation allemande est une période trouble dont il est difficile de préciser avec exactitude l'impact sur les conditions de mesure des paramètres climatiques. Lahr (1950) indique que la gestion du service météorologique passe sous tutelle allemande en 1941 mais que des observateurs bénévoles luxembourgeois, dont probablement Aloyse Grégoire, demeurent néanmoins en poste en attendant des remplaçants qualifiés de nationalité allemande. Cette hypothèse est attestée par l'affirmation de Lahr selon laquelle, « à la fin de la guerre, une seule station, Luxembourg-Strassen, fonctionnait encore. » Malgré les tribulations du réseau météorologique luxembourgeois sous l'occupation allemande, il semble bien que le poste de mesure météorologique de Luxembourg-Strassen ait été épargné. Les moyennes mensuelles et annuelles brutes de température issues des relevés tri-journaliers de Aloyse Grégoire sont publiées dans Lahr (1950). Enfin en juin 1946, l'instrumentation météorologique de la « station climatologique de Luxembourg-ville » réintègre le quartier du Mont Saint-Lambert où officie Eugène Lahr.

Au total, sur la période 1838-1946, la température de l'air a donc été mesurée dans des conditions de site, d'instrumentation et à des heures différentes, compte tenu de l'instauration du méridien de Greenwich en 1884, lors de la Conférence Internationale du Méridien qui se déroula à Washington DC (USA). Ainsi, même si nous n'avons pas été mis en présence de l'instrumentation employée par les observateurs météorologiques successifs, il nous paraît raisonnable d'affirmer, d'après les renseignements fournis dans Lahr (1950) et les relevés originaux de Reuter-Chomé (1890), que la précision de lecture de la température a fluctué entre 0.2°C et 0.5°C. D'autre part, la thermométrie s'est peu à peu normalisée avec l'apparition d'un abri thermométrique en 1907, conformément aux recommandations internationales.

Rappelons que l'abri météorologique a pour rôle premier d'isoler un volume d'air de l'atmosphère libre, en assurant une bonne ventilation du capteur thermométrique. Pour minimiser les erreurs de mesure de température (Perrin de Brichambont & Leroy 1995), l'enceinte doit être bien ventilée, particulièrement par conditions de fort ensoleillement et vent très faible, disposée à l'abri du rayonnement solaire, des projections d'eau liquide (pluie, rosée) ou solide (neige), avoir une inertie thermique aussi faible que possible et être réalisée de manière à réduire au minimum les écarts de température entre ses parois et l'air. Comme nous l'évoquions plus haut, les observateurs Nicolas Bodson et François Reuter-Chomé ont réalisé leur mesure de température à l'air libre, loin des spécifications propres à un abri thermométrique. Ils ont eux-mêmes procédé à des corrections de leurs mesures de température par comparaison avec Bruxelles par exemple dans le cas de François Reuter-Chomé. Mais selon Parker (1994), les observations de température réalisées à l'Observatoire de Bruxelles recensées par le climatologue Lancaster (1901), ont également été effectuées à l'air libre sur la façade nord, à 3 m du sol, de 1833 à 1877. Ce n'est qu'à cette date, qu'un abri Stevenson a été utilisé pour effectuer les mesures thermométriques. Ceci signifie que les températures corrigées de Nicolas Bodson et François Reuter-Chomé ne prennent pas en compte les artefacts de mesure liés à l'exposition à l'air libre du thermomètre. Outre les corrections rendues nécessaires par les changements de site successifs de la « station climatologique de Luxembourg-ville », une correction des moyennes de température mensuelles et annuelles publiées dans Lahr (1950) tenant compte des écarts de température entre un thermomètre placé à l'air libre ou sous abri s'avère donc indispensable pour rendre compatible les séries de température mensuelles et annuelles constituées sur la période 1838-1895 par rapport à la période 1907-2003.

Au lendemain de la Seconde Guerre Mondiale, l'aéroport de Luxembourg décide de se doter d'un service météorologique. Pour les raisons que

nous évoquions plus haut, ce sont les observations météorologiques effectuées à Luxembourg-Findel qui documenteront l'évolution des paramètres climatiques et notamment de la température de l'air de 1947 à 2003. Au Findel-aéroport, celle-ci a été mesurée selon trois dispositifs instrumentaux (communication orale de É. Kirpach):

- de 1947 à 1965, sous abri Stevenson à 2 m au-dessus du sol selon les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) (photo 1), ce qui prolonge les mesures sous conditions standardisées initiées en 1907 par le Service Météorologique Officiel. Les températures extrêmes quotidiennes, ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre à minimum (thermomètre à alcool) et à maximum (thermomètre à mercure) autorisant une précision de lecture de l'ordre de 0.1 à 0.2°C. La pérennité de l'abri météorologique n'implique donc pas de correction particulière en supposant que Nicolas Welfring et Aloyse Grégoire aient également mesuré les températures sous le même type d'abri ce dont nous n'avons pas la preuve absolue. L'abri Stevenson a néanmoins été utilisé à l'Observatoire de Bruxelles dès 1877 (Lancaster 1901) et semble avoir fait école au Luxembourg d'après les photos de l'instrumentation de la « station climatologique de Luxembourg-ville » publiées en 1964 par Lahr (pp. 254 et 256).
- de 1965 à 1985, la température de l'air a été appréhendée à l'aide d'une sonde thermoélectrique de marque Télalux, dotée d'un système de lecture-enregistrement, impliquant toujours une intervention humaine et fonctionnant selon le principe de l'équilibre d'un pont de Wheatstone. La précision de mesure est de l'ordre de 0.1°C.
- à partir de 1985, la thermo-sonde électronique Vaisala sous abri à coupelle fournit une mesure instantanée de la température de l'air à 0.1°C près. Elle est munie d'une centrale d'acquisition et ne nécessite donc pas d'intervention humaine.

Mis à part les conditions de mesure de la température, le mode de calcul de la température moyenne journalière a évolué au cours du temps à la fois en raison du nombre variable de relevés quotidiens effectués par les observateurs et des systèmes de référence horaires en vigueur aux différentes époques (Fig. 5). Idéalement, la température moyenne journalière devrait être estimée par une somme de 24 valeurs horaires, ce qui n'a été réalisé qu'à partir de 1965 dans la pratique à la « station climatologique de Luxembourg-ville ». Les moyennes mensuelles et annuelles publiées par Lahr (1950) ont été établies à partir de trois relevés quotidiens effectués à différentes heures de 1838 à 1946 alors que nous avons considéré la température moyenne journalière comme la demi-somme des

maxima et minima journaliers pour les moyennes mensuelles et annuelles de 1947 à 1965, à l'instar de ce qui est usuellement recommandé en l'absence de sonde de température automatique par Météo-France. Nous verrons dans le paragraphe consacré à la critique des données de température comment pallier ces variations de mode opératoire.

2.2.2.2. Les mesures de précipitations (1854-2003)

Lahr (1950) ne fait mention d'aucun renseignement concernant l'instrumentation utilisée par Nicolas Bodson pour les précipitations liquides (essentiellement la pluie) et solides (essentiellement la neige). En revanche, il signale que le professeur Reuter-Chomé a eu recours à un pluviomètre artisanal (à la décharge des observateurs bénévoles du 19^{ème} siècle, il convient de rappeler qu'il ne disposait pas de budget pour établir une station météorologique normalisée) d'une surface de captation de 100 cm², le baquet récepteur étant situé à 1 m du sol. La taille de la surface de captation est loin d'être aberrante, puisque reprise par certains modèles de pluviographe «Hellmann» bien répandus dans le monde. Cette surface d'échantillonnage est néanmoins assez réduite comparée par exemple au pluviomètre dit « Association » en vigueur en France à partir de 1864 (400 cm²) (Javelle *et al.* 2000). Le pluviomètre utilisé par Nicolas Welfring était lui aussi situé à 1 m du sol. Pour le suivi de la pluviométrie après-guerre, l'Administration des Services Agricoles et l'aéroport de Luxembourg-Findel ont mis en place différents types de pluviographes dont le pluviographe de type Hellmann doté d'une surface réceptrice de 200 cm². L'instrumentation utilisée pour la pluviométrie ne semble donc pas avoir grandement changé au fil du temps. A l'instar des mesures de la température de l'air effectuées de 1838 à 1946, les conditions de dégagement n'ont sans doute pas été respectées par tous les observateurs bénévoles, tant il est vrai que l'effet aérodynamique est crucial dans la mesure des précipitations et peut se solder par un déficit de captation important lors de conditions particulièrement venteuses de l'ordre de 8 à 10 % (Adjizian 1994; Sevruck & Nespor 1998). Le déficit de captation a sans doute été plus prononcé au site du Findel-aéroport qu'aux différents emplacements occupés par la « station climatologique de Luxembourg-ville » compte tenu de la rugosité de surface de l'agglomération. Les corrections appliquées aux totaux mensuels et annuels tenteront de gommer une partie au moins de ces effets de site. Les totaux quotidiens enregistrés après-guerre correspondent à une quantité d'eau recueillie en 24 heures et relevée chaque matin à 7 heures, heure locale. De 1838 à 1946, aucun renseignement ne permet de savoir sur quelle tranche horaire étaient lus les totaux, mais cela retentit peu sur des cumuls pluviométriques mensuels ou annuels.



Photo 1. Abri météorologique de type Stevenson et pluviographe à augets basculeurs (à l'arrière plan) en vigueur au début des années 1950 sur le site de l'aéroport de Luxembourg. Photographie issue des archives du Service Météorologique de l'Aéroport (avec autorisation de M. Claude Alesch, chef du SMA).

2.2.2.3. Les mesures de durée d'insolation (1931-2003)

Les mesures héliographiques entreprises à Luxembourg-ville ont commencé dans les années 1930. Sur toute la période de mesure, de 1931 à 2003, la durée d'insolation a été quantifiée au moyen de l'héliographe Campbell-Stokes - dont le principe de mesure remonte à 1857 (Mestre 2000) - ce qui est un avantage compte tenu de la différence de sensibilité entre ce capteur traditionnel et les héliomètres automatiques de type CIMEL par exemple (Mestre 2000). L'héliographe Campbell-Stokes est constitué d'une sphère de verre concentrant les rayons solaires sur une bande de papier-carton gradué. Celui-ci est brûlé lorsque l'intensité du rayonnement solaire global dépasse la valeur de 120 W/m^2 (seuil dépassé lorsque le soleil n'est pas (ou très peu) masqué par les nuages): la longueur de la trace pyrogravée est proportionnelle à la durée d'insolation et interprétée par l'observateur. Cette interprétation induit une incertitude sur la mesure journalière de ce paramètre de l'ordre d'une demi-heure. L'ouvrage de Lahr (1950) ne mentionne aucune

métadonnée au sujet des observations héliographiques réalisées à partir de 1931. Ceci nous incite à la plus grande prudence quant à l'origine et la fiabilité des mesures d'insolation effectuées de 1931 à 1946. Nous conjecturons qu'elles ont été effectuées par Aloyse Grégoire sur le site du Mont Saint-Lambert, sans en avoir malheureusement la certitude. Pour ce qui concerne la période du Findel-aéroport (1947-2003), les sites successivement occupés par la station climatologique de Findel-aéroport peuvent être considérés comme suffisamment dégagés et libres d'influences perturbatrices (pollution urbaine, fumée, obstacle de tout genre) pour que cette station soit représentative d'un environnement régional. Les conditions d'implantation du capteur à partir de 1988 (photo 2) sont susceptibles néanmoins d'avoir généré une légère sous-estimation en raison du masque provoqué par le hangar vers l'ouest, situé dans l'azimut du soleil à son coucher une partie de l'année. Nous verrons si cet artéfact se retrouve sur les cumuls d'insolation mensuels ou annuels.



Photo 2. a) Vue vers le sud prise depuis le balcon du bâtiment du Service Météorologique de l'aéroport (janvier 2003): piste de l'aéroport au second plan, héliographe au premier plan, parc météorologique en contrebas au premier plan. b) Vue vers le nord-ouest: abri météorologique (flèche rouge), abri à coupelle (sonde de température et d'humidité, flèche bleue), pluviographe à augets basculeurs (flèche noire).

3. De la donnée brute à la donnée critiquée

Comme l'évolution des conditions de mesure des variables climatiques à Luxembourg-ville le laisse pressentir, les données météorologiques sont susceptibles d'être entachées d'erreurs au cours du processus d'acquisition. Outre les erreurs de transcription, les changements d'emplacement du site de mesure, les changements d'instrumentation (capteur, abri météorologique), la modification de l'environnement du capteur (végétation, urbanisation...), le changement du mode de calcul du paramètre, les observateurs successifs ou encore la nécessité de reconstituer des périodes manquantes fréquentes peuvent rendre les séries climatiques hétérogènes et provoquer des ruptures d'homogénéité. L'analyse primaire des données brutes collectées par la «station climatologique de Luxembourg-ville» est justement destinée à vérifier l'homogénéité des séries temporelles. Avec Mestre (2000) nous considérerons qu'une série d'observation météorologique est homogène lorsque «les conditions de mesure n'ont pas varié au cours du temps.» Pour que cette définition ne soit pas trop restrictive, nous admettrons par extension, qu'une série est homogène lorsque les modifications éventuelles n'ont pas altéré sensiblement les observations. Toute la difficulté à ce stade, est de parvenir à dissocier au sein d'une série de mesure, les ruptures d'homogénéité provenant d'un signal «naturel» qui correspond à l'évolution normale de la grandeur physique analysée, de celles induites par un signal artificiel provenant d'un changement dans les conditions de mesure (Fig. 6). Comme le souligne Mestre (2000), nombreux sont les climatologues (e.g. Alexandersson 1986), qui ont pensé résoudre ce problème en faisant appel à une série de référence pseudo-homogène, bien corrélée à la série à tester pour soustraire le signal «naturel» et ne conserver que la partie artificielle qui subit

alors les tests de ruptures. C'est le principe de l'homogénéité relative. Cependant, sur de longues périodes (plus de trente ans), il existe peu de séries qui soient réellement homogènes, exemptes de dérive artificielle ou d'erreur de mesure, ce qui est une limitation fondamentale. Nous verrons comment contourner cette difficulté plus loin, au moins pour les cinq dernières décennies.

En général, une procédure de critique de séries de données brutes s'articule en trois grandes étapes (Drogue *et al.* 1998):

- i) Le contrôle primaire destiné à apurer les données brutes entachées de valeurs aberrantes. Il comprend les phases de filtrage des valeurs aberrantes par comparaison à d'autres sites, d'autres mesures ou par comparaison à des séries générées par modélisation déterministe et/ou stochastique.
- ii) La détection qui permet de mettre en évidence des changements de site, d'éventuels artefacts météorologiques plus insidieux liés à une dérive de capteur par exemple.
- iii) La correction des observations douteuses et l'interpolation destinée à combler les périodes lacunaires imputables à des pannes, des dysfonctionnements du capteur ou des absences de mesure.

3.1. Panorama méthodologique

Les trois points de la méthodologie décrite ci-dessus ont conduit différents auteurs à proposer des critères statistiques et/ou physiques dont la mise en œuvre sur nos chroniques de mesure a permis de filtrer d'éventuelles valeurs hors-normes. Ainsi, pour la phase de contrôle primaire, Meek & Hatfield (1994) suggèrent un jeu de trois tests logiques de filtrage pour détecter d'éventuels hors-sais (valeurs singulières). Ces trois tests sont:

- Le critère LIM statique ou dynamique, qui consiste à fixer une bande passante de valeurs constantes ou variables encadrant la série temporelle à contrôler. Au sens physique, il se fonde sur les extréma admissibles pour une grandeur physique donnée et consiste par exemple à encadrer celle-ci de courbes-enveloppes minimales et maximales dont le dépassement trahit probablement des valeurs suspectes. Au sens statistique, il peut s'agir d'un filtre passe-bande correspondant aux valeurs remarquables situées aux queues de la loi de probabilité qui s'ajuste à la grandeur physique que l'on contrôle: par exemple, dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne, il faut être attentif à toute valeur dont l'écart à la moyenne dépasse $\pm 2 \sigma$ (95%) ou 3σ (99.9 % de la distribution en fréquence).

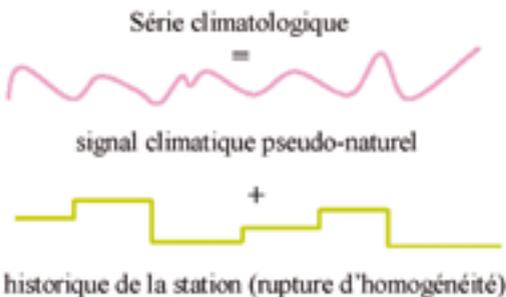


Fig. 6. Représentation schématique d'une série climatologique non homogène: superposition d'un signal climatique naturel (rose) et artificiel (vert).

- Le critère ROC (Rate-Of-Change) est basé sur l'amplitude de variation raisonnablement possible pour une grandeur météorologique, sur un pas de temps donné.
- Le critère NOC (No-Observed-Change) consiste à considérer comme suspecte toute valeur de grandeur météorologique qui demeurerait inchangée sur un certain laps de temps.

Il est évident que la définition de ce type de critère suppose une part d'appréciation arbitraire qui relève d'une connaissance empirique du climat et de valeurs de référence plausibles pour une région donnée. Des informations exogènes comme le type de circulation atmosphérique peuvent permettre dans certains cas de juger du caractère improbable d'une observation ou d'une variation subite (les variations importantes d'hygrométrie sont souvent associées à des passages de front et donc à des changements de masses d'air). D'autre part, certains paramètres météorologiques sont plus faciles à « encadrer » que d'autres, compte tenu même de leur nature. La durée d'insolation par exemple, en l'absence de masque, ne peut pas par essence dépasser la durée astronomique du jour. Les précipitations forment un paramètre météorologique éminemment variable dans l'espace et dans le temps qu'il est délicat de borner par une limite physique supérieure. Dans ce cas, c'est plutôt la connaissance historique des événements pluvieux paroxystiques antécédents dans des régions voisines et de climat comparable, qui permet de fixer un seuil maximal d'intensité pluviale. La représentation graphique de la somme des observations permet également de détecter des aberrations ou des dérives dans les séries climatologiques:

- La méthode du double-cumul est largement employée. Proposée par Kohler (1949), elle consiste à tracer la courbe des cumuls de Y en fonction des cumuls de X au cours du temps qui doit être à peu près linéaire. Un coude (rupture de pente) est caractéristique d'une inhomogénéité dans la série testée. Cette méthode a été appliquée aux totaux quotidiens, elle a le désavantage d'être purement graphique.
- L'indice *cusum* (Lettenmaier 1977) consiste à déterminer l'écart cumulé entre un enregistrement donné et sa moyenne interannuelle pour une période de mesure donnée. Une tendance dans une série climatique se traduit, avec l'indice *cusum*, par une rupture de pente qui peut correspondre à un changement de site comme à une oscillation naturelle. C'est la comparaison du cumul des écarts à la moyenne entre stations voisines qui permet de faire le diagnostic. Un changement brusque de pente dans la courbe *cusum* trahit un changement dans la moyenne locale (un accroissement traduit une augmentation des précipitations par rapport à la moyenne mensuelle et inver-

sement pour les décroissances) et plus l'écart à la ligne horizontale est important, plus la distribution des précipitations est irrégulière.

Enfin une batterie de tests d'homogénéité destinés à la détection des points de rupture pouvant correspondre à des anomalies de mesure ou des variations « naturelles » ont été mis au point et publiés dans la littérature (Lanzante 1996). Les plus couramment utilisés sont le test de Student, de Mann-Kendall, ou encore de Wilcoxon-Mann-Withney applicables à la moyenne ou à la variance d'une série de données (Rhoades & Salinger 1993). Lorsque les séries chronologiques sont apurées des valeurs aberrantes et reconstituées, ces tests statistiques d'homogénéité permettent, le cas échéant, de diagnostiquer des changements de comportement dans une série chronologique, et de s'affranchir du recours à une station météorologique de référence. Leur inconvénient majeur est de ne pouvoir détecter qu'une rupture unique, alors que les séries de mesure peuvent être affectées de ruptures multiples.

3.2. Organigramme de la procédure de critique et d'homogénéisation des séries temporelles

3.2.1. La température de l'air

Les modalités de critique des données de température appliquées aux différents pas de temps sont résumées sur la Fig. 7. Elles appellent un certain nombre d'explications ou de commentaires consignés ci-dessous. Les stations de mesure subsidiaires utilisées pour la critique des données de température sont reportées sur la Fig. 8.

3.2.1.1. Les séries quotidiennes (1854-1888/1947-2003)

Les trois tests logiques de Meek & Hatfield (1994) ont été repris et adaptés au contexte climatique luxembourgeois (Fig. 7 à étape 2). Les fourchettes de température permettant de considérer une valeur de température journalière moyenne (1854-1888) ou extrême (1947-2003) comme suspecte, sont fondées sur les records historiques répertoriés dans la littérature sous un climat tempéré semi-océanique (e.g. Brouyaux *et al.* 2004). Pour s'assurer de la plausibilité des observations tri-journalières du professeur Reuter-Chomé (1854-1888), nous avons également comparé la moyenne saisonnière des valeurs de température à 7h, 12 et 21h aux mesures de température effectuées aux mêmes heures à la station de Findel-aéroport sur la période 1986-2002 (Fig. 7 à étape 3). Ceci permet de vérifier que la course diurne de la température

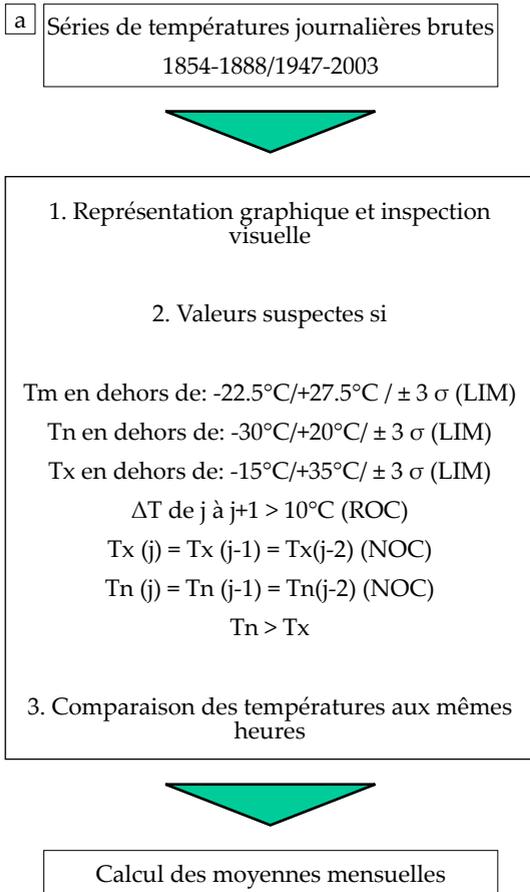


Fig. 7 a. Procédure de critique des séries de températures moyennes de l'air journalières. Tn: température minimale - Tx: température maximale - Tm: température moyenne

de l'air, se traduisant en moyenne par une forme sinusoïdale dissymétrique vers la droite et qui est peu susceptible d'évoluer au cours du temps, se retrouve aux deux époques.

3.2.1.2. Les séries mensuelles et annuelles (1838-2003)

Pour gagner en objectivité dans la démarche de validation des mesures antérieures à 1907 (Fig. 7 b étapes 1b et 3a), nous avons recouru aux températures moyennes mensuelles mesurées à Francfort ($50^{\circ}1\text{ N}-8^{\circ}7\text{ E}$, 109 m), Strasbourg ($48^{\circ}5\text{ N}-7^{\circ}6\text{ E}$, 153 m) et secondairement à Uccle-Bruxelles ($50.8^{\circ}\text{N}-4.4^{\circ}\text{E}$) (Demarée *et al.* 2002) (Fig. 8), trois stations climatologiques synoptiques offrant de longues séries de mesure. Les données des stations de Francfort et Strasbourg ont été collectées sur le site web <http://www.wetterzentrale.de> qui,

malheureusement, ne précise pas les conditions de mesure des températures pour ces deux stations. La distance est approximativement de 200 km entre les quatre villes, ce qui demeure acceptable pour une comparaison efficace des moyennes mensuelles, la température de l'air étant une variable conservative auto-corrélée sur de grandes distances (Mestre 2000). Par ailleurs, pour tenir compte de l'absence d'abri météorologique antérieurement à 1907 (Fig. 7 b étape 3b), les coefficients correcteurs mensuels donnés par Parker (1994) entre des mesures de température effectuées à l'air libre et sous abri ont été appliqués aux moyennes mensuelles antérieures à 1907.

Comme déjà évoqué précédemment, les relevés tri-journaliers à 7h, 13 h et 21 h des observateurs d'avant la seconde guerre mondiale ont pu conduire à un biais important dans le calcul de la température de l'air moyenne journalière, notamment en été où le relevé était trop tardif pour espérer capturer le minimum nocturne. Camuffo (2002) observe que, sous un climat méditerranéen, les écarts de température entre une température moyenne journalière déterminée à partir de trois relevés journaliers à 8, 14 et 20 h et de 24 moyennes horaires suivent une saisonnalité caractérisée par une sur-estimation minimale de -0.4°C de la température moyenne vraie au cours de l'hiver et une sur-estimation maximale de -1.4°C de la température moyenne vraie en été. Nous avons donc déterminé, à partir des relevés de température horaires de la station de Findel-aéroport de la période 1986-2002, l'écart de température moyen mensuel entre une température moyenne établie à partir des températures enregistrées aux mêmes heures que Nicolas Bodson et François Reuter-Chomé (environ 7h00, 12h00 et 21h) et celle obtenue en prenant les 24 valeurs horaires (moyenne journalière vraie), ou la demi-somme des Tn et des Tx quotidiennes. Les résultats (Tab. 1) indiquent que les écarts entre les trois modes de calcul sont plus importants en été qu'en hiver. En ne considérant que trois relevés journaliers (T3) la température moyenne journalière vraie (T24) est légèrement sous-estimée 10 mois sur douze avec un maximum au mois d'août ($+0.2^{\circ}\text{C}$), tandis que la demi-somme des températures maximale et minimale (T2) sur-estime la température moyenne journalière vraie 11 mois sur douze avec un maximum de $+0.35^{\circ}\text{C}$ en septembre. Les écarts moyens mensuels entre T3 et T2, puis entre T2 et T24, ont été appliqués aux chroniques de températures mensuelles brutes pour les corriger, conformément à l'organigramme de la Fig. 7 b (étapes 3c et 3d), de manière à homogénéiser le mode de calcul de la température moyenne mensuelle sur l'ensemble de la période de mesure.

Les méthodes d'Alexandersson et de Vincent

Se classant parmi les méthodes de détection des inhomogénéités, le test d'Alexandersson encore appelé SNHT (Standard Normal Homogeneity

b) Séries de températures mensuelles brutes



- 1. De 1838 à 1895 – 1907 à 1946**
- a. Représentation graphique et inspection visuelle
- b. Détection des valeurs aberrantes via des nuages de points des valeurs mensuelles:
[Luxembourg-ville vs Strasbourg-Entzheim
Luxembourg-ville vs Francfort
Luxembourg-ville vs Metz-Frescaty]
- c. Reconstitution par régression linéaire des valeurs aberrantes
- 2. De 1947 à 2003**
- a. Application de l'algorithme de Caussinus-Mestre aux séries de Tn et Tx mensuelles:
[Séries résiduelles déterminées à partir des quatre stations climatologiques historiques voisines: Clemency, Clervaux, Grevenmacher, Luxembourg-ville]
- b. Correction des moyennes mensuelles de Tn et Tx et calcul des Tm moyennes mensuelles par la demi-somme des Tn et Tx
- 3. De 1838 à 2003**
- a. Application des tests statistiques d'Alexandersson et de Vincent
[Séries résiduelles déterminées à partir de Francfort (1838-1889) et Metz-Frescaty pour la période 1899-2000]
- b. Corrections des moyennes mensuelles dues aux conditions de mesure non normalisées, air libre versus abri météorologique (<1907)
- c. Correction des moyennes mensuelles de 1838-1853 et 1907-1946 par les écarts de température déterminés par comparaison aux demi-sommes des Tx et des Tn de la période 1947-2003 (cf. Tab. 1)
- d. Corrections par les écarts mensuels entre les demi-sommes des Tn et Tx et la température moyenne vraie (cf. Tab. 1)
- e. Reconstitution de la lacune 1895-1907 à l'aide de la méthode d'Alexandersson



Calcul des températures annuelles

Test) repose sur la procédure de Hawkins (1977) qui est basée sur le rapport des vraisemblances maximales (au sens statistique) entre une série à tester et une série de référence élaborée à partir d'une ou de plusieurs séries supposées homogènes. Elle permet, sur une période donnée, d'identifier une rupture unique et de la corriger. Pour mettre en œuvre le test SNHT, une série de comparaison $Q = t(q_1, q_2, \dots, q_n)$ avec $q_i = y_i - x_i$, pour $i=1, \dots, n$ est construite, x = variable de référence, y = variable à tester. Puis Q est centrée - réduite et traitée comme un échantillon gaussien. La procédure de Hawkins est alors appliquée à la série Q . L'hypothèse de l'homogénéité de Q (et donc de y) par rapport à la présence d'une rupture et une seule est donc testée. Ce test est certainement le plus utilisé en climatologie du fait de sa simplicité d'emploi et parce qu'Alexandersson propose une méthode rapide de correction des inhomogénéités basée sur le rapport des moyennes des q_i avant et après la rupture détectée. Pour adapter ce test à la détection de plusieurs ruptures, Alexandersson & Moberg (1997) proposent d'observer le comportement de la statistique de Hawkins T_j . Empiriquement, ils ont constaté que les ruptures se matérialisent par des pics sur la courbe de T_j , alors que des allures en « bosse de dromadaire » sont caractéristiques de pentes. Ils proposent donc de repérer ces pics et bosses pour détecter plusieurs ruptures (Alexandersson & Moberg 1997). L'attachement des climatologues aux séries de référence pseudo-homogènes s'explique en grande partie par la facilité avec laquelle les coefficients correcteurs peuvent être estimés, comme le soulignent Easterling & Peterson (1995). Implicitement, la série de référence correspond à une estimation du signal climatique, et sert de base aux corrections. Si cette série est de mauvaise qualité (et rien ne permet vraiment de prouver le contraire), alors les corrections sont biaisées.

La méthode de Vincent (1998) a été développée dans le but de détecter deux types d'inhomogénéités, les ruptures d'origine non climatique et les dérives, sans connaissance a priori des métadonnées de la station de mesure, et d'en fournir le positionnement dans le temps et l'amplitude. L'application du test de Vincent se déroule en au plus quatre étapes: i) une droite de régression linéaire est ajustée selon le principe des moindres carrés entre une ou plusieurs séries de référence supposées homogènes et voisines de la série candidate à critiquer, puis la significativité de l'auto-corrélation des résidus de la régression est testée selon le test de Durbin-Watson, ii) si une auto-corrélation significative des résidus est détectée, un second modèle d'ajustement est défini, iii) l'occurrence et l'amplitude d'une rupture d'homogénéité a priori inconnue est détectée selon le point i) par comparaison d'une variable indépendante représentant la dérive à la série de référence, iv) un nouveau modèle de régression est ajusté pour détecter une rupture

Fig. 7 b. Procédure de critique des séries de températures moyennes de l'air mensuelles et annuelles. Tn: température minimale - Tx: température maximale - Tm: température moyenne



- Station à données de précipitations et de températures brutes
- Station à données d'insolation homogénéisées
- Station à données de précipitation brutes et homogénéisées
- ▣ Station à données de précipitation homogénéisées
- Station à données de température brutes
- ◻ Station à données de température homogénéisées

Fig. 8. Réseau de stations de mesure mobilisées pour la critique des données historiques de température de l'air, de précipitation et de durée d'insolation de la «station climatologique de Luxembourg-ville» (coix rouge dans la figure).

Tab. 1. Ecart moyen mensuel en °C, entre une température moyenne journalière vraie (T24, 24 moyennes horaires), une température moyenne journalière déterminée à partir de 3 relevés tri-journaliers (T3) et une température moyenne journalière déterminée à partir des minima et maxima quotidiens (T2). D'après les données de température horaire fournies par le SMA sur la période 1986-2002.

	T24-T3	T24-T2	T3-T2
janvier	0.03	0.02	0.00
février	0.08	-0.13	-0.21
mars	0.14	-0.20	-0.34
avril	0.14	-0.18	-0.32
mai	0.04	-0.16	-0.21
juin	-0.07	-0.15	-0.08
juillet	0.00	-0.17	-0.17
août	0.18	-0.22	-0.40
septembre	0.14	-0.35	-0.50
octobre	0.05	-0.18	-0.23
novembre	-0.02	-0.04	-0.02
décembre	0.00	-0.02	-0.01

d'homogénéité et la présence d'une dérive avant et après ce point de rupture. Si des inhomogénéités persistent après ces 4 étapes, i.e. les résidus de régression sont toujours auto-corrélés, alors la série temporelle de la station candidate est scindée en deux. Les procédures d'Alexandersson et de Vincent ont été conçues pour la détection d'une rupture unique. Dans la grande majorité des cas les séries présentent plusieurs ruptures. Les résultats, basés sur le dépassement des valeurs critiques pour un niveau donné, sont alors faussés puisque l'on se place hors du cadre des hypothèses de départ. Les tentatives pour adapter ces tests à la détection de plusieurs ruptures sont peu rigoureuses d'un point de vue statistique (Caussinus & Mestre 2004). Par ailleurs, le problème des points aberrants est complètement négligé. Le recours obligatoire à une série de référence dont l'homogénéité n'est pas vérifiable sur de longues périodes est le second point faible. Les méthodes de construction utilisées ne garantissent pas l'absence de ruptures au sein de la série de référence. Cela conduit à des méthodologies peu rigoureuses. En pratique toutes les séries régionales à tester sont utilisées pour former une première série de référence. Les séries reconnues homogènes par rapport à cette référence sont utilisées pour former une deuxième série de référence qui à son tour sert à détecter les ruptures de toutes les séries. Par homogénéisations successives on essaie ainsi de séparer les séries à peu près homogènes et les autres pour ensuite retrouver la position des ruptures. Cette méthode très lourde donne des résultats acceptables, mais sans garanties que

les inhomogénéités aient toutes été détectées. Les procédures de correction reposent, elles aussi, sur l'existence d'une série de référence. Les climatologues sont conscients de ces faiblesses, et font largement appel aux archives de postes pour compenser les insuffisances des procédures. Mais ces métadonnées ne sont pas toujours complètes.

La méthode double pas de Caussinus-Mestre

L'application de cette méthode a été initialement effectuée dans le cadre du doctorat de Drogue (2003) et a permis de publier des résultats sur l'élévation de la température de l'air au Grand Duché de Luxembourg au cours des 50 dernières années, tenant compte des ruptures d'homogénéité et sans s'appuyer sur une ou des séries de référence supposées homogènes (Drogue *et al.* 2005). Le problème de la comparaison des séries de mesure climatologiques à une série de référence pseudo-homogène ainsi que le prévoient les tests d'Alexandersson ou de Vincent précédemment évoqués, peut être en effet contourné en adoptant le principe simple énoncé par Mestre (2000) lorsque cela est possible: « Entre deux ruptures, chaque série est homogène (par définition) et peut donc servir de référence. Si chaque série à tester est comparée individuellement à toutes les autres, un certain nombre de dates ruptures resteront constantes quelle que soit la série de comparaison. Elles pourront donc lui être attribuées ». L'approche de Caussinus-Mestre repose sur le triptyque suivant (Caussinus & Mestre 2004):

- i) La règle de Caussinus & Lyazrhi dans sa version « double-pas ». Celle-ci fournit un critère objectif pour la détection d'un nombre inconnu - et multiple - de ruptures et points aberrants dans un échantillon gaussien, ce qui n'est pas le cas des procédures actuellement en usage.
- ii) Des comparaisons multiples des séries à traiter entre elles permettant de s'affranchir de la constitution de séries de références homogènes.
- iii) La définition d'un nouveau modèle de correction, basé sur des séries non homogènes et permettant de reconstituer aussi les données manquantes.

Nous renvoyons à la lecture des travaux de Caussinus & Lyazrhi (1997) et de Caussinus & Mestre (2004) pour la démonstration et le formalisme statistique sous-jacent à cette nouvelle approche. Précisons que les performances de cette procédure sont directement liées au rapport entre l'amplitude des ruptures et l'écart-type σ des résidus de la série de comparaison. Ce dernier, comme le souligne Mestre (2000), est fortement conditionné par la corrélation entre postes voisins. La détection des ruptures s'applique au pas de temps annuel. Les corrections s'appliquent au pas de temps mensuel pour les températures et au pas de temps annuel pour les précipita-

tions. Notons que le modèle de correction utilisé pour les températures repose sur l'hypothèse suivante: toutes les séries prises en compte dans le modèle de correction doivent avoir le même signal climatique, ce qui pour une zone de la taille du Luxembourg est une conjecture acceptable. Le modèle de correction est initialisé avec les dates de rupture validées, en $i1$, $i2$ et $i3$ sur la Fig. 9. Sur une série de n années, les coefficients correcteurs mensuels sont calculés par rapport à la période homogène la plus récente, matérialisée en orange dans l'exemple de la Fig. 9. Ces coefficients sont ajoutés aux données de températures mensuelles originales pour obtenir les données homogénéisées. Ils permettent également de reconstituer, *via* un modèle linéaire, les valeurs de températures manquantes. La distinction entre amplitude des sauts successifs ($a1$, $a2$, $a3$) et coefficients correcteurs (coef. 1, coef. 2, coef. 3) est décrite sur la Fig. 9 dans le cas d'une série des différences sur les températures maximales annuelles à ruptures d'homogénéité multiples.

Pour des raisons de coût financier, la méthodologie de Caussinus-Mestre n'a pu être malheureusement appliquée qu'aux données mensuelles de la température de l'air des 50 dernières années en s'appuyant sur un réseau de stations climatologiques luxembourgeoises voisines de l'aéroport, dernier site occupé par la « station

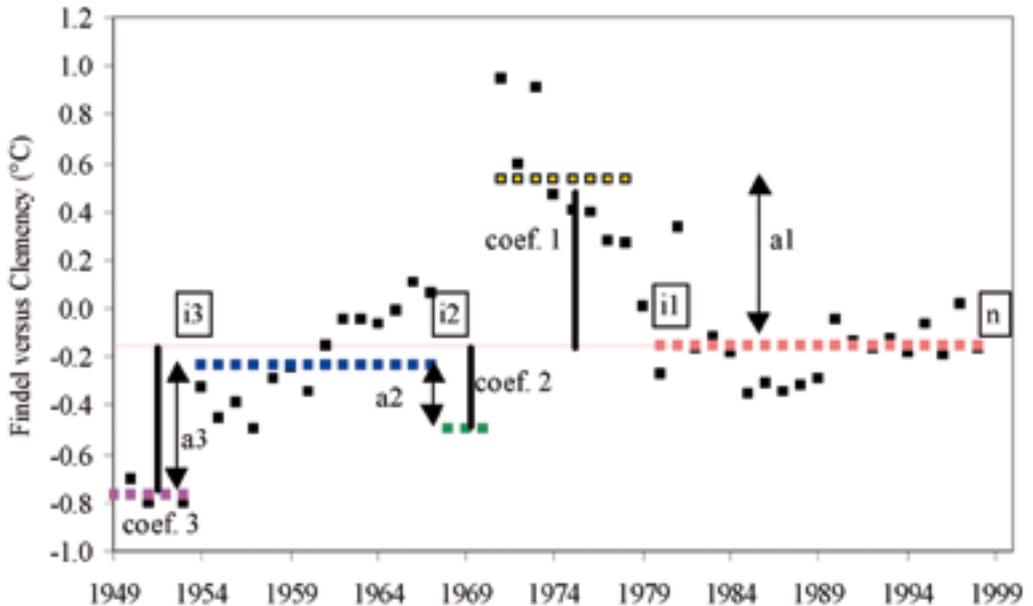


Fig. 9. Différence entre amplitude des ruptures et coefficients correcteurs (exemple de la série des différences sur les températures maximales annuelles des stations de Findel aéroport et Clemency). Adapté d'après Mestre (2000): $i1$, $i2$, $i3$ = dates des ruptures d'homogénéité; $a1$, $a2$, $a3$ = amplitude des ruptures d'homogénéité; coef.1, coef.2, coef.3 = coefficients de correction déterminés par rapport à la dernière période homogène s'étendant de $i1$ à n .

climatologique de Luxembourg-ville » (Fig. 7 b étapes 2a et 2 b) (Fig. 8) (Drogue *et al.* 2005). Les algorithmes d’Alexandersson et de Vincent ont été utilisés ensuite pour homogénéiser les valeurs de température antérieures à 1947 (Fig. 7 b étape 3a) par rapport aux données de température issues de l’étape 2b. Toutefois les tests d’Alexandersson et de Vincent ont pu être appliqués aux données brutes de température de l’air de Luxembourg-ville antérieurement à 1947 (Fig. 7 b étape 1b et 3a), en se basant sur les séries des températures maximales et minimales mensuelles de Metz-Frescaty (1899-2000, 190 m d’altitude), continues et homogénéisées d’après la méthode de Caussinus-Mestre et aimablement communiquées par M. Moisselin (Météo-France, Direction de la Climatologie), qui mène également un travail d’homogénéisation des longues séries de données climatologiques françaises (Moisselin *et al.* 2002). Cette station de mesure n’étant distante que de 40 km à vol d’oiseau de Luxembourg-ville, elle appartient au même type d’unité climatique que la « station climatologique de Luxembourg-ville » (Fig. 8), ce qui n’exclut pas des effets topoclimatiques locaux susceptibles de différencier les deux stations climatologiques comme nous le verrons plus loin à propos de février 1998. Les séries des températures maximales et minimales mensuelles homogènes de Metz-Frescaty nous ont permis de calculer des séries mensuelles de températures moyennes de référence, réellement homogènes et de combler les lacunes de la période s’étendant de 1899 à 1906. La formule simple et dérivée de Alexandersson (1986), a été utilisée pour le comblement d’une lacune:

$$T_{i,0} = T_{i,j} + (\bar{T}_0 - \bar{T}_j) \quad (1)$$

où $T_{i,0}$ est la valeur manquante du mois i estimée pour la station-cible 0 à partir des températures du mois i des stations voisines j (en °C), \bar{T}_0 et \bar{T}_j sont les moyennes interannuelles des températures mensuelles aux stations 0 et j . Dans notre configuration, la station-cible 0 correspond à la « station climatologique de Luxembourg-ville » et la station voisine j à Metz-Frescaty.

L’ensemble des ruptures ou dérives détectées à l’aide des 3 méthodes statistiques évoquées ci-dessus a été confronté à l’historique de la « station climatologique de Luxembourg-ville », tel que nous avons pu le reconstituer à partir des ouvrages de Lahr (1950; 1964), Neu (1996) et de discussions avec E. Kirpach du SMA (Service Météorologique de l’Aéroport) du Luxembourg.

3.2.2. Les précipitations

Les modalités de critique des données de précipitations appliquées aux différents pas de temps sont résumées sur la Fig. 10. Elles appellent un certain nombre d’explications ou de commentaires

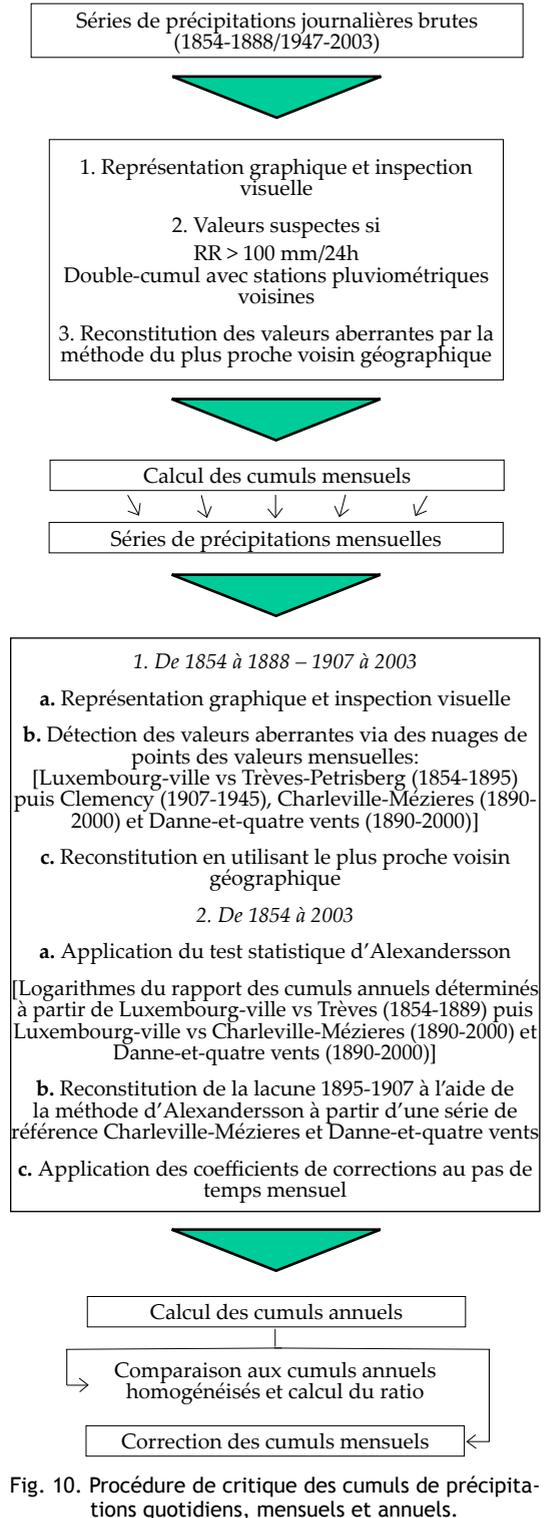


Fig. 10. Procédure de critique des cumuls de précipitations quotidiens, mensuels et annuels.

consignés ci-dessous. Les stations de mesure subsidiaires utilisées pour la critique des données de précipitation sont reportées sur la Fig. 8.

3.2.2.1. Les séries journalières (1854-1888/1947-2003)

La notion de limite physiquement plausible (Fig. 10 étape 2) a été alignée sur les fortes précipitations historiques enregistrées dans les régions limitrophes du Luxembourg. Le Service Météorologique Belge (IRM) signale un cumul de 119 mm d'eau en vingt-quatre heures à Amel, le 04 juillet 1975, dans la province de Liège, sous forme d'averses orageuses. Le 27 décembre 1947, il pleut abondamment en Gaume et l'on mesure 74 mm au pluviomètre à Chiny situé entre Bastogne et Arlon (Brouyaux *et al.* 2004). Le maximum pluviométrique journalier enregistré à la station synoptique de Trèves s'élève à 71.1 mm d'après la série homogénéisée de 1908-1998. Celle-ci émane du programme européen ECA (European Climate Assessment) (<http://www.eca.knmi.nl/> et Tank *et al.* 2002), bien que nous ayons montré que la procédure d'homogénéisation mise en œuvre dans le cadre de ce programme sur les données de précipitation de l'aéroport du Luxembourg n'était pas suffisamment performante (Drogue *et al.* 2005). Nous avons donc retenu arbitrairement la valeur limite de 100 mm/24 h pour qualifier un cumul journalier de suspect.

3.2.2.2. Les séries mensuelles et annuelles (1854-2003)

Pour la détection et la reconstitution des valeurs aberrantes sur les cumuls mensuels (Fig. 10 étape 1b et 1c), sur la période 1854-1889, c'est la série mensuelle de précipitations enregistrée à la station climatologique synoptique de Trèves-Petrisberg (49°7 N-6.7°E, 265 m.) localisée en Allemagne, en bordure de Moselle, à 30 km de Luxembourg-ville en direction de l'ENE qui a été utilisée (<http://wetterzentrale.de/klima/ptrierp.html>). Il s'agit d'une série de mesure différente de celle évoquée plus haut au sujet de l'ECA. Outre certains postes pluviométriques voisins de celui de la « station climatologique de Luxembourg-ville » ouverts de 1907 à 1945, comme celui de Clémency dont les cumuls mensuels sont consignés dans Lahr (1950) (Fig. 10 étape 1b), les longues séries de précipitation mensuelles continues et homogénéisées par la méthode de Caussin-Mestre de Charleville-Mézières (140 m) et Danne-et-quatre-vents (377 m) (Fig. 8) ont été également utilisées, sur la période 1890-2002, comme séries de référence (aimable communication de M. Moisselin) et notamment pour le comblement de la lacune de mesure entre 1896 et 1906 (Fig. 10 étape 2b). Les mêmes séries de référence (Fig. 10 étape 2a) ont permis d'appliquer la méthode d'Alexandersson à la série de comparaison $Q = t(q_1, q_2, \dots, q_n)$ avec

$q_i = \log(y_i/x_i)$ pour $i = 1, \dots, n$, comme cela est prévu pour les paramètres climatologiques cumulatifs. Pour le comblement de la période lacunaire 1896-1906 la formule devient (Alexandersson 1986):

$$RR_{i,0} = \sum_{j=1}^k [RR_{i,j} (\overline{RR}_0 / \overline{RR}_j) \cdot \varphi_j^2] / \sum_{j=1}^k \varphi_j^2 \quad (2)$$

où $R_{i,0}$ est la valeur manquante du mois i estimée pour la station-cible 0 à partir des précipitations du mois i des stations voisines j (en mm), R_0 et R_j sont les moyennes interannuelles des précipitations mensuelles aux stations 0 et j ; φ_j^2 est le carré du coefficient de corrélation entre la station-cible et les stations de référence. Dans notre configuration, la station-cible 0 correspond à la « station climatologique de Luxembourg-ville » et les stations voisines j à Charleville-Mézières et Danne-et-quatre-vents.

3.2.3. La durée d'insolation

Les modalités de critique des données d'insolation appliquées aux différents pas de temps

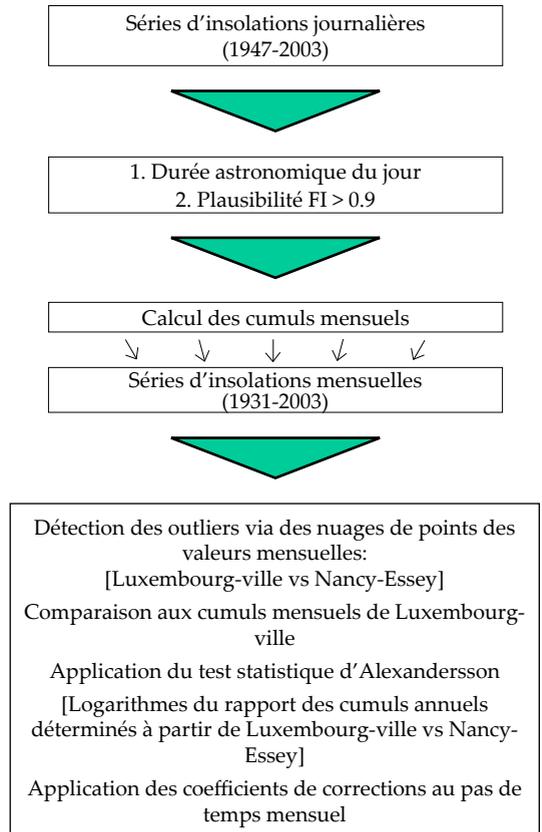


Fig. 11. Procédure de critique des cumuls d'insolation mensuels et annuels.

sont résumées sur la Fig. 11. Elles appellent un certain nombre d'explications ou de commentaires consignés ci-dessous. La localisation de la station de mesure de Nancy-Essey utilisée pour la critique des données d'ensoleillement est reportée sur la Fig. 8.

3.2.3.1. Les séries quotidiennes (1947-2003)

Les valeurs de durée d'insolation de la station de Findel-aéroport excédant la durée astronomique du jour ont été corrigées sur la base de celle-ci, les conditions d'implantation du capteur sur un plateau dégagé ne générant pas de masque significatif malgré, au coucher du soleil, la présence d'un hangar vers l'ouest (photo 2 a). La plausibilité « FI > 0.9 » doit s'entendre ainsi: une fraction d'insolation dépassant 0.9 pendant 3 jours successifs est peu compatible avec des valeurs de précipitations significatives (>1 mm).

3.2.3.2. Les séries mensuelles et annuelles (1931-2003)

La méthode d'Alexandersson a été appliquée à la série de comparaison $Q = t(q_1, q_2, \dots, q_n)$ avec $q_i = \log(y_i/x_i)$ pour $i = 1, \dots, n$, comme cela est prévu pour les paramètres climatologiques cumulatifs (Alexandersson 1986). Les longues séries d'insolation mensuelles continues et homogénéisées par la méthode de Caussinus-Mestre de Nancy-Essey (Fig. 8) ont été utilisées sur la période 1931-2002 comme séries de référence (aimable communication de M. Moisselin). Les valeurs douteuses ont été corrigées selon l'équation 2 ci-dessus.

4. Résultats de la procédure de critique et d'homogénéisation des longues séries climatologiques

4.1. La température de l'air

4.1.1. Les séries quotidiennes de température moyenne (1854-1888/1947-2003)

L'application des critères de plausibilité LIM et ROC de la Fig 7 a étape 2 à la série trentenaire des températures moyennes journalières 1854-1888 n'a pas révélé de valeurs aberrantes, ni d'anomalies flagrantes dans la distribution temporelle des observations (Fig. 12). Des valeurs de températures moyennes journalières identiques pendant trois jours consécutifs (NOC) ont néanmoins été décelées. Elles procèdent à la fois de combinaisons identiques de valeurs tri-horaires différentes et également d'une résolution variable des observations, qui ont été effectuées à 0.5° C près à partir de mi-1876, alors qu'elles étaient effectuées à 0.2°C près antérieurement. Concernant le critère ROC appliqué à la série journalière de Findel-aéroport, la plupart des valeurs détectées sont associées

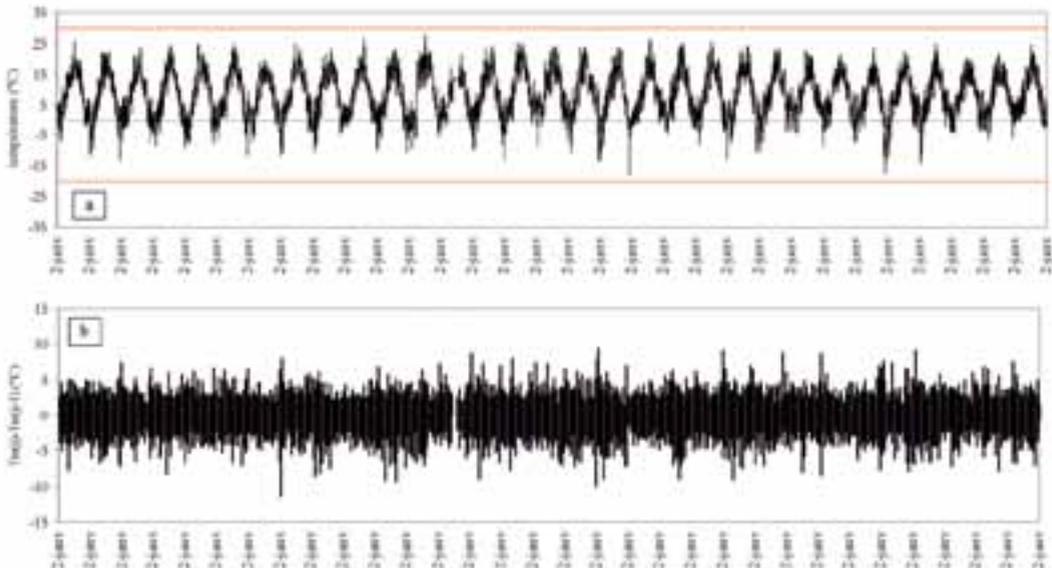


Fig. 12. Chroniques météorologiques journalières du 19^{ème} siècle: période 1854-1888. a- critère LIM b-critère NOC.

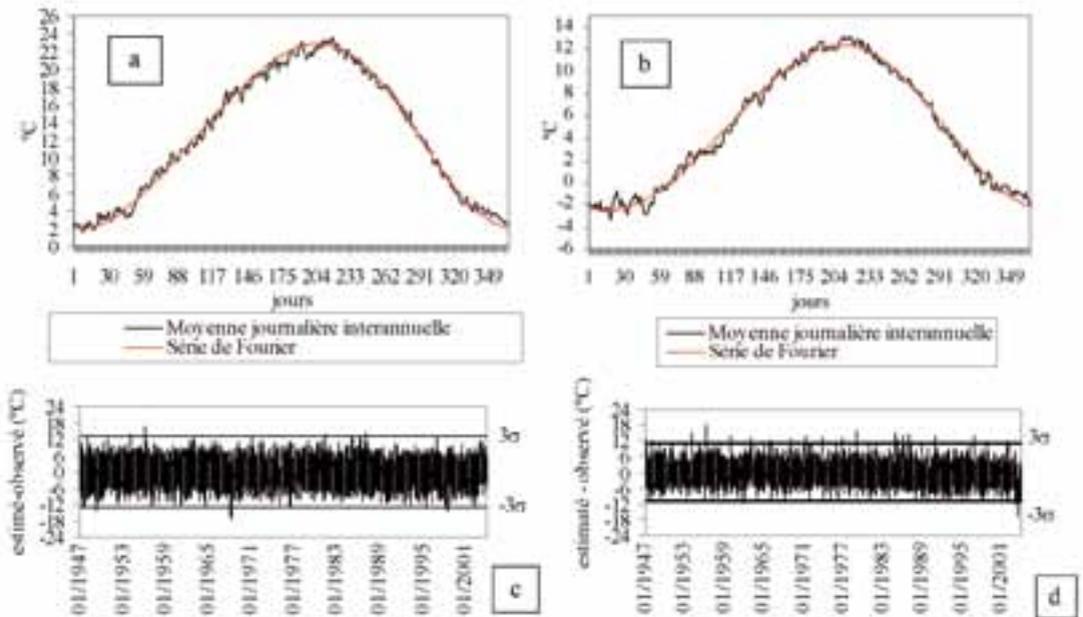


Fig. 13. Filtrage des températures journalières maximales (c) et minimales (d) par le seuil de $\pm 3 \sigma$ sur les résidus après désaisonnalisation (a-b) (période 1947-2003).

à des changements de masses d'air (passage de front) et de circulation atmosphérique. Pour le critère NOC, les rares occurrences de températures minimales ou maximales quotidiennes se répétant trois jours d'affilée n'ont pas été supprimées de la série compte tenu de leur incidence négligeable sur la détermination des indices de température. Sur la période 1947-2003, les séries quotidiennes de températures minimales et maximales mesurées à la station climatologique de Findel-aéroport ont été désaisonnalisées par une série de Fourier à deux harmoniques (Fig. 13 a et b) établies sur les moyennes journalières interannuelles et dont les coefficients sont donnés dans le Tab. 2. Comme indiqué précédemment, sous une hypothèse de normalité, les écarts entre les températures moyennes journalières et leurs homologues modélisés par l'analyse de Fourier, devraient très majoritairement osciller dans un couloir de $\pm 3 \sigma$, seules les valeurs extrêmes du régime thermique sortant de ce couloir. Les chroniques journalières de l'ensemble de la période d'observation 1947-

2003 respectent ce critère, et seules les phases thermiques associées à des masses d'air très chaud ou très froid, franchissent le seuil de $\pm 3 \sigma$ (Fig. 13 c et d).

Les résultats de l'étape 3 de la Fig. 7 a (Fig. 14) indiquent que les observations effectuées par le professeur Reuter-Chomé sont plausibles aux heures indiquées par l'auteur, et qu'elles restituent une amplitude thermique diurne saisonnière conforme à ce que l'on peut observer à partir de mesures récentes effectuées à la station météorologique de l'aéroport.

4.1.2. Les séries mensuelles de températures extrêmes (1947-2003)

La méthode de Caussinus-Mestre (Fig. 7 b 2a) ne détecte aucune rupture d'homogénéité sur les températures maximales enregistrées à la « station climatologique de Luxembourg-ville »

Tab. 2. Coefficients des harmoniques de la série de Fourier ajustée aux températures minimales et maximales moyennes journalières

Période	Tx		Tn	
	Coef(a ₁₁)	Coef(a ₁₂)	Coef(a ₂₁)	Coef(a ₂₂)
365	-10.0	-2.5	-6.9	-2.7
182	-0.5	0.6	-0.2	0.3

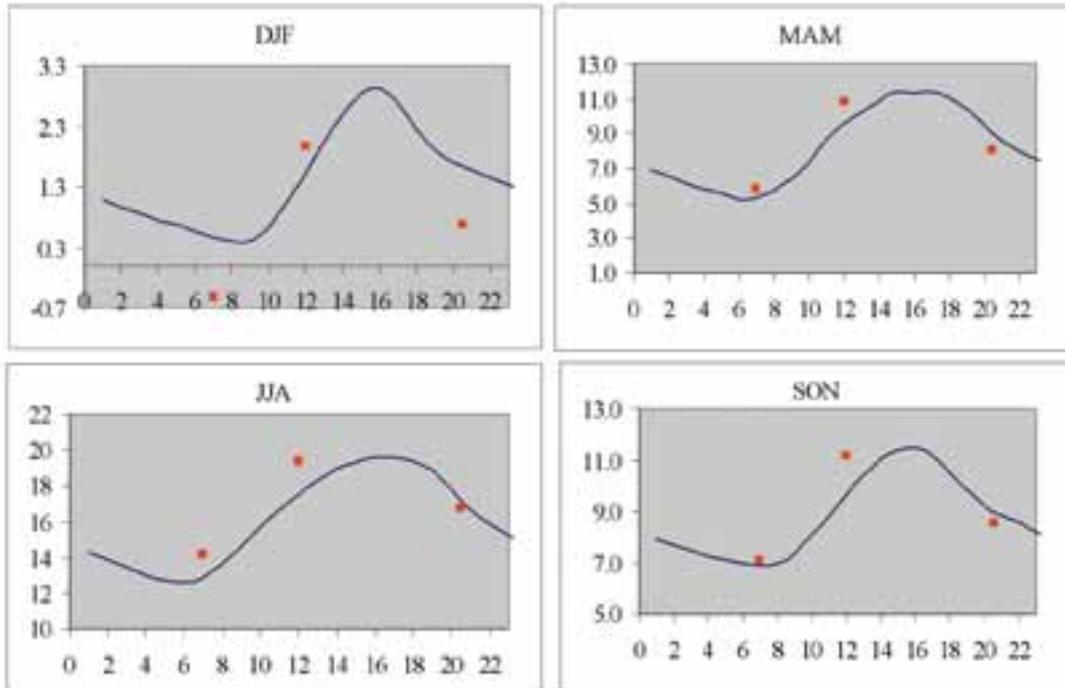


Fig. 14. Comparaison saisonnière, en °C, entre la course journalière de la température de l'air à la station météorologique de Findel-aéroport (période 1986-1992, trait continu bleu) et les observations tri-journalières du Professeur Reuter-Chomé (1854-1888, points rouges).

sur la période 1947-2003. Dans la mesure où les changements de site ont concerné une zone assez homogène d'un point de vue topographique (plateau dégagé de l'aéroport), il est compréhensible que ceux-ci n'aient pas affecté sensiblement la température maximale moyenne annuelle. En revanche, un saut correspondant à une rupture d'homogénéité en 1988, a bien été détecté par la procédure de Caussinus-Mestre sur les températures minimales annuelles. L'ouvrage de Neu (1996) confirme effectivement le déplacement du parc météorologique de l'aéroport à cette date. Les coefficients correcteurs mensuels du Tab. 3 ont donc été ajoutés aux températures minimales mensuelles antérieures de la période 1947-1988. Notons que les autres déplacements du parc météorologique de l'aéroport mentionnés par Neu (1996), ainsi que le passage de l'abri Stevenson à l'abri miniature en 1985 (cf. Fig. 5), n'ont pas introduit de rupture d'homogénéité susceptible

d'être détectée par la méthode de Caussinus-Mestre dans les séries de températures extrêmes.

4.1.3. Les séries mensuelles de température moyenne (1838-2003)

L'ensemble des résultats de la procédure d'homogénéisation de la Fig. 7 b étapes 1 et 3 sont présentés dans le Tab. 4. Les coefficients correcteurs sont ajoutés aux données de température brutes et ont été déterminés par comparaison aux séries de température moyenne homogénéisées de la période 1947-2003 (Fig. 7 b étape 2). Les ruptures d'homogénéité correspondent très généralement à des changements de site connus de la « station climatologique de Luxembourg-ville » qui ont affecté le comportement moyen des séries de mesure. Ainsi, les dates de 1853, 1907, 1926 ou

Tab. 3. Coefficients correcteurs mensuels (en °C) ajoutés avant 1988 à la série des températures minimales de la « station climatologique de Luxembourg-ville » sur la période 1947-2003. D'après l'algorithme d'homogénéisation de Caussinus-Mestre.

janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
0.4	0.5	0.8	0.5	1.0	0.5	0.6	0.8	0.4	0.3	0.3	0.4

Tab. 4. Coefficients correcteurs mensuels (en °C) appliqués aux sous-séries homogènes de la température moyenne de l'air mesurée à la « station climatologique de Luxembourg-ville » de 1838 à 1946. En italique: années pour lesquelles la température du mois concerné a été reconstituée. Δ: coefficients correcteurs variables d'année en année selon la méthode de Vincent.

janvier	février	mars	avril	mai	juin
1838 ⇒ 1845 (-0.8)	1838 ⇒ 1847 (-0.9)	1838 ⇒ 1850 (Δ)	1838 ⇒ 1844 (Δ)	1838 ⇒ 1888 (Δ)	1839 ⇒ 1840 (-0.1)
1846 ⇒ 1853 (+0.3)	1848 ⇒ 1853 (+0.2)	1851 ⇒ 1853 (-0.5)	1845 ⇒ 1853 (+0.2)	1889 ⇒ 1895 (-0.1)	1841 ⇒ 1846 (-2.1)
1854 ⇒ 1868 (-0.3)	1854 ⇒ 1889 (Δ)	1858 ⇒ 1889 (Δ)	1854 ⇒ 1888 (Δ)	1907 ⇒ 1913 (-0.3)	1847 ⇒ 1851 (-2.2)
1874 ⇒ 1888 (-0.3)	1890 ⇒ 1895 (+0.2)	1890 ⇒ 1895 (+0.1)	1889 ⇒ 1895 (+0.2)	1914 ⇒ 1926 (-1.0)	1854 ⇒ 1889 (Δ)
1889 ⇒ 1895 (-1.2)	1913 ⇒ 1926 (+0.8)	1907 ⇒ 1915 (-0.1)	1907 ⇒ 1913 (-0.2)	1928 ⇒ 1944 (+0.2)	1890 ⇒ 1895 (-0.4)
1907 ⇒ 1926 (+0.4)		1916 ⇒ 1926 (-0.6)	1914 ⇒ 1926 (-1.1)	1945 ⇒ 1946 (-0.4)	1914 ⇒ 1926 (-1.1)
		1927 ⇒ 1944 (+0.3)	1927 ⇒ 1944 (+0.4)		1927 ⇒ 1944 (+0.1)
		1945 ⇒ 1946 (-0.3)	1945 ⇒ 1946 (-0.1)		1945 ⇒ 1946 (-0.6)
<i>1847/1869 1871/1873 1896-1906</i>	<i>1842/1846 1856-1857 1896-1906</i>	<i>1843/1850 1870/1879 1886/1889 1895 1896-1906 1930 1941</i>	<i>1838-1842 1895-1906</i>	<i>1838 1896-1906 1927</i>	<i>1838 1852-1853 1896-1906 1927</i>
juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1838 ⇒ 1895 (Δ)	1838 ⇒ 1853 (-0.4)	1838 ⇒ 1853 (-0.7)	1838 ⇒ 1853 (+0.9)	1838 ⇒ 1853 (-1.1)	1838 ⇒ 1853 (-0.1)
1907 ⇒ 1915 (-0.4)	1838 ⇒ 1887 (Δ)	1854 ⇒ 1884 (Δ)	1854 ⇒ 1884 (Δ)	1854 ⇒ 1887 (Δ)	1854 ⇒ 1888 (Δ)
1916 ⇒ 1926 (-0.8)	1888 ⇒ 1895 (-2.6)	1888 ⇒ 1895 (-1.8)	1885 ⇒ 1895 (+0.9)	1888 ⇒ 1895 (-0.9)	1888 ⇒ 1895 (-0.1)
1927 ⇒ 1935 (-0.1)	1907 ⇒ 1926 (-0.2)	1907 ⇒ 1926 (-0.5)	1907 ⇒ 1926 (-0.2)	1907 ⇒ 1913 (-0.3)	1907 ⇒ 1913 (-0.5)
1936 ⇒ 1945 (+0.5)	1927 ⇒ 1944 (+0.6)	1927 ⇒ 1944 (+0.3)	1928 ⇒ 1943 (+0.7)	1914 ⇒ 1926 (-1.0)	1914 ⇒ 1926 (-1.1)
1946 (-1.0)	1945 ⇒ 1946 (-0.8)	1945 ⇒ 1946 (-0.8)	1945 ⇒ 1946 (-0.2)	1927 ⇒ 1944 (-0.3)	1927 ⇒ 1944 (-0.4)
				1945 ⇒ 1946 (-0.8)	1945 ⇒ 1946 (-0.6)
<i>1896-1906 1926</i>	<i>1839-1840 1845 1892 1896-1906 1926</i>	<i>1838 1846-1847 1896-1906</i>	<i>1847 1896-1906 1911/1927 1944</i>	<i>1838 1844-1845 1896-1906</i>	<i>1840/1912 1940 1896-1906</i>

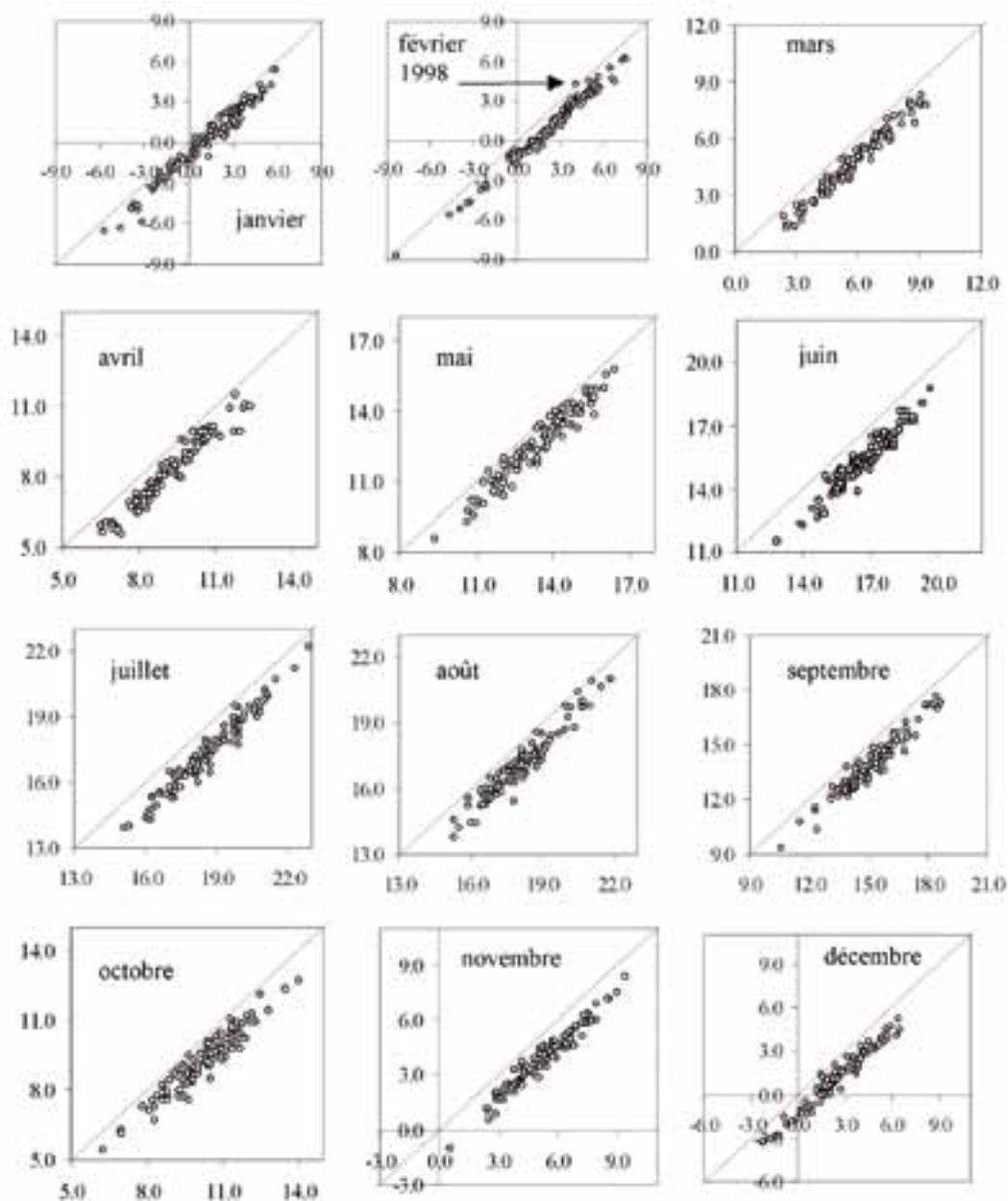


Fig. 15. Comparaison entre les températures moyennes mensuelles (en °C) de Metz-Frescaty (série homogénéisée par Météo-France en abscisse) et la « station climatologique de Luxembourg-ville » (série homogénéisée en ordonnée) sur la période 1899-2000.

encore 1945 sont récurrentes. Un certain nombre de mois présentant manifestement des anomalies par rapport aux stations de référence de Francfort, Strasbourg-Entzheim et surtout Metz-Frescaty ont

dû être reconstitués (Tab. 4). Ils se concentrent essentiellement au cours du 19^{ème} siècle, siècle durant lequel les conditions de mesure thermométrique ont été plus précaires.

4.1.4. Comparaison des températures moyennes mensuelles homogénéisées de la « station climatologique de Luxembourg-ville » et de Metz-Frescaty sur la période 1899-2003

Les nuages de points de la Fig. 15 indiquent une bonne adéquation des deux séries climatologiques pour la totalité des mois de l'année et le respect du gradient thermique vertical moyen, la station climatologique de Metz-Frescaty (190 m) devant être plus chaude en moyenne que celle de Luxembourg ville (370 m). Un point, caractérisé par un écart de température positif entre Luxembourg-ville et Metz-Frescaty mérite néanmoins un commentaire. Il s'agit du mois de février 1998. La consultation du Météo-Hebdo n°6, bulletin hebdomadaire de Météo-France qui retrace l'évolution du temps en France, indique, qu'un temps froid sec avec formation de brouillards givrants de fond de vallée a prévalu dans la semaine du 02 au 08 février 1998 dans la vallée de la Moselle. Les inversions thermiques de basse couche qui se sont répétées à plusieurs reprises provoquent un

écart sur les minimas qui atteint 0.6°C en moyenne mensuelle à l'aéroport du Findel contre -1.6°C à Metz-Frescaty. Elles sont suffisantes pour infléchir la température moyenne journalière et rendre le mois de février plus doux à Luxembourg-ville (sous-entendu aéroport du Findel) par rapport à Metz-Frescaty.

4.1.5. Comparaison des températures moyennes mensuelles homogénéisées de la « station climatologique de Luxembourg-ville » et du fichier CRU (Climate Research Unit) sur la période 1851-2003

La Fig. 16 retrace les anomalies de la température annuelle par rapport à la normale 1961-1990 pour la « station climatologique de Luxembourg-ville » (Fig. 16 a) et la climatologie de Jones et Moberg (2003) au point de grille $47.5^{\circ}\text{N}-7.5^{\circ}\text{E}$ (Fig. 16 b) proche du Grand-Duché de Luxembourg (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>). Les périodes froides et chaudes sont globalement

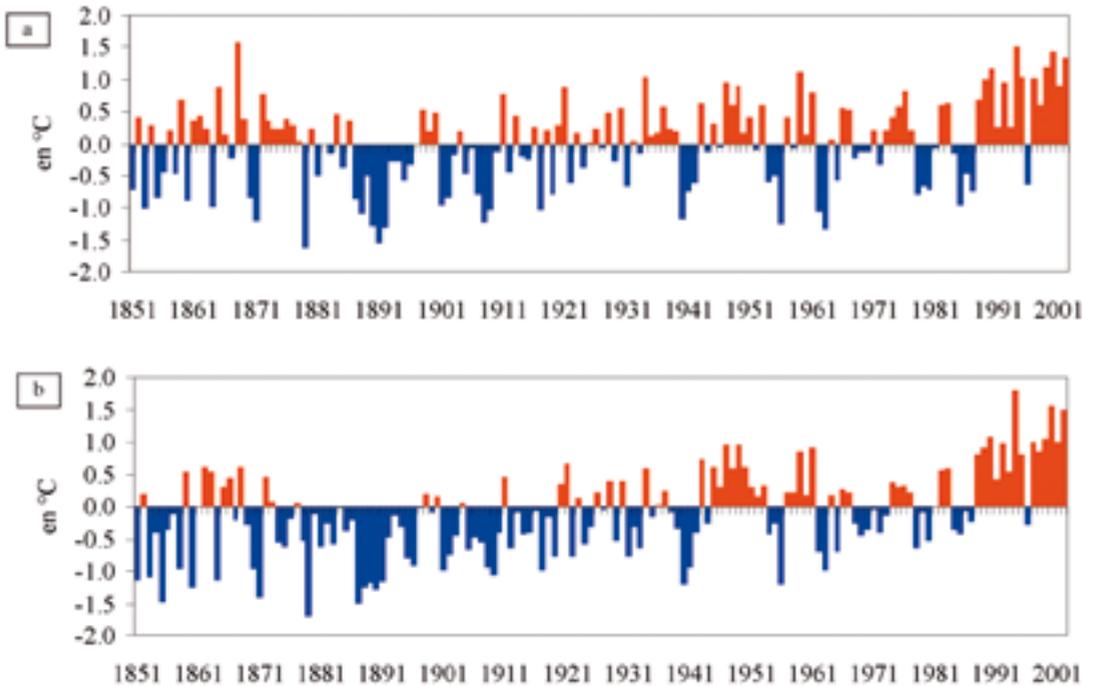


Fig. 16. Variations négatives et positives de la température annuelle par rapport à la normale 1961-1990 sur la période 1851-2003:

a - « station climatologique de Luxembourg-ville »

b - Climatologie de Jones et Moberg (2003) au point de grille $47.5^{\circ}\text{N}-7.5^{\circ}\text{E}$ (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>).

communes et la co-variation des deux climatologies s'avère satisfaisante. Seule la période s'échelonnant de 1851 à 1870 et particulièrement la décennie 1868-1878 les différencie assez nettement, le nombre d'occurrence d'années douces étant plus élevé pour la « station climatologique de Luxembourg-ville » que le point de grille de Jones et Moberg. En particulier, l'amplitude de l'anomalie de 1868 à la « station climatologique de Luxembourg-ville » (Fig. 16 a) dépasse d'un degré C environ celle du point de grille (Fig. 16 b) et place l'année 1868 au même rang que 2003 pour la température moyenne annuelle. Deux éléments peuvent expliquer cette divergence: i) d'une part le fait que la climatologie de Jones et Moberg intègre une entité géographique beaucoup plus grande que celle que représente la « station climatologique de Luxembourg-ville »; ii) le professeur Reuter-Chomé dans sa chronique annuelle des événements météorologiques qu'il tient en parallèle de ces relevés (Reuter-Chomé 1890), note que la plupart des mois de l'année 1868 ont été particulièrement doux et que la récolte de raisins a été très abondante. Les données confirment cette affirmation et ce sont les mois de mai et singulièrement de décembre 1868 qui sont responsables de la température moyenne exceptionnellement élevée de cette année à «la « station climatologique de Luxembourg-ville »». Il y a donc un certain nombre d'éléments historiques qui permettent de penser que 1868 a été une année effectivement très douce, même si un doute demeure sur l'ampleur réelle de l'anomalie chaude.

Tab. 5. Années de correction des totaux pluviométriques mensuels enregistrés à la «station climatologique de Luxembourg-ville» sur la période 1854-2003 et pluviographes de référence utilisés pour la correction.

janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
1865	1865	1879	1869	1865	1874	1855	1854	1882	1912	1864	1860
1871	1866	1881	1869	1865	1908	1909	1913	1913	1924	1868	1868
1876	1867	1888	1923	1872	1910	1913	1924	1924	1934	1869	1880
1880	1893	1895	1924	1908	1913	1924	1927	1932		1871	1887
1882		1924		1913	1924		1931			1913	1895
1891				1924						1924	1913
1894										1926	1924
1924											

	Trèves-Petrisberg (wetterzentrale.de)
	Clemency (Eugène Lahr, 1950)

4.2. Les précipitations

4.2.1. Les séries quotidiennes (1854-1888/1947-2003)

Aucun cumul journalier ne dépasse 100 mm/j sur l'ensemble des deux périodes de mesure. Les doubles-cumuls établis entre la « station climatologique de Luxembourg-ville » et les pluviographes voisins n'ont pas révélé de dérive particulière.

4.2.2. Les séries mensuelles et annuelles (1854-2003)

Un certain nombre de mois manifestement douteux ont fait l'objet de corrections par rapport aux pluviographes de référence (Fig. 10 étape 1) comme l'indique le Tab. 5. Les valeurs brutes des mois de juin 1979 et d'août 1990 indiquaient un total pluviométrique respectivement insuffisant et excessif avec un écart de plus de 20 mm dans le premier cas et de plus de 40 mm dans le second par rapport aux postes pluviométriques les plus proches mais également par rapport à l'ensemble des pluviomètres luxembourgeois en fonctionnement à cette époque (ASTA 1979, 1990). Cet écart paraît difficilement imputable à des orages localisés. Les coefficients correcteurs, correspondant à autant de ruptures d'homogénéité, appliqués aux totaux mensuels et annuels sur la période 1854-1990 par rapport à la période

1991-2003 (Fig. 10 étape 2) sont les suivants: 1907 ->1926: 0.95, 1927 -> 1946: 1.03, 1946 -> 1984: 0.91, 1985 -> 1990: 0.79.

4.2.3. Comparaison des cumuls de précipitation annuels de la «station climatologique de Luxembourg-ville» et de Trèves (série homogénéisée ECA)

La représentation de l'évolution concomitante des hauteurs pluviométriques annuelles aux deux stations fait apparaître une bonne co-fluctuation des deux courbes sur la période 1908-1998 (Fig. 17).

4.3. La durée d'insolation

4.3.1. Les séries quotidiennes (1947-2003)

L'application du critère « durée astronomique du jour » (Fig. 11) a permis d'identifier 2 jours (05/12/1962 et 03/08/1994) fortement radiatifs présentant une durée d'insolation supérieure au maximum possible. Ces derniers probablement imputables à des erreurs de transcription ont été ramenés à la durée astronomique du jour. Par ailleurs, les durées d'insolation maximales journalières ont été extraites pour chaque mois de l'année et représentées pour l'ensemble de la période de mesure, sous l'hypothèse que leur magnitude doit rester constante au cours du temps. En effet, si la série climatologique est véritablement homogène, il n'y a aucune raison, en supposant que la durée d'insolation maximale possible est atteinte à chaque fois, pour que par exemple, la durée d'insolation maximale mensuelle du mois de janvier 1963 soit inférieure à celle de janvier 1998. On peut constater,

après ajustement par régression linéaire, que la magnitude de la durée d'insolation quotidienne maximale est constante pour 10 mois sur 12 entre 1954 et 2000 (Fig. 18 a et b). Seuls les mois d'avril et d'août (après correction de l'erreur de transcription) présentent une dérive positive (Fig. 18 b), uniquement significative pour ce dernier, selon le test T de Student appliqué aux seuils de 1 et 5 % à la pente de la droite de régression en gris sur la Fig. 18 b. Il est possible que la succession d'étés ensoleillés des années 1993 à 1996, conjuguée à une imprécision de lecture ou de transcription, puisse expliquer cette dérive. M. Aberfeld (ancien chef du SMA du Findel) nous a confirmé que le changement d'observateur pouvait engendrer une imprécision de lecture de ce paramètre de l'ordre d'une ½ heure et que l'Institut Royal Météorologique de Belgique, à qui ont été transmises ces données d'insolation, ne les a pas trouvées aberrantes en comparaison avec l'ensoleillement mesuré par le réseau météorologique belge. Une autre explication non métrologique possible à cette dérive, serait que l'occurrence des journées à durée d'insolation maximale se produise préférentiellement en début de mois, en fin de période de mesure par rapport au commencement (la durée du jour étant légèrement supérieure en début qu'en fin de mois), ce qui après vérification n'est pas le cas.

L'application du critère de plausibilité (Fig. 11) a permis de détecter la présence conjointe d'une séquence ensoleillée et de précipitation. Après examen des données de température et de précipitation (0.2 mm) enregistrées durant cette séquence (24-25/01/2000), il s'est avéré qu'il avait neigé le 23 janvier et donc que les précipitations du 24 correspondaient en réalité à de l'eau de fusion nivale.

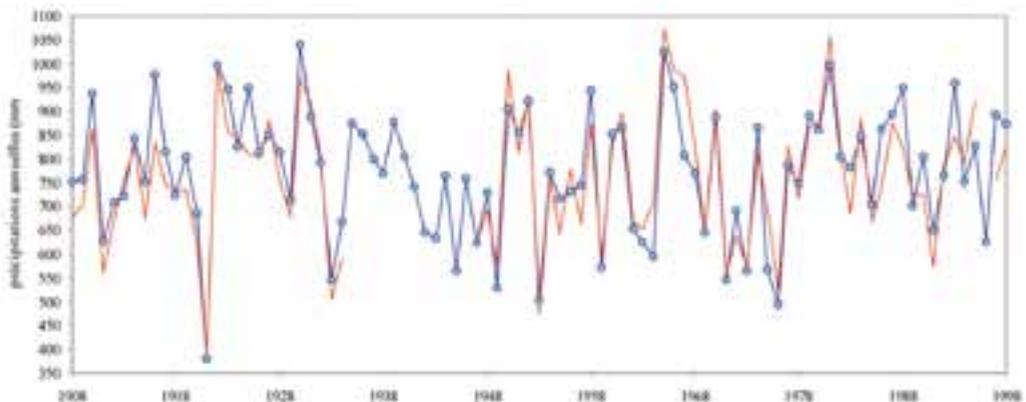


Fig. 17. Evolution comparée des totaux pluviométriques annuels de 1908 à 1998 aux stations climatologiques de Luxembourg-ville (en bleu) et de Trèves (D) (en rouge, discontinuités dues aux données manquantes).

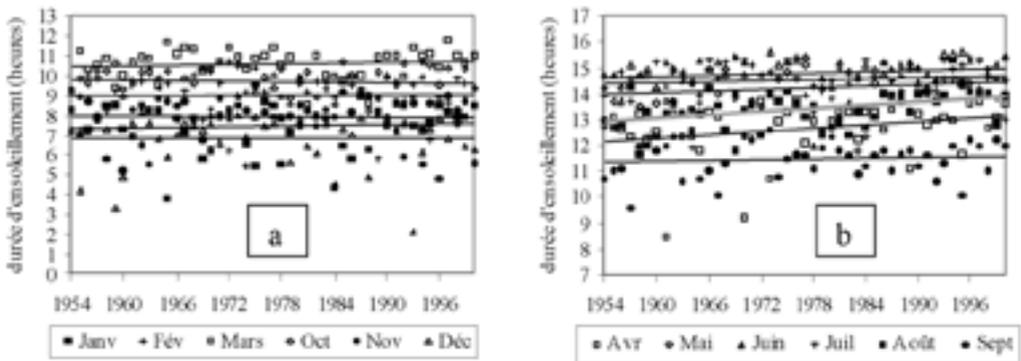


Fig. 18. Evolution mensuelle de la durée d'insolation quotidienne maximale sur la période 1954-2000 (Findel-aéroport). a: semestre hivernal; b: semestre estival.

4.3.2. Les séries mensuelles et annuelles (1931-2003)

La comparaison des cumuls d'insolation de la station climatologique de Nancy-Essey et de Luxembourg-ville (observations d'Eugène Lahr) a permis de détecter et de corriger un certain nombre de mois suspects et de les corriger (Tab. 6). Ceux-ci se concentrent principalement dans les années 1930 et 1940, c'est-à-dire avant le transfert de la « station climatologique de Luxembourg-ville » sur le site de l'aéroport. Les résultats de l'application du test d'Alexandersson sur le logarithme du rapport des cumuls mensuels entre la « station climatologique de Luxembourg-ville » et celle de Nancy-Essey (Fig. 11) aboutissent à la multiplication des cumuls bruts d'insolation de certaines périodes et de certains mois par les coefficients

correcteurs suivants: avril: 1931-> 1987: 1.2, mai: 1931->1945: 1.1, juin: 1931->1991: 1.1, juillet: 1931->1988: 1.1, août: 1931->1988: 1.15.

5. Conclusions

L'analyse primaire des longues séries climatologiques enregistrées à Luxembourg-ville sur la période 1838-2003 a été effectuée selon différentes procédures d'homogénéisation qui ont permis d'identifier un certain nombre de ruptures d'homogénéité bien corrélées avec les changements de site documentés par l'historique de la station climatologique. Les Fig. 19 à 21 retracent l'évolution des valeurs annuelles homogénéisées

Tab. 6. Années de correction des cumuls d'insolation mensuels enregistrés à la «station climatologique de Luxembourg-ville» sur la période 1931-2003.

janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
	1931	1931	1932	1932	1931	1931	1931	1932	1932	1932	1932
	1932	1932	1945	1939	1939	1939	1939	1939	1939	1939	1939
	1942	1933	1947	1947		1944	1944	1944	1944		1941
	1944	1934	1948	1948		1945	1947				1945
	1959	1935	1949	1949							
		1939	1950	1950							
		1941		1961							
		1948									
		1949									
		1950									
		1954									

□ Nancy-Essey
 ■ Luxembourg-ville

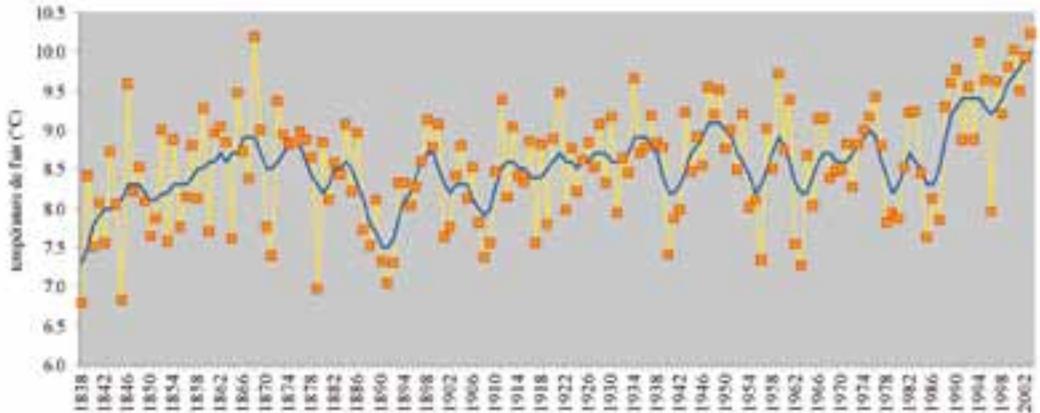


Fig. 19. Evolution de la température annuelle moyenne de l'air homogénéisée de 1838 à 2003 à la «station climatologique de Luxembourg-ville» (ligne bleue: filtre gaussien de longueur d'onde 10 ans).

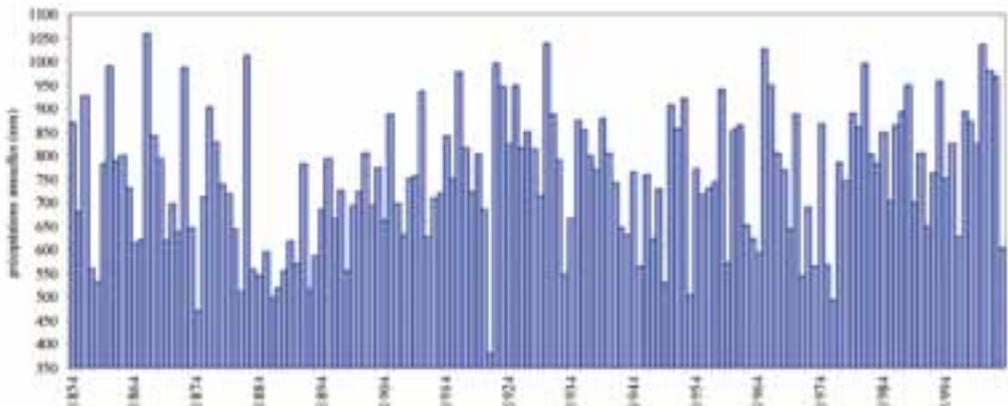


Fig. 20. Evolution des totaux pluviométriques annuels homogénéisés de 1854 à 2003 à la «station climatologique de Luxembourg-ville».

de la température de l'air (depuis 1838), des totaux pluviométriques (depuis 1854), ainsi que de la durée d'insolation (depuis 1931) pour la « station climatologique de Luxembourg-ville ». Les séries climatologiques, brutes et homogénéisées à partir de séries de référence régionales, afférentes à la « station climatologique de Luxembourg-ville », sont publiées en annexe.

Même si au terme de ce travail d'homogénéisation une imprécision irréductible, liée notamment aux changements d'instrumentation employée au cours du temps, entache encore le jeu de données final que nous proposons, nous sommes raisonnablement confiants sur son aptitude à fournir une image objective de la variabilité du climat luxembourgeois au cours des 150 dernières années sans que la variation des conditions de mesure puisse introduire un biais significatif dans les analyses.

L'ampleur des investigations et des pré-traitements à mener a posteriori pour homogénéiser les longues séries climatologiques nous incite à insister sur la nécessité de pérenniser autant que possible l'instrumentation et les sites de mesure existants de façon à fournir aux générations futures des séries climatologiques homogènes et fiables, qui pourront leur servir à documenter avec précision les effets du changement climatique annoncé sur le milieu éco-géographique.

Signalons pour finir, l'importance que revêt la poursuite des travaux de recherche sur les données climatologiques luxembourgeoises anciennes, dont nous n'avons exploité qu'une partie du thésaurus déjà exhumé par Eugène Lahr dans ses deux ouvrages de synthèse (Lahr 1950, 1964). En particulier, la quête des manuscrits originaux des observateurs météorologiques de la période de l'entre-deux-guerres permettrait, si elle aboutit, de

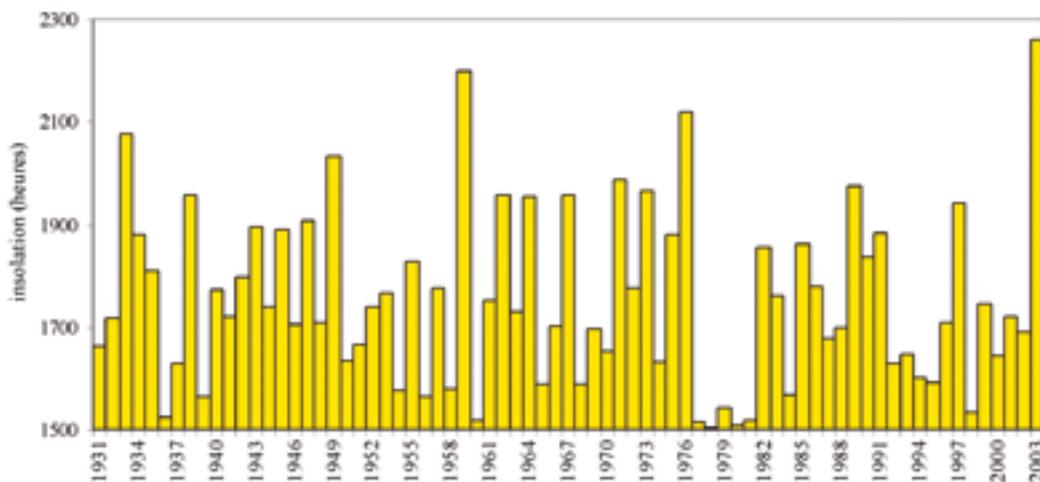


Fig. 21. Evolution des durées d'insolation annuelles homogénéisées (en heures) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1931 à 2003.

compléter et de densifier les archives climatiques quantitatives de la « station climatologique de Luxembourg-ville » et partant, notre connaissance des extrêmes climatiques au Luxembourg.

Remerciements

Cette publication n'aurait pu voir le jour sans l'assiduité et la passion des générations successives d'observateurs météorologiques luxembourgeois, qui ont contribué à la constitution d'archives climatiques quantitatives longues de plus de 150 ans à Luxembourg-ville. Qu'ils trouvent ici l'expression de nos respectueuses pensées. Nos plus sincères remerciements, malheureusement posthumes, s'adressent donc à l'ensemble des observateurs bénévoles ou professionnels de la « station climatologique de Luxembourg-ville » d'avant-guerre: Nicolas Bodson (1838-1853), François Reuter-Chomé (1853-1895), Nicolas Welfring (1907-1926), Aloyse Grégoire (1926-1945) et Eugène Lahr (1946). Nous tenons également à exprimer notre gratitude à E. Kirpach (chef-adjoint actuel du SMA) et aux chefs successifs du SMA (Grégoire Gillen, Michel Zeyen, Alex Kessler, François Neu, Romain Aberfeld, et Claude Alesch), ainsi qu'aux générations successives d'observateurs du Service Météorologique de l'Aéroport de Luxembourg.

De même nous sommes redevables à R. Kippen de l'Administration de la Gestion de l'Eau du Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire du Luxembourg et D. Buchel, R. Schoder et C. Wiltgen, de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture du Luxembourg qui nous ont donné accès aux annuaires météorologiques et hydrologiques du Luxembourg. Nos remerciements vont aussi à Olivier Mestre de l'Ecole Nationale de la Météorologie (Météo-France, Toulouse) qui a accepté d'appliquer la règle de décision bayésienne de détection de ruptures multiples et de points aberrants dans sa version pas-à-pas, aux données de température extrêmes mensuelles luxembourgeoises des cinquante dernières années. J.M. Moisselin de la Direction de la Climatologie de Météo-France a eu la gentillesse de mettre à notre disposition les longues séries climatiques françaises homogénéisées les plus proches de la « station climatologique de Luxembourg-ville ». Qu'il en soit vivement remercié. Les auteurs tiennent enfin à exprimer leur gratitude au rapporteur de cet article qui a permis une amélioration substantielle du manuscrit. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « CLIMAT » (Changements climatiques et d'occupation des sols au Grand-Duché de Luxembourg: défis pour l'aménagement du territoire en zones inondables) du programme « Vivre demain au Luxembourg » financé par le Fonds National de la Recherche du Luxembourg.

Bibliographie

- Adjizian J. 1994. - La variabilité spatiale des pluies dans le petit bassin versant du Ringelbach (Htes Vosges) - effet de la topographie et des types de temps. Thèse de 3^e cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 203 p.
- Administration des Services Techniques de l'Agriculture 1979. - Annuaire météorologique et hydrologique. 235 p
- Administration des Services Techniques de l'Agriculture 1990. - Annuaire météorologique et hydrologique. 241 p
- Alexandersson H. 1986. - A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology* 6: 661-675.
- Alexandersson H. & Moberg A. 1997. - Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. *International Journal of Climatology* 17: 25-34.
- Brouyaux F., Mormal P., Tricot Ch. & Vandiepenbeeck M. 2004. - La Belgique au fil du temps. Les événements météorologiques marquants du vingtième siècle en Belgique. Le Roseau vert, Rhode-Saint-Genèse, 221 p.
- Camuffo D. 2002. - Errors in early temperature series arising from changes in style of measuring time, sampling schedule and number of observations. *Climatic Change* 53: 331-352.
- Camuffo D. & Jones P. 2002 (Eds). - Improved understanding of past climatic variability from early daily European instrumental sources. *Climatic Change* 53: 1-3.
- Caussinus H. & Lyazrhi F. 1997. - Choosing a linear model with a random number of change-points and outliers. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics* 49: 761-775.
- Caussinus H. & Mestre O. 2004. - Detection and correction of artificial shifts in climate series. *Journal of the Royal Statistical Society Series C* 53: 405-425.
- Demarée G. R., Lachaert P.-J., Verhoeve T. & Thoen E. 2002. - The long-term daily central Belgium temperature (CBT) series (1767-1998) and early instrumental meteorological observations in Belgium. *Climatic Change* 53: 269-293.
- Drogue G. 2003. - Apports de l'information historique et des outils de modélisation à l'étude de l'évolution passée et future de la relation pluie-débit et du climat au Grand-Duché de Luxembourg. Thèse de 3^e cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364 p. + annexes.
- Drogue G., Hoffmann L., Iffly J. F. & Pfister L. 2005. - Recent warming in a small region with semi-oceanic climate, 1949-1998: what is the ground truth? *Theoretical and Applied Climatology*, sous presse.
- Drogue G., Moatar F. & Najjar G. 1998. - Critique et modélisation de séries chronologiques de température de l'air et de rayonnement global en l'absence de station de référence. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie* 11: 241-249.
- Easterling D. R. & Peterson D. C. 1995. - A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series. *International Journal of Climatology* 15: 369-377.
- Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIEC) (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) 2001. - Climate change 2001. The scientific basis, in McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J. & White K.S. (eds), *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report (TAR) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press, Cambridge Royaume-Uni, 1000 p.
- Hawkins D. M. 1977. - Testing a sequence of observations for a shift in location. *Journal of the American Statistical Association* 72: 180-186.
- Javelle J. P., Rochas M., Pastre C., Hontarrède M., Beaurepaire M. & Jacomy B. 2000. - La Météorologie, du baromètre au satellite. Delachaux et Niestlé, 171 p.
- Jones P. D. & Moberg A. 2003. - Hemispheric and large scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *Journal of Climate* 16: 206-223.
- Kandel R. 1998. - *L'Incertitude des Climats*. Hachette Littératures, Paris, 206 p.
- Kohler M. A. 1949. - Double mass curve analysis for testing the consistency of records for making adjustments. *Bulletin of the American Meteorological Society* 30: 188-189.
- Können G. P., Zaiki M., Baede A. P. M., Mikami T., Jones P. D. & Tsukahara T. 2002. - Pre-1872 extension of the Japanese instrumental meteorological observation series back to 1819. *Journal of Climate* 16: 118-131.
- Lahr E. 1950. - Un siècle d'observations météorologiques appliquées à l'étude du climat du Grand-Duché de Luxembourg. Administration des Services agricoles, Luxembourg, Imprimerie Bourgeois, 287 p.
- Lahr E. 1964. - Temps et climat au Grand-Duché de Luxembourg. Administration des Services agricoles, Luxembourg, Imprimerie Bourgeois, 289 p.

- Lancaster A. 1901. - Données météorologiques recueillies à l'Observatoire Royal de Belgique de 1833 à 1900. Académie Royale de Belgique, Bruxelles, 116 p.
- Lanzante J. R. 1996. - Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology* 16: 1197-1226.
- Le Roy Ladurie E. 2004. - Histoire humaine et comparée du climat. *Canicules et glaciers XIII^e - XVIII^e siècle*. Fayard, Paris, 739 p.
- Lettenmaier D. P. 1977. - Detection of trends in water quality data with dependent observations. *Water Resources Research* 12: 1037-1046.
- Luterbacher J., Dietrich D., Xoplaki E., Grosjean M. & Wanner H. 2003. - European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science* 303: 1499-1503.
- Manley G. 1974. - Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 100: 389-405.
- Mann M. E., Bradley R. S. & Hughes M. K. 1998. - Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* 392: 779-787.
- Meek D. W. & Hatfield J. L. 1994. - Data quality checking for single station meteorological databases. *Agricultural and Forest Meteorology* 69: 85-109.
- Mestre O. 2000. - Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques. Thèse de 3^e cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse, 230 p.
- Middleton W. E. K. 1969. - *Invention of the Meteorological Instruments*. The John Hopkins Press, Baltimore, Etats-Unis, 364 p.
- Moisselin J. M., Schneider M., Canellas C. & Mestre O. 2002. - Les changements climatiques en France au XX^e siècle. *La Météorologie* 38: 45-56.
- Neu F. 1996. - L'aéroport de Luxembourg. Le Service Météorologique. 50 années d'histoire commune. 1946-1996. Service Météorologique Luxembourg, Luxembourg, 149 p.
- New M., Hulme M. & Jones P. 2000. - Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: development of 1901-96 monthly grids of terrestrial surface climate. *Journal of Climate* 13: 2217-2238.
- Nordli P. O., Lie A., Nesje S. & Dahl O. 2003. - Spring-summer temperature reconstruction in western Norway 1734-2003: a data-synthesis approach. *International Journal of Climatology* 23: 1821-1841.
- Parker D. E. 1994. - Effects of changing exposure of thermometers at land stations. *International Journal of Climatology* 14: 1-31.
- Perrin de Brichambaut C. & Leroy M. 1995. - La mesure de la température de l'air. *La Météorologie* 12: 14-30.
- Reuter-Chomé, F. 1890. - Observations météorologiques faites à Luxembourg de 1884-1888. Moyennes de 1884-1888 et de 1854-1888. Cinquième volume. Luxembourg, V. Bück, 1p+50p+59p.
- Rhoades D. A. & Salinger M. J. 1993. - Adjustment of temperature and rainfall records for site changes. *International Journal of Climatology* 13: 899-913.
- Sevruk B. & Nespor V. 1998. - Empirical and theoretical assessment of the wind induced error of rain measurement. *Water Science and Technology* 37: 171-178.
- Shabalova M. V. & van Engelen A. F. V. 2003. - Evaluation of a reconstruction of winter and summer temperatures in the low countries, AD 764-1998. *Climatic Change* 58: 219-242.
- Souriau A. & Yiou P. 2001. - Grape harvest dates for checking NAO paleoreconstructions. *Geophysical Research Letters* 28: 3895-3898.
- Tank K. A. M. G., Wijngaard J. B., Können G. P., Böhm R., Demaree G., Gocheva A., Miletta M., Pashiardis S., Hejkrlik L., Kern-Hansen C., Heino R., Bessemoulin P., Müller-Westermeier G., Tzanakou M., Szalai S., Pálsdóttir T., Fitzgerald D., Rubin S., Capaldo M., Maugeri M., Leitass A., Bukantis A., Aberfeld R., van Engelen A. F. V., Forland E., Miletus M., Coelho F., Mares C., Razuvaev V., Nieplova E., Cegnar T., Antonio López J., Dahlström B., Moberg A., Kirchhofer W., Ceylan A., Pachaliuk O., Alexander L. V. & Petrovic P. 2002. - Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology* 22: 1441-1453.
- Vincent L. A. 1998. - A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series. *Journal of Climate* 11: 1094-1104.

Annexes

1.1	Températures moyennes mensuelles et annuelles brutes (en °C) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1838 à 2003.	56
1.2	Températures moyennes mensuelles et annuelles homogénéisées (en °C) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1838 à 2003.	62
2.1	Cumuls de précipitation mensuels et annuels bruts (en mm) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1854 à 2003.	68
2.2	Cumuls de précipitation mensuels et annuels homogénéisés (en mm) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1854 à 2003.	73
3.1	Durées d'insolation mensuelles et annuelles brutes (en heures) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1931 à 2003.	79
3.2	Durées d'insolation mensuelles et annuelles homogénéisées (en heures) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1931 à 2003.	82

Annexe 1.1 Températures moyennes mensuelles et annuelles brutes (en °C) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1838 à 2003.
Sources: 1838-1946 (Lahr 1950) et 1947-2003 (Tn et Tx mensuelles aimablement fournies par le Service Météorologique de l'Aéroport).
-999.0: donnée manquante.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1838	-6.4	-1.2	4.4	5.7	10.7	11.6	15.8	15.4	11.4	8.2	4.5	-1.1	6.6
1839	-0.3	0.4	3.2	6.0	13.6	18.3	18.5	18.0	14.0	8.8	6.0	3.2	9.1
1840	1.3	1.7	1.8	12.6	12.0	15.5	15.8	19.7	14.0	5.1	5.8	-1.9	8.6
1841	-1.8	-1.4	6.1	8.6	16.6	13.7	14.0	15.7	15.2	8.6	4.0	2.5	8.5
1842	-2.8	4.1	4.2	9.1	15.0	20.0	17.1	19.8	11.4	5.2	1.8	1.4	8.9
1843	1.0	3.0	5.7	8.4	11.7	15.3	17.2	18.1	15.4	8.7	5.2	2.6	9.4
1844	0.8	0.0	3.9	14.0	11.6	18.3	16.9	14.9	12.7	9.4	4.2	-2.2	8.7
1845	-0.1	-3.6	-0.1	7.0	8.6	16.8	17.3	18.8	14.0	7.5	3.4	1.0	7.6
1846	0.1	0.7	5.5	9.2	12.5	21.0	19.1	19.1	10.7	8.7	5.0	-2.8	9.1
1847	0.5	0.3	4.2	6.0	14.7	16.6	22.5	19.0	18.0	10.3	5.5	0.5	9.8
1848	-4.1	3.2	3.7	8.6	16.5	16.8	18.2	16.0	13.4	9.7	5.1	-0.3	8.9
1849	-1.1	2.4	3.3	6.9	12.2	18.9	18.6	16.1	14.0	8.5	3.6	-2.1	8.4
1850	-6.0	2.3	2.6	8.2	11.3	18.4	19.2	16.3	12.8	6.9	6.3	0.3	8.2
1851	1.2	0.0	3.9	6.7	7.9	18.1	18.3	17.4	13.2	10.0	1.9	-0.1	8.2
1852	1.5	0.6	2.9	5.0	12.0	19.7	22.8	18.0	13.9	7.8	7.7	4.1	9.7
1853	1.1	-1.3	0.1	6.0	12.1	14.5	19.1	17.6	13.7	8.7	5.0	1.9	8.2
1854	1.2	0.8	5.8	10.2	13.0	15.1	18.9	16.5	14.5	9.8	3.2	2.7	9.3
1855	-1.8	-1.8	3.4	8.8	11.7	16.4	17.7	18.0	14.1	11.1	3.3	-0.8	8.3
1856	1.8	3.0	2.6	8.8	10.0	16.3	15.4	18.4	11.9	8.6	0.6	1.7	8.3
1857	-0.1	0.4	3.2	7.5	12.9	15.7	18.9	19.2	14.3	9.8	4.0	1.5	8.9
1858	-1.8	-1.2	2.6	9.3	10.8	20.5	16.2	16.6	15.8	9.1	-0.5	1.2	8.2
1859	0.2	2.8	5.5	8.1	13.4	16.8	20.8	18.8	13.1	10.7	3.1	-0.9	9.4
1860	2.6	-1.0	2.2	6.4	14.3	15.0	15.8	14.9	13.3	8.6	2.1	0.7	7.9
1861	-2.9	4.1	5.3	7.2	12.1	18.3	17.4	18.7	14.0	11.3	4.0	1.4	9.2
1862	-0.4	1.8	6.5	10.4	15.3	14.8	17.0	16.7	15.3	10.2	3.6	2.2	9.5
1863	2.0	1.9	4.4	8.8	13.2	15.9	17.3	19.3	12.0	10.4	4.5	2.9	9.4
1864	-3.4	-0.3	5.1	8.5	12.9	16.3	18.7	16.1	14.6	8.7	3.4	-2.2	8.2

Annexe 1.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1865	0.8	-0.3	0.0	13.2	16.8	16.9	20.1	16.6	18.1	10.4	6.0	0.3	9.9
1866	3.4	3.5	3.4	9.9	10.3	18.6	17.1	15.0	14.0	8.9	4.6	2.6	9.3
1867	-0.8	4.8	3.4	8.6	14.0	16.5	16.0	18.2	15.3	7.9	3.4	-1.1	8.9
1868	-1.5	2.8	4.4	8.0	18.4	18.2	20.0	19.2	17.3	9.2	4.5	6.7	10.6
1869	1.6	6.6	2.7	12.6	13.8	14.5	21.0	17.2	16.1	8.5	5.3	1.5	10.1
1870	1.7	-0.5	3.5	9.9	14.1	16.4	20.4	15.0	12.6	11.4	7.5	-1.8	9.2
1871	-2.3	2.5	5.9	9.5	12.5	13.0	18.6	18.9	15.8	7.1	1.6	-1.1	8.5
1872	1.4	2.7	4.4	6.9	13.3	16.0	19.4	16.4	14.1	9.4	6.3	4.4	9.6
1873	3.4	0.4	6.5	7.6	10.4	16.5	19.9	18.2	12.9	9.7	5.0	1.6	9.3
1874	2.3	2.4	4.4	10.3	10.4	17.2	20.9	16.1	15.2	9.5	2.5	-0.9	9.2
1875	3.2	-1.2	2.9	9.4	15.2	16.2	17.2	18.9	15.1	7.4	3.1	-0.2	8.9
1876	-2.1	2.0	3.7	9.4	10.0	16.5	18.6	18.6	12.5	10.6	4.2	5.0	9.1
1877	3.9	3.9	3.5	7.5	10.0	18.1	16.2	17.2	11.1	7.8	6.6	1.9	9.0
1878	1.1	3.6	3.7	9.4	13.3	15.7	17.0	16.4	13.2	9.2	3.7	0.0	8.9
1879	-0.9	2.0	4.7	6.8	9.4	15.6	14.3	16.4	14.0	8.2	2.3	-7.6	7.1
1880	-2.8	2.7	6.4	8.9	11.8	14.3	17.8	17.5	14.2	7.9	3.8	5.0	9.0
1881	-3.3	2.5	4.9	6.8	11.9	15.1	18.6	15.5	12.1	5.3	6.9	1.6	8.2
1882	0.5	2.5	6.6	8.0	12.0	13.8	15.5	14.5	13.7	9.6	4.7	2.6	8.7
1883	1.3	4.1	0.2	8.0	12.4	15.8	15.5	15.7	14.2	8.6	5.3	1.9	8.6
1884	3.4	4.0	5.7	7.0	12.8	13.2	18.4	17.5	13.1	7.6	3.4	2.7	9.1
1885	-0.5	5.4	3.9	9.4	10.0	16.7	17.1	13.6	12.9	7.7	5.0	1.0	8.5
1886	0.8	-0.3	3.1	9.5	13.1	14.1	16.9	17.5	15.1	10.9	6.4	1.6	9.1
1887	-0.8	1.2	2.6	7.4	10.2	16.1	18.1	15.7	12.3	5.8	4.3	0.5	7.8
1888	-0.3	-1.1	2.6	6.9	12.3	16.2	15.6	18.2	15.2	6.7	5.5	2.1	8.3
1889	0.8	0.2	3.3	8.2	16.0	18.9	18.1	17.4	12.6	8.6	3.2	-1.0	8.9
1890	3.4	-0.4	4.4	6.5	12.3	14.3	16.3	17.7	14.9	6.7	3.8	-4.4	8.0
1891	-3.6	0.3	2.8	4.9	10.6	14.2	17.5	16.3	15.0	9.4	2.7	1.6	7.6
1892	-1.4	0.9	0.6	7.1	11.2	13.4	17.8	18.8	16.0	6.3	4.6	-2.5	7.7
1893	-4.2	2.6	5.1	10.2	12.0	15.5	19.4	20.0	14.0	8.9	2.6	0.5	8.9
1894	-1.1	1.7	4.9	10.5	10.3	13.6	18.0	18.9	12.3	7.7	5.8	1.8	8.7

Annexe 1.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1895	-2.1	-4.8	3.5	10.8	13.3	16.5	18.8	19.6	17.7	7.9	6.1	0.8	9.0
1896	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1897	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1898	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1899	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1900	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1901	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1902	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1903	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1904	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1905	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1906	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0	-999.0
1907	-0.6	-1.8	4.0	7.2	12.0	14.2	15.6	16.3	13.7	9.8	4.6	2.0	8.2
1908	-3.1	1.7	2.5	5.6	13.6	17.2	16.7	14.4	12.4	8.4	2.5	-0.2	7.7
1909	-1.4	-0.8	2.7	9.1	11.9	13.6	14.6	16.6	12.9	10.5	1.9	2.2	7.9
1910	1.3	2.8	4.8	7.3	12.0	16.0	15.7	15.5	12.8	10.5	2.9	3.3	8.8
1911	-1.2	2.2	4.8	7.3	13.4	14.7	19.9	20.9	15.3	13.9	4.9	4.4	9.3
1912	1.0	4.3	6.7	7.4	12.8	14.9	17.7	13.8	9.5	7.7	2.7	5.1	7.9
1913	1.6	2.9	7.2	8.5	13.6	15.5	14.3	15.9	13.4	10.7	7.4	1.4	8.7
1914	-3.1	4.7	5.5	10.8	11.4	14.9	16.9	17.8	13.0	8.6	4.3	4.0	8.4
1915	1.0	2.3	3.5	7.6	14.8	18.7	16.8	15.7	13.2	7.6	1.8	5.1	8.3
1916	5.8	3.1	5.3	9.0	13.7	13.4	16.8	16.9	12.9	10.1	5.3	2.8	8.9
1917	-1.1	-2.8	1.9	5.5	16.6	18.3	17.7	16.2	15.0	7.3	5.9	-1.0	7.6
1918	1.8	3.5	5.1	9.2	15.0	14.1	17.4	16.8	13.6	8.2	4.2	5.8	8.9
1919	2.6	0.8	4.2	6.6	13.2	16.3	14.6	17.0	14.7	6.3	2.6	3.5	7.8
1920	3.9	4.2	6.9	9.6	15.0	16.4	17.0	15.6	13.8	8.7	2.1	2.3	8.9
1921	5.8	2.8	6.2	9.3	14.5	16.6	20.9	17.5	14.8	12.4	0.0	1.8	9.5
1922	0.3	2.0	5.4	7.0	15.2	17.2	16.2	15.6	12.3	6.2	3.5	3.7	8.0
1923	2.9	4.6	6.8	8.9	11.9	12.5	19.8	16.9	13.6	11.1	3.5	1.4	8.8
1924	-0.2	0.0	4.4	8.2	14.8	16.5	17.9	14.6	13.8	10.3	4.4	2.7	8.3

Annexe 1.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1925	3.2	5.3	2.9	9.2	14.3	16.4	18.6	16.9	11.5	9.8	3.0	1.2	8.7
1926	2.3	7.2	6.0	10.8	10.9	13.9	14.1	16.5	14.8	8.4	6.1	-0.2	9.4
1927	2.0	2.3	5.8	8.2	12.7	14.5	16.7	16.0	13.2	9.2	3.3	-1.2	8.8
1928	2.5	3.5	4.2	8.2	10.6	14.6	18.8	16.3	13.0	8.7	6.1	0.9	9.2
1929	-3.1	-5.5	4.5	5.4	13.3	14.7	18.2	16.2	16.6	9.2	4.4	4.4	8.4
1930	3.4	1.1	3.1	9.0	11.3	18.0	15.5	15.9	13.1	9.2	6.1	1.2	9.1
1931	1.0	-0.6	2.1	6.3	14.4	16.5	16.4	15.0	10.2	6.8	5.7	-0.1	8.0
1932	2.6	-0.9	2.6	6.4	11.6	15.1	16.9	19.0	15.1	8.3	4.5	0.8	8.7
1933	-1.1	0.9	5.9	7.8	11.7	14.3	18.6	17.9	14.8	8.8	3.0	-2.8	8.5
1934	1.0	0.7	3.8	10.4	13.2	16.0	18.8	15.4	15.3	9.8	4.2	5.7	9.7
1935	0.4	2.5	4.3	7.1	10.0	16.4	17.7	16.8	13.2	8.2	5.4	1.0	8.8
1936	3.9	0.7	6.0	6.4	13.6	15.5	15.5	16.2	13.1	6.3	4.4	1.5	8.8
1937	2.2	3.6	3.0	8.1	14.4	15.9	16.8	17.7	13.2	9.1	3.7	0.4	9.2
1938	2.5	1.7	7.3	5.3	10.2	15.9	15.6	16.5	13.9	8.1	7.4	-0.6	8.9
1939	3.4	1.4	3.1	9.1	11.0	16.2	15.7	16.9	12.8	7.4	6.6	-0.4	8.8
1940	-6.5	-0.1	4.5	7.9	12.3	16.4	14.8	13.6	12.8	7.9	5.5	-0.2	7.6
1941	-2.8	0.8	5.9	6.3	8.9	16.4	17.2	14.4	12.7	8.1	3.1	2.0	8.0
1942	-5.8	-4.5	4.4	9.0	12.0	14.8	15.7	16.2	14.6	11.3	3.6	2.2	8.0
1943	1.8	3.4	6.0	9.4	12.9	13.8	17.6	17.0	12.9	10.0	3.2	0.5	9.2
1944	3.2	-0.5	1.7	9.6	11.6	13.9	16.5	19.2	12.1	8.2	4.2	1.1	8.6
1945	-4.5	5.0	6.3	9.8	14.1	16.6	18.1	16.0	14.1	9.4	4.0	2.3	8.9
1946	-1.9	3.6	4.6	9.6	13.0	15.3	19.1	17.4	14.9	8.9	5.0	-1.2	8.6
1947	-2.5	-3.2	4.6	10.8	15.8	17.8	20.5	21.2	17.5	9.5	5.8	2.4	9.6
1948	4.3	1.6	8.1	10.0	14.2	15.8	16.6	16.4	13.5	9.3	4.5	1.9	9.3
1949	1.9	2.5	4.0	11.1	11.5	14.2	18.4	17.3	17.7	11.2	3.6	2.4	9.6
1950	-0.4	4.5	6.3	6.5	14.0	17.6	18.2	17.5	12.5	8.4	4.6	-2.8	8.9
1951	2.7	2.7	3.4	7.1	12.0	15.1	17.0	17.0	14.9	8.9	6.9	2.1	9.1
1952	0.2	0.1	5.3	11.5	13.5	15.5	19.0	18.2	10.4	7.7	2.1	0.1	8.6
1953	-1.0	0.3	7.6	9.6	13.9	15.4	16.6	17.2	14.1	10.7	4.6	3.7	9.4
1954	-2.6	-1.1	6.2	6.9	12.3	15.0	14.3	15.6	12.9	10.1	4.9	3.3	8.1

Annexe 1.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1955	-0.6	-0.7	1.7	8.6	10.7	14.8	17.9	17.5	14.1	7.8	4.4	2.8	8.2
1956	0.9	-8.5	5.3	6.7	13.2	12.4	16.4	14.2	15.0	8.3	2.7	3.1	7.5
1957	-0.1	4.8	8.3	9.0	10.0	16.8	17.9	15.3	12.7	9.6	4.6	1.0	9.1
1958	0.5	3.1	1.5	6.1	13.1	14.3	16.9	17.0	15.3	9.1	4.1	2.9	8.6
1959	0.9	2.9	7.3	9.5	13.4	15.9	20.1	17.6	16.3	9.9	3.6	2.9	10.0
1960	0.5	2.2	6.3	8.5	13.8	16.2	14.6	15.8	12.6	9.3	6.2	0.7	8.9
1961	0.5	5.6	7.2	11.0	10.9	15.2	14.9	16.3	17.3	10.4	3.8	1.3	9.5
1962	2.2	1.0	1.3	8.2	9.6	14.4	15.3	16.7	12.6	9.9	2.5	-1.5	7.7
1963	-6.3	-4.6	4.3	9.4	11.7	14.9	17.4	15.3	14.0	8.3	7.5	-3.0	7.4
1964	-1.7	2.8	2.7	8.7	14.3	16.2	18.9	17.0	14.3	7.3	5.0	0.2	8.8
1965	1.5	-1.1	4.8	7.0	12.1	15.3	14.8	15.9	12.5	9.5	2.6	3.1	8.1
1966	-1.4	6.2	4.5	9.7	13.6	16.9	15.3	16.0	14.9	11.4	2.1	2.3	9.3
1967	1.3	3.5	6.1	7.3	12.5	15.1	19.4	17.1	13.8	10.9	3.9	0.5	9.3
1968	-0.2	1.7	5.4	9.6	11.1	15.0	16.6	16.5	13.7	10.9	3.2	-1.2	8.5
1969	2.2	-1.6	4.0	7.7	13.3	14.8	19.0	17.4	14.9	11.6	4.8	-2.9	8.8
1970	0.0	0.5	2.3	5.9	12.4	17.8	15.8	17.8	14.8	9.6	6.3	0.3	8.6
1971	0.2	1.9	1.9	10.0	15.1	14.5	19.5	17.5	13.8	10.0	3.4	2.5	9.2
1972	-0.8	3.5	6.9	7.5	11.3	13.6	17.8	16.0	11.6	8.4	4.5	1.4	8.5
1973	0.5	0.9	4.9	5.8	13.1	16.8	17.5	19.8	15.7	8.5	3.5	0.6	9.0
1974	3.8	3.5	6.6	9.9	11.9	15.0	15.4	17.3	12.6	4.8	4.5	4.5	9.1
1975	4.3	2.9	3.6	7.3	11.9	15.4	18.6	20.4	15.7	7.6	3.8	0.3	9.3
1976	1.9	1.7	3.3	8.1	13.8	18.8	20.7	18.6	13.3	10.4	4.5	-1.3	9.5
1977	1.1	3.8	6.8	5.7	11.8	15.0	17.0	16.4	12.5	10.3	4.6	2.4	8.9
1978	0.7	-0.5	5.6	7.3	12.1	14.1	15.6	15.2	12.2	9.1	2.5	1.6	7.9
1979	-5.0	-0.2	4.3	6.8	11.7	16.2	16.5	15.3	13.9	10.2	3.5	3.7	8.1
1980	-1.2	4.3	4.6	7.0	11.8	13.9	14.5	16.7	14.4	7.7	2.4	0.1	8.0
1981	-0.1	0.1	7.8	8.7	12.7	14.7	16.5	17.4	14.4	7.6	4.7	-0.5	8.7
1982	-1.2	1.4	4.9	7.3	13.1	16.3	19.2	17.1	17.1	9.3	5.9	1.9	9.3
1983	3.3	-0.7	5.1	8.1	10.2	16.5	21.9	19.8	13.7	9.3	3.9	1.5	9.4
1984	1.3	0.8	3.7	7.7	10.2	14.1	16.9	18.1	12.7	9.9	6.3	1.5	8.6

Annexe 1.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1985	-4.8	-0.8	3.4	8.0	13.3	13.2	17.8	15.7	14.4	9.3	0.6	3.2	7.8
1986	0.5	-5.1	3.8	5.7	13.5	16.8	17.2	16.1	12.0	10.7	5.7	2.4	8.2
1987	-4.6	0.5	1.4	9.9	9.8	13.8	16.8	16.3	15.5	9.8	4.6	2.2	8.0
1988	3.9	2.3	3.9	9.0	14.3	15.2	15.8	17.6	13.1	10.2	3.4	4.5	9.4
1989	1.7	2.0	7.8	6.5	15.0	15.3	18.1	17.3	15.0	11.1	3.7	3.4	9.7
1990	1.9	6.3	7.4	7.7	14.9	14.7	17.7	19.3	12.4	10.9	4.6	1.1	9.9
1991	1.1	-1.2	7.8	7.8	10.6	12.8	19.5	19.7	16.4	8.7	3.8	1.2	9.0
1992	1.2	3.3	5.7	8.2	14.9	16.7	18.6	18.8	13.8	6.7	5.9	2.6	9.7
1993	3.3	-0.8	5.4	10.9	14.3	16.5	16.6	16.5	12.8	8.0	1.2	3.5	9.0
1994	2.8	1.6	6.9	8.1	12.5	16.6	22.2	18.0	13.0	9.2	8.4	3.9	10.2
1995	1.4	4.6	4.0	8.9	13.1	14.9	21.2	19.7	12.5	12.7	4.5	-0.1	9.8
1996	-0.9	-0.6	3.0	9.5	10.8	16.5	16.8	17.6	12.2	9.7	4.0	-1.3	8.1
1997	-2.1	4.2	8.0	8.1	12.9	15.6	17.5	21.0	15.5	8.9	5.1	2.5	9.7
1998	2.6	4.4	5.9	8.0	14.9	16.3	16.0	17.8	14.0	8.5	1.7	2.0	9.3
1999	2.9	1.3	6.2	9.3	14.6	15.5	19.5	18.0	17.2	9.4	3.3	2.1	9.9
2000	1.6	4.0	5.6	9.9	14.6	17.3	15.3	18.5	15.0	10.2	6.0	4.1	10.2
2001	1.9	3.4	6.0	7.1	15.1	14.8	19.1	19.0	11.6	12.9	4.3	0.5	9.6
2002	0.2	5.2	6.5	9.2	12.9	17.5	17.7	18.3	13.9	9.4	7.0	3.1	10.1
2003	0.0	0.4	7.7	9.5	13.6	19.7	19.5	22.2	15.0	6.3	6.2	2.7	10.2

Annexe 1.2 Températures moyennes mensuelles et annuelles homogénéisées (en °C) de la «station climatologique de Luxembourg-Ville» de 1838 à 2003.
En italique: année reconstituée.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1838	-7.2	-2.1	3.0	4.0	11.2	13.6	17.9	15.0	14.2	9.1	3.9	-1.2	6.8
1839	-1.1	-0.5	2.0	4.6	12.4	18.2	19.2	15.0	13.3	9.7	4.9	3.1	8.4
1840	0.5	0.8	0.8	11.2	10.8	15.4	16.4	16.3	13.3	6.0	4.7	-6.2	7.5
1841	-2.6	-2.3	5.3	8.8	15.4	11.6	16.0	15.3	14.5	9.5	2.9	2.4	8.1
1842	-3.6	-3.2	3.6	6.6	13.7	17.9	17.6	19.4	10.7	6.1	0.4	1.3	7.6
1843	0.2	2.1	3.8	8.6	10.4	13.2	17.7	17.7	14.7	9.6	4.1	2.5	8.7
1844	0.0	-0.9	3.7	9.6	11.9	16.2	15.9	14.5	12.0	10.3	5.6	-2.3	8.0
1845	-0.9	-4.5	-3.8	7.2	8.9	14.7	18.7	13.9	13.3	8.4	5.1	0.9	6.8
1846	0.4	2.8	5.7	9.4	12.7	18.9	20.6	18.7	15.2	9.6	3.9	-2.9	9.6
1847	-2.2	-0.6	2.8	6.2	14.9	14.4	19.9	18.6	10.6	9.0	4.4	0.4	8.2
1848	-3.8	3.4	4.3	8.8	13.3	14.6	19.0	15.6	12.7	10.6	4.0	-0.4	8.5
1849	-0.8	2.6	2.8	7.1	12.3	16.7	17.6	15.7	13.3	9.4	2.5	-2.2	8.1
1850	-5.7	2.5	0.4	8.4	11.4	16.2	17.3	15.9	12.1	7.8	5.2	0.2	7.6
1851	1.5	0.2	3.4	6.9	7.9	15.9	17.6	17.0	12.5	10.9	0.8	-0.2	7.9
1852	1.8	0.8	2.4	5.2	12.0	14.4	21.4	17.6	13.2	8.7	6.6	4.0	9.0
1853	1.4	-1.1	-0.4	6.2	12.1	14.3	19.7	17.2	13.0	9.6	3.9	-4.9	7.6
1854	0.9	0.2	5.8	8.8	12.3	14.3	19.3	16.6	14.4	9.7	2.2	1.9	8.9
1855	-2.1	-2.4	3.4	8.4	11.0	15.4	18.2	18.1	14.1	10.6	2.4	-4.0	7.8
1856	1.5	2.8	2.6	8.3	9.1	15.4	17.7	19.1	11.7	8.9	-0.4	1.0	8.1
1857	-0.4	0.1	3.2	7.0	12.0	14.8	20.9	20.0	14.1	10.0	3.0	0.8	8.8
1858	-2.1	-1.8	2.4	8.9	10.1	19.7	18.7	17.3	15.9	9.2	-1.5	0.5	8.1
1859	-0.1	2.3	5.2	7.7	12.5	16.2	23.5	19.5	13.1	10.9	2.0	-1.5	9.3
1860	2.3	-1.6	1.9	6.0	13.4	14.3	17.3	15.5	13.2	8.9	1.1	0.0	7.7
1861	-3.2	3.8	5.1	6.7	11.1	17.7	19.2	18.5	13.2	11.5	3.0	0.7	9.0
1862	-0.7	1.0	6.1	10.0	14.2	14.2	18.4	16.4	14.5	10.3	2.5	1.4	9.0
1863	1.7	1.4	4.0	8.4	12.0	13.9	17.7	19.2	11.3	10.6	3.5	2.2	8.8

Annexe 1.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1864	-3.7	-0.7	4.7	8.1	12.2	14.4	17.9	16.0	14.0	8.9	2.4	-2.9	7.6
1865	0.5	-1.0	0.0	13.0	15.8	15.2	21.0	16.4	17.6	10.7	4.9	-0.5	9.5
1866	3.1	3.0	3.2	9.4	9.1	17.0	17.4	14.7	13.3	9.1	3.5	1.9	8.7
1867	-1.1	4.4	2.9	8.2	13.0	15.1	16.8	18.1	14.7	8.1	2.2	-1.9	8.4
1868	-1.8	2.5	4.0	7.7	17.2	16.9	20.9	19.0	16.6	9.4	3.5	6.1	10.2
1869	-0.2	6.1	2.0	12.2	12.4	13.1	20.5	15.5	15.3	7.5	4.2	-0.8	9.0
1870	0.5	-3.2	2.2	9.6	12.8	15.2	20.9	14.6	11.8	9.0	4.0	-4.6	7.7
1871	-4.3	0.7	5.3	9.0	9.1	12.1	19.1	18.6	14.8	7.3	0.6	-3.6	7.4
1872	1.1	2.6	4.2	9.5	11.4	15.1	20.0	16.3	13.4	9.7	5.3	3.7	9.4
1873	3.0	0.1	6.1	7.2	9.0	15.9	21.0	18.1	12.3	9.9	3.7	1.0	8.9
1874	2.0	1.4	4.7	10.0	9.1	16.8	21.7	15.8	14.5	9.9	1.5	-1.6	8.8
1875	2.9	-1.5	2.6	9.2	13.9	16.9	18.9	19.8	14.5	7.7	2.2	-1.1	8.8
1876	-2.4	1.9	3.5	8.9	9.8	16.3	20.1	19.3	12.0	11.0	3.1	4.3	9.0
1877	3.6	3.6	3.0	7.1	9.8	17.8	18.3	17.9	10.4	8.0	5.6	1.2	8.9
1878	0.8	2.9	3.5	9.0	13.2	15.4	18.1	17.0	12.5	9.5	2.8	-0.8	8.6
1879	-1.2	2.1	3.1	6.4	9.4	15.3	16.7	17.0	13.2	8.5	1.2	-8.2	7.0
1880	-3.1	1.8	5.9	8.5	11.6	14.3	19.8	18.4	13.5	8.2	2.9	4.3	8.8
1881	-3.6	1.5	4.5	6.6	11.7	15.2	21.1	16.2	11.4	5.6	6.1	0.9	8.1
1882	0.2	1.4	6.3	7.7	11.9	13.9	17.8	15.1	12.9	9.9	3.8	2.1	8.6
1883	1.0	3.4	-0.2	7.5	12.3	16.1	17.6	16.2	12.9	8.8	4.3	1.2	8.4
1884	3.1	3.2	5.4	6.4	12.7	13.6	20.2	18.2	13.5	7.9	2.4	2.1	9.1
1885	-0.8	4.7	3.5	9.0	9.6	16.4	18.7	13.9	12.9	8.6	3.0	-0.8	8.2
1886	0.5	-0.9	1.4	9.2	13.5	13.3	18.5	17.8	15.1	11.8	6.0	1.5	9.0
1887	-1.1	0.7	2.2	7.0	9.5	14.5	20.6	16.0	12.3	6.7	3.9	0.4	7.7
1888	-0.6	-1.5	2.2	6.5	11.7	15.4	15.6	15.6	13.4	7.6	4.6	-0.3	7.5
1889	-0.4	-1.0	1.7	8.4	15.9	18.6	17.6	14.8	10.8	9.5	2.3	-1.1	8.1
1890	2.2	-0.2	4.5	6.7	12.2	14.0	16.1	15.1	13.1	7.6	2.9	-4.5	7.3
1891	-4.8	0.5	2.9	5.1	10.5	13.9	17.2	13.7	13.2	10.3	1.8	1.5	7.0
1892	-2.6	1.1	0.7	7.3	11.1	13.1	17.1	18.1	14.2	7.2	3.7	-2.6	7.3
1893	-5.4	2.8	5.2	10.4	11.9	15.2	18.6	17.4	12.2	9.8	1.7	0.4	8.3

Annexe 1.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1894	-2.3	1.9	5.0	10.7	10.2	13.3	19.0	16.3	10.5	8.6	4.9	1.7	8.3
1895	-3.3	-4.6	2.4	9.0	13.2	16.2	18.5	17.0	15.9	8.8	5.2	0.7	8.0
1896	0.9	0.5	6.8	6.5	11.3	16.2	18.4	14.3	12.8	9.0	2.5	0.2	8.3
1897	-1.0	3.0	6.0	7.7	11.2	16.3	18.2	17.0	12.1	8.5	2.9	1.3	8.6
1898	2.7	2.5	3.9	8.2	10.9	14.5	16.2	18.3	13.8	10.2	5.0	3.4	9.1
1899	3.3	3.6	4.3	8.0	10.7	15.2	17.1	18.2	13.3	8.7	5.6	-2.5	8.8
1900	2.5	2.6	1.9	7.6	10.8	16.6	19.7	15.7	14.2	9.3	5.0	3.1	9.1
1901	-2.1	-3.7	3.1	8.6	12.7	15.3	17.7	15.9	12.6	8.5	1.8	1.2	7.6
1902	2.2	0.0	4.8	9.2	8.4	14.2	16.3	15.9	13.0	7.7	2.1	-0.6	7.8
1903	1.4	3.4	5.7	4.6	12.2	14.2	16.1	15.9	13.9	10.5	4.2	-1.0	8.4
1904	-1.2	2.1	3.7	9.2	12.9	15.5	19.6	17.0	12.1	9.9	2.7	2.1	8.8
1905	-1.9	-0.3	5.8	7.3	11.2	16.9	19.1	17.2	13.0	5.2	3.3	0.7	8.1
1906	1.9	0.5	3.4	7.5	12.7	14.4	17.3	17.4	12.7	11.1	5.3	-1.9	8.5
1907	-1.0	-1.8	3.9	7.0	11.7	14.2	15.2	16.1	13.2	9.6	4.3	1.5	7.8
1908	-3.5	1.7	2.4	5.4	13.3	17.2	16.3	14.2	11.9	8.2	2.2	-0.7	7.4
1909	-1.8	-0.8	2.6	8.9	11.6	13.6	14.2	16.4	12.4	10.3	1.6	1.7	7.5
1910	0.9	2.8	4.7	7.1	11.7	16.0	15.3	15.3	12.3	10.3	2.6	2.8	8.5
1911	-1.6	2.2	4.7	7.1	13.1	14.7	19.5	20.7	14.8	9.0	4.6	3.9	9.4
1912	0.6	4.3	6.6	7.2	12.5	14.9	17.3	13.6	9.0	7.5	2.4	1.9	8.1
1913	1.2	2.1	7.1	8.3	13.3	15.5	13.9	15.7	12.9	10.5	7.1	0.9	9.0
1914	-3.5	3.9	5.4	9.7	10.4	13.8	16.5	17.6	12.5	8.4	3.3	2.9	8.4
1915	0.6	1.5	3.4	6.5	13.8	17.6	16.4	15.5	12.7	7.4	0.8	4.0	8.3
1916	5.4	2.3	4.7	7.9	12.7	12.3	16.0	16.7	12.4	9.9	4.3	1.7	8.9
1917	-1.5	-3.6	1.3	4.4	15.6	17.2	16.9	16.0	14.5	7.1	4.9	-2.1	7.6
1918	1.4	2.7	4.5	8.1	14.0	13.0	16.6	16.6	13.1	8.0	3.2	4.7	8.8
1919	2.2	0.0	3.6	5.5	12.2	15.2	13.8	16.8	14.2	6.1	1.6	2.4	7.8
1920	3.5	3.4	6.3	8.5	14.0	15.3	16.2	15.4	13.3	8.5	1.1	1.2	8.9
1921	5.4	2.0	5.6	8.2	13.5	15.5	20.1	17.3	14.3	12.2	-1.0	0.7	9.5
1922	-0.1	1.2	4.8	5.9	14.2	16.1	15.4	15.4	11.8	6.0	2.5	2.6	8.0
1923	2.5	3.8	6.2	7.8	10.9	11.4	19.0	16.7	13.1	10.9	2.5	0.3	8.8

Annexe 1.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1924	-0.6	-0.8	3.8	7.1	13.8	15.4	17.1	14.4	13.3	10.1	3.4	1.6	8.2
1925	2.8	4.5	2.3	8.1	13.3	15.3	17.8	16.7	11.0	9.6	2.0	0.1	8.6
1926	2.3	6.4	5.4	9.7	9.9	12.8	16.9	16.3	14.3	8.2	5.1	-1.3	8.8
1927	2.0	2.2	6.1	8.6	11.9	14.6	16.6	16.6	13.5	8.8	3.0	-1.6	8.5
1928	2.5	3.4	4.5	8.6	10.8	14.7	18.7	16.9	13.3	9.4	5.8	0.5	9.1
1929	-3.1	-5.6	4.8	5.8	13.5	14.8	18.1	16.8	16.9	9.9	4.1	4.0	8.3
1930	3.4	1.0	4.9	9.4	11.5	18.1	15.4	16.5	13.4	9.9	5.8	0.8	9.2
1931	1.0	-0.7	2.4	6.7	14.6	16.6	16.3	15.6	10.5	7.5	5.4	-0.5	7.9
1932	2.6	-1.0	2.9	6.8	11.8	15.2	16.8	19.6	15.4	9.0	4.2	0.4	8.6
1933	-1.1	0.8	6.2	8.2	11.9	14.4	18.5	18.5	15.1	9.5	2.7	-3.2	8.4
1934	1.0	0.6	4.1	10.8	13.4	16.1	18.7	16.0	15.6	10.5	3.9	5.3	9.7
1935	0.4	2.4	4.6	7.5	10.2	16.5	17.6	17.4	13.5	8.9	5.1	0.6	8.7
1936	3.9	0.6	6.3	6.8	13.8	15.6	16.0	16.8	13.4	7.0	4.1	1.1	8.8
1937	2.2	3.5	3.3	8.5	14.6	16.0	17.3	18.3	13.5	9.8	3.4	0.0	9.2
1938	2.5	1.6	7.6	5.7	10.4	16.0	16.1	17.1	14.2	8.8	7.1	-1.0	8.8
1939	3.4	1.3	3.4	9.5	11.2	16.3	16.2	17.5	13.1	8.1	6.3	-0.8	8.8
1940	-6.5	-0.2	4.8	8.3	12.5	16.5	15.3	14.2	13.1	8.6	5.2	-2.8	7.4
1941	-2.8	0.7	5.3	6.7	9.1	16.5	17.7	15.0	13.0	8.8	2.8	1.6	7.9
1942	-5.8	-4.6	4.7	9.4	12.2	14.9	16.2	16.8	14.9	12.0	3.3	1.8	8.0
1943	1.8	3.3	6.3	9.8	13.1	13.9	18.1	17.6	13.2	10.7	2.9	0.1	9.2
1944	3.2	-0.6	2.0	10.0	11.8	14.0	17.0	19.8	12.4	7.4	3.9	0.7	8.5
1945	-4.5	4.9	6.0	9.7	13.7	16.0	18.6	15.2	13.3	9.2	3.2	1.7	8.9
1946	-1.9	3.5	4.3	9.5	12.6	14.7	18.1	16.6	14.1	8.7	4.2	-1.8	8.5
1947	-2.5	-3.3	4.3	10.7	15.4	17.2	19.5	20.4	16.7	9.3	5.0	1.8	9.5
1948	4.3	1.5	7.8	9.9	13.8	15.2	15.6	15.6	12.7	9.1	3.7	1.3	9.2
1949	1.9	2.4	3.8	10.9	11.3	14.1	18.2	17.1	17.4	11.0	3.6	2.4	9.5
1950	-0.4	4.4	6.1	6.3	13.8	17.5	18.0	17.3	12.2	8.2	4.6	-2.8	8.8
1951	2.7	2.6	3.2	6.9	11.8	15.0	16.8	16.8	14.6	8.7	6.9	2.1	9.0
1952	0.2	0.0	5.1	11.3	13.3	15.4	18.8	18.0	10.1	7.5	2.1	0.1	8.5
1953	-1.0	0.2	6.8	9.4	13.7	15.3	16.4	17.0	13.8	10.5	4.6	3.7	9.2

Annexe 1.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1954	-2.6	-1.2	6.0	6.7	12.1	14.9	14.1	15.4	12.6	9.9	4.9	3.3	8.0
1955	-0.6	-0.8	1.5	8.4	10.5	14.7	17.7	17.3	13.8	7.6	4.4	2.8	8.1
1956	0.9	-8.6	5.1	6.5	13.0	12.3	16.2	14.0	14.7	8.1	2.7	3.1	7.3
1957	-0.1	4.7	8.1	8.8	9.8	16.7	17.7	15.1	12.4	9.4	4.6	1.0	9.0
1958	0.5	3.0	1.3	5.9	12.9	14.2	16.7	16.8	15.0	8.9	4.1	2.9	8.5
1959	0.9	0.8	7.1	9.3	13.2	15.8	19.9	17.4	16.0	9.7	3.6	2.9	9.7
1960	0.5	2.1	6.1	8.3	13.6	16.1	14.4	15.6	12.3	9.1	6.2	0.7	8.7
1961	0.5	5.5	7.0	10.8	10.7	15.1	14.7	16.1	17.0	10.2	3.8	1.3	9.4
1962	2.2	0.9	1.1	8.0	9.4	14.3	15.1	16.5	12.3	9.7	2.5	-1.5	7.5
1963	-6.3	-4.7	4.1	9.2	11.5	14.8	17.2	15.1	13.7	8.1	7.5	-3.0	7.3
1964	-1.7	2.7	2.5	8.5	14.1	16.1	18.7	16.8	14.0	7.1	5.0	0.2	8.7
1965	1.5	-1.2	4.6	6.8	11.9	15.2	14.6	15.7	12.2	9.3	2.6	3.1	8.0
1966	-1.4	6.1	4.3	9.5	13.4	16.8	15.1	15.8	14.6	11.2	2.1	2.3	9.1
1967	1.3	3.4	5.9	7.1	12.3	15.0	19.2	16.9	13.5	10.7	3.9	0.5	9.1
1968	-0.2	1.6	5.2	9.4	10.9	14.9	16.4	16.3	13.4	10.7	3.2	-1.2	8.4
1969	2.2	-1.7	3.8	7.5	13.1	14.7	18.8	17.2	14.6	9.6	4.8	-2.9	8.5
1970	0.0	0.4	2.1	5.7	12.2	17.7	15.6	17.6	14.5	9.4	6.3	0.3	8.5
1971	-1.6	1.8	1.7	9.8	13.9	14.4	19.3	17.3	13.5	9.8	3.4	2.5	8.8
1972	-0.8	3.4	5.9	7.3	11.1	13.5	17.6	15.8	11.3	8.2	4.5	1.4	8.3
1973	0.5	0.8	4.7	5.6	12.9	16.7	17.3	19.6	15.4	8.3	3.5	0.6	8.8
1974	3.8	3.4	6.4	9.7	11.7	14.9	15.2	17.1	12.3	4.6	4.5	4.5	9.0
1975	4.3	2.8	3.4	7.1	11.7	15.3	18.4	20.2	15.4	7.4	3.8	0.3	9.2
1976	1.9	1.6	3.1	7.9	13.6	19.6	20.5	18.4	13.0	10.2	4.5	-1.3	9.4
1977	1.1	3.7	6.6	5.5	11.6	14.9	16.8	16.2	12.2	10.1	4.6	2.4	8.8
1978	0.7	-0.6	5.4	7.1	11.9	14.0	15.4	15.0	11.9	8.9	2.5	1.6	7.8
1979	-5.0	-0.3	4.1	6.6	11.5	16.1	16.3	15.1	13.6	10.0	3.5	3.7	7.9
1980	-1.2	4.2	4.4	6.8	11.6	13.8	14.3	16.5	14.1	7.5	2.4	0.1	7.9
1981	-0.1	0.0	7.6	8.5	12.5	14.6	16.3	17.2	14.1	7.4	4.7	-0.5	8.5
1982	-1.2	1.3	4.7	7.1	12.9	16.2	19.0	16.9	16.8	9.1	5.9	1.9	9.2
1983	3.3	-0.8	4.9	7.9	10.0	16.4	21.7	19.6	13.4	9.1	3.9	1.5	9.2

Annexe 1.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1984	1.3	0.7	3.5	7.5	10.0	14.0	16.7	17.9	12.4	9.7	6.3	1.5	8.5
1985	-4.8	-0.9	3.2	7.8	13.1	13.1	17.6	15.5	14.1	9.1	0.6	3.2	7.6
1986	0.5	-5.2	3.6	5.5	13.3	16.7	17.0	15.9	11.7	10.5	5.7	2.4	8.1
1987	-4.6	0.4	1.2	9.7	9.6	13.7	16.6	16.1	15.2	9.6	4.6	2.2	7.9
1988	3.9	2.2	3.7	8.8	14.1	15.1	15.6	17.4	12.8	10.0	3.4	4.5	9.3
1989	1.7	1.9	7.6	6.3	14.8	15.2	17.9	17.1	14.7	10.9	3.7	3.4	9.6
1990	1.9	6.2	7.2	7.5	14.7	14.6	17.5	19.1	12.1	10.7	4.6	1.1	9.8
1991	1.1	-1.3	7.6	7.6	10.4	12.7	19.3	19.5	16.1	8.5	3.8	1.2	8.9
1992	1.2	3.2	5.5	8.0	14.7	16.6	18.4	18.6	13.5	6.5	5.9	2.6	9.6
1993	3.3	-0.9	5.2	10.7	14.1	16.4	16.4	16.3	12.5	7.8	1.2	3.5	8.9
1994	2.8	1.5	6.7	7.9	12.3	16.5	22.0	17.8	12.7	9.0	8.4	3.9	10.1
1995	1.4	4.5	3.8	8.7	12.9	14.8	21.0	19.5	12.2	12.5	4.5	-0.1	9.6
1996	-0.9	-0.7	2.8	9.3	10.6	16.4	16.6	17.4	11.9	9.5	4.0	-1.3	8.0
1997	-2.1	4.1	7.8	7.9	12.7	15.5	17.3	20.8	15.2	8.7	5.1	2.5	9.6
1998	2.6	4.3	5.7	7.8	14.7	16.2	15.8	17.6	13.7	8.3	1.7	2.0	9.2
1999	2.9	1.2	6.0	9.1	14.4	15.4	19.3	17.8	16.9	9.2	3.3	2.1	9.8
2000	1.6	3.9	5.4	9.7	14.4	17.2	15.1	18.3	14.7	10.0	6.0	4.1	10.0
2001	1.9	3.3	5.8	6.9	14.9	14.7	18.9	18.8	11.3	12.7	4.3	0.5	9.5
2002	0.2	5.1	6.3	9.0	12.7	17.4	17.5	18.1	13.6	9.2	7.0	3.1	9.9
2003	0.0	0.4	7.7	9.5	13.6	19.7	19.5	22.2	15.0	6.3	6.2	2.7	10.2

Annexe 2.1 Cumuls de précipitation mensuels et annuels bruts (en mm) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1854 à 2003.
Sources: 1854-1946 (Lahr 1950) et 1947-2003 (Service Météorologique de l'Aéroport).
-999: donnée manquante.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1854	59	38	5	37	77	127	70	63	17	92	59	128	773
1855	17	31	72	24	65	61	81	122	15	115	8	56	667
1856	88	25	13	100	110	107	76	65	147	50	79	67	925
1857	55	11	38	64	87	46	25	25	116	51	15	27	559
1858	15	20	38	30	49	20	68	58	27	52	88	68	533
1859	48	60	33	69	100	85	26	19	97	63	76	86	761
1860	103	66	82	61	91	94	22	124	80	118	53	45	941
1861	19	28	134	27	61	61	121	33	135	9	121	39	787
1862	80	42	43	36	76	75	114	72	37	108	28	90	800
1863	77	32	71	35	42	70	18	50	99	80	50	107	730
1864	30	35	75	20	45	70	53	137	43	13	144	10	676
1865	139	110	39	4	146	21	95	56	4	114	45	7	779
1866	94	153	89	67	53	39	160	128	96	8	88	117	1092
1867	110	128	66	167	28	34	149	44	45	57	23	79	930
1868	99	56	59	70	68	33	55	46	49	72	9	207	824
1869	35	54	37	0	119	14	23	13	74	6	145	131	650
1870	79	29	17	5	16	10	24	74	93	189	83	78	695
1871	0	16	8	132	9	85	117	50	71	42	4	37	569
1872	97	48	71	63	85	28	45	96	40	88	199	110	971
1873	111	69	53	36	35	61	40	28	59	107	33	15	646
1874	32	22	18	14	43	88	47	19	47	25	57	130	542
1875	101	16	21	16	61	57	102	38	56	47	154	43	711
1876	10	130	149	31	39	40	56	59	140	43	80	105	881
1877	114	104	75	53	55	19	85	44	70	40	103	67	826
1878	25	28	38	46	65	79	27	137	24	114	85	70	739
1879	84	64	0	73	53	83	120	71	47	20	40	47	700
1880	1	62	29	38	3	80	29	8	25	130	74	128	604

Annexe 2.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1881	45	54	68	18	12	16	14	29	39	77	55	50	479
1882	0	57	62	80	21	107	97	97	211	111	151	68	1060
1883	35	27	6	26	22	26	116	28	106	70	61	34	557
1884	56	55	12	26	38	32	32	30	26	51	18	168	543
1885	36	86	40	37	64	33	28	42	59	94	33	45	597
1886	42	35	27	30	46	68	38	17	32	40	36	87	497
1887	10	23	43	37	48	33	13	25	19	34	35	64	386
1888	32	44	106	14	24	81	68	47	29	35	36	15	530
1889	9	101	37	51	66	58	59	70	38	45	20	66	621
1890	95	2	38	65	41	31	71	108	1	37	75	6	569
1891	70	2	39	33	101	90	130	67	46	39	65	133	814
1892	60	79	40	24	33	33	34	35	38	54	23	63	515
1893	36	66	14	0	13	34	72	21	40	110	69	65	540
1894	86	72	38	41	51	60	70	32	102	87	37	41	717
1895	87	22	129	36	36	93	103	39	3	82	87	7	723
1896	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1897	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1898	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1899	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1900	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1901	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1902	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1903	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1904	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1905	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1906	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999	-999
1907	25	21	51	64	92	66	48	68	21	84	79	45	663
1908	25	58	54	67	120	105	56	133	68	0	65	40	791
1909	39	23	80	42	39	128	88	45	83	84	33	111	796
1910	77	134	7	33	50	99	141	49	92	35	192	76	984

Annexe 2.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1911	20	45	57	38	18	88	30	36	22	77	100	128	660
1912	61	65	90	21	40	58	40	104	66	79	57	66	746
1913	95	46	38	62	114	38	79	14	83	54	82	53	758
1914	63	51	118	29	103	93	79	80	93	25	53	100	885
1915	125	63	39	42	41	18	81	67	30	16	91	178	791
1916	57	128	42	51	90	89	68	105	65	95	91	148	1027
1917	86	10	93	52	66	74	98	128	23	153	51	25	858
1918	103	28	48	77	46	27	67	58	103	55	35	117	762
1919	95	61	94	83	14	15	104	33	58	28	130	132	846
1920	172	31	41	109	36	29	94	21	50	66	16	58	722
1921	86	9	12	21	61	7	14	73	26	6	42	44	400
1922	83	54	78	120	79	38	131	124	76	61	79	125	1048
1923	45	85	60	67	106	54	77	57	75	226	86	57	994
1924	20	23	72	117	117	63	102	70	88	77	78	42	868
1925	70	66	47	88	105	27	77	134	68	80	58	178	999
1926	63	113	39	45	172	74	50	68	7	98	104	25	858
1927	51	63	77	73	16	77	80	131	90	19	81	67	826
1928	51	76	31	106	44	65	31	54	31	120	106	76	791
1929	21	28	1	46	72	60	57	23	10	150	97	129	692
1930	45	31	66	27	91	50	184	72	112	145	139	46	1008
1931	126	51	23	58	40	65	136	161	43	52	52	55	862
1932	57	2	47	103	74	46	83	63	87	152	44	11	768
1933	21	33	49	18	146	74	32	17	49	47	40	5	531
1934	56	21	67	50	30	67	44	60	37	62	53	102	649
1935	62	86	32	91	59	129	28	43	87	50	62	121	849
1936	128	43	27	108	1	108	101	86	64	48	77	37	828
1937	111	129	88	82	59	19	45	34	97	41	24	49	777
1938	138	34	20	17	79	20	85	110	28	75	82	60	748
1939	129	32	49	65	46	39	60	73	54	152	112	42	853
1940	36	42	81	79	18	67	130	37	107	26	113	46	782
1941	118	64	64	45	45	74	70	97	5	48	29	62	721

Annexe 2.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1942	59	15	47	35	88	51	108	17	45	57	51	56	628
1943	67	29	25	36	66	70	21	103	31	40	86	41	614
1944	56	32	13	30	8	69	79	39	106	103	115	94	741
1945	36	66	15	58	67	61	26	53	76	9	17	65	548
1946	52	101	23	63	84	71	91	47	62	25	55	64	736
1947	33	46	97	63	82	39	50	48	20	17	78	111	683
1948	146	59	21	71	43	81	90	139	32	20	46	50	798
1949	34	22	33	34	65	30	2	75	76	54	81	76	580
1950	35	130	20	119	69	81	75	101	90	37	124	114	994
1951	89	83	98	95	45	94	32	93	84	30	124	71	938
1952	113	53	82	16	61	62	50	77	130	99	150	115	1008
1953	28	48	2	57	34	65	131	50	52	44	18	23	551
1954	52	34	36	34	49	73	69	145	124	75	68	87	847
1955	86	86	48	14	95	74	74	34	35	58	34	149	785
1956	89	16	36	76	77	77	99	91	55	73	53	60	802
1957	48	137	72	24	57	45	117	88	117	28	34	49	816
1958	109	113	24	50	143	81	68	153	52	71	51	117	1033
1959	61	2	64	73	68	64	28	54	2	39	75	96	628
1960	66	70	64	28	46	84	125	89	74	97	117	75	935
1961	108	72	11	84	72	128	91	40	54	110	95	83	947
1962	84	76	104	71	71	5	63	47	63	15	39	78	716
1963	39	26	86	23	56	96	6	92	50	59	149	4	685
1964	36	29	48	38	28	28	14	90	82	87	105	67	651
1965	125	13	82	89	68	105	79	105	132	11	119	196	1123
1966	63	107	44	89	79	123	100	67	23	108	88	150	1041
1967	37	75	58	36	102	62	64	69	109	126	76	72	884
1968	90	67	51	39	50	71	75	118	148	53	23	54	839
1969	50	60	79	80	55	73	45	87	27	2	117	35	710
1970	81	138	75	92	128	59	102	75	48	53	74	43	967
1971	77	30	28	31	78	95	45	62	20	47	71	15	598
1972	49	32	51	58	110	72	108	100	44	16	108	10	757

Annexe 2.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1973	28	52	7	54	102	28	77	49	35	70	57	61	619
1974	56	48	68	15	68	116	89	37	98	136	133	85	949
1975	71	14	100	50	55	43	39	25	92	14	96	25	622
1976	45	26	33	16	36	12	74	14	54	64	103	64	541
1977	78	155	44	65	37	76	76	98	14	52	101	66	861
1978	62	62	114	44	99	72	93	51	56	7	18	141	819
1979	49	85	125	88	140	24	24	83	35	71	103	149	976
1980	61	71	88	46	86	125	115	106	36	79	45	85	942
1981	60	38	109	64	89	130	54	85	127	151	50	134	1092
1982	91	19	90	30	53	108	22	49	76	150	89	105	880
1983	49	56	59	142	173	86	19	45	76	37	61	55	857
1984	146	90	41	35	107	40	59	44	123	125	86	36	930
1985	49	30	69	78	66	179	55	113	55	23	102	72	892
1986	125	7	134	99	88	49	60	102	99	131	84	118	1094
1987	38	61	77	41	91	177	154	82	88	196	92	36	1132
1988	196	123	122	23	201	40	94	43	114	95	58	95	1202
1989	21	49	93	176	35	95	82	67	52	36	47	136	889
1990	72	143	14	34	15	131	77	122	68	119	109	119	1020
1991	125	16	71	45	7	63	61	14	51	50	89	58	651
1992	16	39	67	28	59	104	66	105	36	77	102	65	763
1993	113	15	7	32	128	43	114	22	146	90	19	231	959
1994	95	34	68	57	66	39	34	63	106	64	47	81	753
1995	197	85	92	67	47	37	36	47	86	45	34	55	827
1996	6	74	23	5	82	18	34	90	38	81	124	51	626
1997	21	124	23	23	86	191	87	42	35	69	88	104	892
1998	77	6	61	142	55	41	53	26	114	213	32	51	872
1999	54	49	64	62	32	105	49	73	70	60	41	163	823
2000	29	85	65	47	76	41	197	62	109	95	145	87	1037
2001	118	73	138	121	16	79	85	47	114	52	77	60	980
2002	49	145	69	43	61	33	60	116	49	142	114	88	967
2003	102	18	47	52	96	48	51	47	24	47	46	25	603

Annexe 2.2 Cumuls de précipitation mensuels et annuels homogénéisés (en mm) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1854 à 2003.

en italique: année reconstituée

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1854	59	38	5	37	77	127	70	162	17	92	59	128	871
1855	17	31	72	24	65	61	94	122	15	115	8	56	680
1856	88	25	13	100	110	107	76	65	147	50	79	67	927
1857	55	11	38	64	87	46	25	25	116	51	15	27	560
1858	15	20	38	30	49	20	68	58	27	52	88	68	533
1859	48	60	33	69	120	85	26	19	97	63	76	86	782
1860	103	66	82	61	91	94	22	124	80	118	53	95	989
1861	19	28	134	27	61	61	121	33	135	9	121	39	788
1862	80	42	43	36	76	75	114	72	37	108	28	90	801
1863	77	32	71	35	42	70	18	50	99	80	50	107	731
1864	30	35	75	20	45	70	53	137	43	13	82	10	613
1865	97	69	39	4	71	21	95	56	4	114	45	7	621
1866	94	120	89	67	53	39	160	128	96	8	88	117	1059
1867	110	84	66	123	28	34	149	44	45	57	23	79	842
1868	99	56	59	70	68	33	55	46	49	72	35	151	793
1869	35	54	37	35	119	14	23	13	74	6	78	131	619
1870	79	29	17	5	16	10	24	74	93	189	83	78	697
1871	35	16	8	132	9	85	117	50	71	42	33	37	636
1872	97	48	71	63	102	28	45	96	40	88	199	110	987
1873	111	69	53	36	35	61	40	28	59	107	33	15	647
1874	32	22	18	14	43	17	47	19	47	25	57	130	471
1875	101	16	21	16	61	57	102	38	56	47	154	43	712
1876	30	130	149	31	39	40	56	59	140	43	80	105	902

Annexe 2.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1877	114	104	75	53	55	19	85	44	70	40	103	67	829
1878	25	28	38	46	65	79	27	137	24	114	85	70	738
1879	84	64	17	73	53	83	120	71	47	20	40	47	719
1880	25	62	29	38	3	80	29	8	25	130	74	143	645
1881	45	54	101	18	12	16	14	29	39	77	55	50	510
1882	32	57	62	80	21	107	97	97	130	111	151	68	1014
1883	35	27	6	26	22	26	116	28	106	70	61	34	557
1884	56	55	12	26	38	32	32	30	26	51	18	168	544
1885	36	86	40	37	64	33	28	42	59	94	33	45	597
1886	42	35	27	30	46	68	38	17	32	40	36	87	498
1887	10	23	43	37	124	33	13	25	19	34	35	123	518
1888	32	44	130	14	24	81	68	47	29	35	36	15	555
1889	9	101	37	51	66	58	59	70	38	45	20	66	620
1890	95	2	38	65	41	31	71	108	1	37	75	6	570
1891	37	2	39	33	101	90	130	67	46	39	65	133	782
1892	60	79	40	24	33	33	34	35	38	54	23	63	516
1893	36	115	14	0	13	34	72	21	40	110	69	65	589
1894	53	72	38	41	51	60	70	32	102	87	37	41	684
1895	87	22	83	36	36	93	103	39	3	82	87	122	793
1896	16	7	102	42	7	48	48	73	119	137	26	41	666
1897	11	82	84	87	20	71	57	126	59	11	25	94	727
1898	18	68	40	20	85	65	35	36	32	63	32	61	555
1899	109	18	30	101	42	47	56	14	128	43	24	80	692
1900	129	95	15	27	39	79	43	58	5	63	83	87	723
1901	39	31	89	105	30	51	59	81	124	64	33	101	807
1902	53	45	46	55	69	65	39	100	86	47	39	49	693

Annexe 2.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1903	40	37	68	77	31	41	94	125	43	115	69	34	774
1904	57	98	46	37	43	40	36	65	43	41	60	96	662
1905	51	33	108	43	71	104	57	136	87	51	115	33	889
1906	107	73	59	37	78	25	48	38	64	38	76	55	698
1907	24	20	48	61	87	63	45	65	20	80	75	43	631
1908	23	53	49	61	159	78	51	121	62	0	60	36	752
1909	36	21	74	39	36	119	101	42	77	78	30	103	757
1910	71	122	7	30	45	125	129	45	84	32	176	70	935
1911	19	42	54	36	17	84	29	34	21	73	95	121	627
1912	56	60	83	19	37	53	36	96	61	94	52	61	709
1913	80	38	32	52	96	92	66	12	70	45	94	44	721
1914	60	49	112	28	98	88	75	76	88	23	50	95	841
1915	119	60	37	39	39	17	77	63	29	15	87	169	752
1916	54	121	40	49	86	84	64	100	62	90	86	140	976
1917	81	9	88	49	63	70	93	121	22	146	49	24	815
1918	97	26	46	73	43	25	63	55	97	52	33	111	724
1919	90	58	90	79	13	14	99	32	55	26	124	125	804
1920	163	29	39	104	34	28	89	20	48	63	15	55	686
1921	81	9	11	20	58	7	13	69	24	6	40	42	380
1922	79	52	74	114	75	36	125	117	72	58	75	119	996
1923	44	84	59	34	104	53	76	56	73	222	84	56	945
1924	73	17	53	86	86	46	75	143	65	94	57	31	825
1925	66	63	45	84	99	26	73	128	65	76	55	170	949
1926	58	104	36	42	158	68	46	62	6	90	122	23	815
1927	51	63	77	73	16	77	80	158	90	19	80	67	851
1928	53	78	32	109	45	67	32	56	32	123	109	78	814
1929	21	29	1	47	74	62	58	23	10	154	99	133	712
1930	47	32	68	28	94	51	190	74	115	149	143	48	1038
1931	124	50	22	57	39	64	134	196	42	51	52	54	888
1932	55	2	45	100	72	44	80	61	131	148	43	11	791

Annexe 2.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1933	21	34	50	19	150	77	33	18	50	49	41	5	547
1934	56	21	67	50	30	67	44	60	37	80	53	103	668
1935	63	89	33	94	61	132	28	45	90	51	64	125	874
1936	132	44	28	111	1	111	104	89	66	49	79	38	853
1937	115	133	91	85	61	19	46	35	100	42	25	50	801
1938	142	35	21	17	81	21	87	114	29	78	85	61	770
1939	133	33	51	67	47	40	62	76	56	156	116	43	879
1940	37	44	83	81	18	69	134	38	110	27	117	47	805
1941	121	66	66	47	46	77	72	100	5	50	30	64	743
1942	60	16	48	36	91	52	112	17	46	59	52	57	646
1943	69	30	26	37	68	72	21	107	32	42	88	42	633
1944	57	33	13	31	8	71	82	40	109	106	118	97	764
1945	37	68	15	59	69	62	27	54	79	9	17	67	564
1946	54	104	24	65	86	73	94	49	64	25	56	65	758
1947	31	42	88	58	75	35	45	44	19	15	71	101	624
1948	133	54	19	65	39	74	82	127	29	18	42	46	728
1949	31	20	30	31	59	27	2	68	69	49	73	69	529
1950	32	119	19	108	63	73	69	92	82	33	113	104	907
1951	81	76	89	87	41	86	30	85	76	27	114	65	856
1952	103	48	75	15	56	57	45	70	119	91	137	105	920
1953	26	44	1	52	31	59	119	45	47	40	16	21	503
1954	48	31	33	31	45	67	63	132	113	69	62	79	773
1955	78	78	44	12	87	68	67	31	32	53	31	136	717
1956	81	14	33	69	71	70	90	83	51	67	49	54	732
1957	44	125	66	22	52	41	107	80	106	26	31	44	745
1958	99	103	22	46	131	74	62	139	48	65	47	107	942
1959	56	2	58	67	62	58	25	50	2	36	69	88	573
1960	61	64	58	26	42	76	114	81	67	88	107	69	854
1961	98	66	10	77	65	117	83	37	49	101	87	76	864
1962	77	69	95	65	65	4	57	42	57	14	36	71	653

Annexe 2.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1963	36	24	78	21	51	87	5	84	46	54	136	4	625
1964	32	27	44	34	25	26	13	82	75	79	96	61	594
1965	114	12	75	81	62	96	72	96	120	10	109	179	1025
1966	58	97	40	81	72	112	91	62	21	98	80	137	950
1967	33	68	53	33	93	56	58	63	100	115	69	65	806
1968	82	61	47	36	46	65	69	109	136	49	21	50	770
1969	45	54	72	73	50	66	41	79	24	2	106	32	644
1970	74	126	69	85	117	54	93	69	44	49	68	39	887
1971	70	27	26	28	71	87	41	56	18	43	65	14	546
1972	45	29	47	53	100	66	99	91	40	15	98	9	691
1973	26	47	6	49	93	26	70	45	31	64	52	56	565
1974	51	44	62	14	62	105	81	34	90	124	121	77	866
1975	64	13	91	46	50	39	35	23	84	13	87	23	568
1976	41	24	30	14	33	11	68	12	50	59	94	59	494
1977	71	141	40	59	34	69	69	89	13	48	92	60	786
1978	57	57	104	40	90	66	85	47	51	6	16	128	747
1979	44	76	112	79	126	37	22	74	31	64	92	133	890
1980	56	65	80	42	78	114	105	96	33	72	41	78	860
1981	55	35	100	59	81	119	49	78	115	138	45	123	996
1982	83	17	82	27	48	98	20	45	69	137	81	96	803
1983	45	51	54	130	158	78	17	41	70	33	56	50	782
1984	133	82	38	32	98	36	53	40	112	114	78	33	849
1985	39	24	55	62	52	141	43	89	43	18	80	57	704
1986	98	5	106	78	69	39	47	81	78	103	66	93	864
1987	30	48	61	32	72	140	122	64	69	155	73	29	894
1988	154	97	96	18	159	32	75	34	90	75	46	75	949
1989	16	39	73	139	27	75	65	53	41	28	37	108	702
1990	59	117	12	28	12	107	63	67	56	98	89	98	805
1991	125	16	71	45	7	63	61	14	51	50	89	58	651
1992	16	39	67	28	59	104	66	105	36	77	102	65	763

Annexe 2.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1993	113	15	7	32	128	43	114	22	146	90	19	231	959
1994	95	34	68	57	66	39	34	63	106	64	47	81	753
1995	197	85	92	67	47	37	36	47	86	45	34	55	827
1996	6	74	23	5	82	18	34	90	38	81	124	51	626
1997	21	124	23	23	86	191	87	42	35	69	88	104	892
1998	77	6	61	142	55	41	53	26	114	213	32	51	872
1999	54	49	64	62	32	105	49	73	70	60	41	163	823
2000	29	85	64	47	76	40	197	62	109	95	145	87	1036
2001	118	73	138	121	16	79	85	47	114	52	77	60	980
2002	49	145	69	43	61	33	60	116	49	142	114	88	967
2003	102	18	47	52	96	48	51	47	24	47	46	25	603

Annexe 3.1 Durées d'insolation mensuelles et annuelles brutes (en heures) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1931 à 2003.
Sources: 1931-1946 (Lahr 1950) et 1947-2003 (Service Météorologique de l'Aéroport).

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1931	51	86	134	151	190	201	216	209	172	116	57	46	1629
1932	60	87	153	158	206	214	225	208	176	115	64	55	1721
1933	89	56	168	174	170	233	285	268	191	103	72	93	1902
1934	42	69	106	196	266	224	326	189	179	69	52	11	1729
1935	30	70	181	106	233	262	299	197	163	95	47	16	1699
1936	33	94	125	101	243	226	131	188	126	90	43	21	1421
1937	53	45	76	87	242	267	227	216	157	86	40	25	1521
1938	32	103	202	186	214	303	250	182	171	110	35	45	1833
1939	16	101	151	157	181	275	236	212	164	51	49	51	1644
1940	92	75	152	137	203	211	220	203	172	105	53	41	1664
1941	59	75	135	144	184	197	217	206	171	112	70	56	1626
1942	50	102	160	168	207	226	237	212	180	110	49	38	1739
1943	66	105	150	166	200	225	249	223	174	115	59	44	1776
1944	62	111	158	175	217	224	228	197	178	118	57	55	1780
1945	47	83	154	159	203	211	220	203	172	105	53	41	1651
1946	68	37	114	218	202	202	300	146	128	101	24	46	1586
1947	96	59	88	233	231	250	282	313	215	207	36	27	2036
1948	14	91	195	199	245	192	179	186	164	124	98	77	1764
1949	79	114	212	214	179	276	331	230	222	135	62	35	2089
1950	67	61	168	114	254	275	268	244	63	116	24	23	1677
1951	18	44	113	186	176	175	234	187	180	163	29	37	1541
1952	13	76	99	214	223	256	274	196	90	97	33	30	1602
1953	25	54	183	182	227	148	185	256	179	97	60	42	1638
1954	86	64	96	194	226	205	158	153	86	81	74	22	1445
1955	40	49	181	225	209	190	213	203	163	119	81	21	1694
1956	41	138	127	155	245	93	175	177	150	64	61	33	1460
1957	56	56	161	213	254	270	179	178	95	116	38	29	1644

Annexe 3.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1958	48	53	132	176	178	176	225	159	168	93	21	35	1465
1959	73	168	131	155	242	264	299	257	288	180	36	10	2103
1960	48	64	85	177	226	234	163	150	147	56	33	24	1407
1961	44	88	195	105	152	229	217	215	178	101	46	60	1629
1962	52	85	143	163	168	304	207	240	160	175	36	83	1816
1963	92	100	109	134	214	178	308	126	129	104	46	73	1614
1964	48	69	89	140	245	294	323	208	201	111	46	37	1811
1965	24	102	125	119	199	198	133	182	131	191	60	18	1482
1966	77	57	114	131	242	225	176	210	223	68	31	29	1582
1967	57	103	115	213	231	237	317	223	106	84	74	48	1808
1968	51	63	137	241	159	176	218	141	107	78	58	38	1467
1969	17	60	106	166	186	195	257	182	183	152	34	33	1571
1970	21	58	93	111	198	256	190	223	188	81	59	55	1533
1971	65	54	114	241	214	147	326	214	207	179	51	29	1840
1972	59	68	180	123	147	186	203	193	196	170	49	84	1658
1973	57	84	161	128	192	279	200	272	200	134	80	41	1828
1974	29	69	85	241	212	231	197	205	138	28	38	26	1499
1975	28	173	69	132	225	221	282	274	132	86	58	60	1739
1976	43	54	180	258	269	334	252	270	120	97	38	38	1954
1977	32	44	118	151	215	149	198	156	172	79	47	47	1408
1978	29	36	93	187	165	165	181	199	122	108	45	58	1388
1979	52	53	66	133	204	209	182	168	172	114	61	20	1434
1980	61	93	67	174	233	122	125	163	162	103	67	37	1407
1981	69	110	74	171	169	172	142	199	152	56	74	19	1407
1982	66	106	134	203	237	193	244	200	209	52	44	33	1721
1983	24	97	106	112	83	223	326	252	147	123	85	50	1628
1984	26	96	147	215	109	223	238	180	63	67	52	25	1441
1985	45	148	81	148	177	162	285	225	201	168	39	52	1731
1986	27	132	115	95	218	245	236	182	195	114	56	43	1658
1987	62	46	154	198	185	160	225	193	140	92	49	49	1552

Annexe 3.1 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1988	20	78	61	237	205	196	222	264	113	96	80	16	1588
1989	31	27	154	90	356	251	271	246	170	129	122	56	1903
1990	13	86	146	168	323	144	305	248	141	128	43	29	1773
1991	71	122	100	225	249	139	276	322	174	86	52	59	1875
1992	59	84	89	159	268	206	223	219	147	85	31	60	1629
1993	52	52	186	174	211	263	213	266	112	47	67	4	1646
1994	32	63	103	150	173	273	281	215	110	149	24	29	1602
1995	44	43	136	119	226	197	279	238	103	98	70	40	1593
1996	30	61	152	247	133	254	269	223	168	96	20	54	1707
1997	70	59	141	227	262	177	247	262	251	160	62	23	1941
1998	63	125	126	103	231	218	164	252	101	46	71	34	1534
1999	66	75	114	169	211	237	279	215	168	119	64	28	1745
2000	56	85	92	172	190	303	160	294	139	86	26	41	1644
2001	63	89	67	134	271	209	248	256	91	106	95	91	1720
2002	60	78	154	217	202	238	202	168	216	98	33	24	1690
2003	73	158	199	237	223	283	287	324	258	120	55	45	2262

Annexe 3.2. Durées d'insolation mensuelles et annuelles homogénéisées (en heures) de la «station climatologique de Luxembourg-ville» de 1931 à 2003.

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1931	52	61	203	174	212	219	185	156	176	119	58	47	1663
1932	58	151	176	130	160	233	225	238	154	85	55	52	1718
1933	91	57	221	201	190	254	285	307	195	105	74	95	2076
1934	43	71	138	226	297	244	326	216	183	71	53	11	1880
1935	31	72	185	122	260	286	300	225	167	97	48	16	1809
1936	34	96	128	117	272	246	131	215	129	92	44	21	1525
1937	54	46	78	100	270	291	227	248	161	88	41	26	1630
1938	33	105	207	215	239	330	251	209	175	113	36	46	1958
1939	15	92	137	161	180	267	210	216	149	46	45	46	1565
1940	94	77	156	158	227	230	220	232	176	107	54	42	1773
1941	50	67	165	166	206	215	217	235	175	115	72	39	1721
1942	51	46	164	194	231	246	237	242	184	113	50	39	1798
1943	68	107	153	192	223	245	250	255	178	118	60	45	1894
1944	63	59	162	202	242	244	202	255	131	63	58	56	1739
1945	52	82	170	261	227	230	282	216	176	107	54	31	1888
1946	70	38	117	252	207	220	329	167	131	103	25	47	1705
1947	89	55	82	245	215	248	282	241	200	193	33	25	1907
1948	13	85	181	209	228	190	179	193	153	115	91	72	1709
1949	73	106	197	225	166	274	331	239	206	126	58	33	2034
1950	62	57	156	120	236	273	268	254	59	108	22	21	1636
1951	19	45	116	216	181	192	258	215	185	168	30	38	1664
1952	13	78	102	249	230	281	303	225	93	100	34	31	1738
1953	26	56	188	211	234	162	205	294	184	100	62	43	1766
1954	89	66	117	225	233	225	175	176	89	83	76	23	1577
1955	41	50	186	261	215	209	236	234	168	123	83	22	1828
1956	42	142	131	180	252	102	194	204	154	66	63	34	1564
1957	58	58	166	248	262	296	198	205	98	119	39	30	1775
1958	49	55	136	205	183	193	249	183	173	96	22	36	1580

Annexe 3.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1959	75	113	135	180	249	290	331	296	297	185	37	10	2198
1960	49	66	88	206	233	257	180	173	151	58	34	25	1519
1961	45	91	201	122	157	251	240	247	183	104	47	62	1750
1962	54	88	147	189	173	334	229	276	165	180	37	85	1956
1963	95	103	112	156	220	195	341	145	133	107	47	75	1730
1964	49	71	92	163	252	323	357	240	207	114	47	38	1954
1965	25	105	129	138	205	217	147	210	135	197	62	19	1588
1966	79	59	117	152	249	247	195	242	230	70	32	30	1702
1967	59	106	118	248	238	260	351	256	109	86	76	49	1957
1968	53	65	141	280	164	193	241	163	110	80	60	39	1588
1969	18	62	109	193	192	214	284	210	188	157	35	34	1695
1970	22	60	96	129	204	281	210	256	194	83	61	57	1652
1971	67	56	117	280	220	161	360	246	213	184	53	30	1988
1972	61	70	185	143	151	204	224	222	202	175	50	86	1775
1973	59	86	166	149	198	306	221	313	206	138	82	42	1967
1974	30	71	88	280	218	254	218	236	142	29	39	27	1631
1975	29	178	71	153	232	243	312	315	136	89	60	62	1879
1976	44	56	185	300	277	367	279	311	124	100	39	39	2120
1977	33	45	122	175	221	164	219	179	177	81	48	48	1514
1978	30	37	96	217	170	181	200	230	126	111	46	60	1503
1979	54	55	68	155	210	229	202	194	177	117	63	21	1543
1980	63	96	69	202	240	134	138	187	167	106	69	38	1509
1981	71	113	76	199	174	189	158	230	157	58	76	20	1519
1982	68	109	138	236	244	212	270	231	215	54	45	34	1855
1983	25	100	109	130	85	245	360	290	151	127	88	51	1762
1984	27	99	151	250	112	245	264	207	65	69	54	26	1568
1985	46	152	83	172	182	178	315	259	207	173	40	54	1862
1986	28	136	118	110	224	269	262	210	201	117	58	44	1778
1987	64	47	159	230	190	176	249	222	144	95	50	50	1677
1988	21	80	63	244	211	215	246	304	116	99	82	16	1698

Annexe 3.2 (suite)

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre	année
1989	32	28	159	93	367	275	279	253	175	133	126	58	1976
1990	13	89	150	173	333	158	314	255	145	132	44	30	1836
1991	71	122	100	225	249	148	276	322	174	86	52	59	1884
1992	59	84	89	159	268	206	223	219	147	85	31	60	1630
1993	52	52	186	174	211	263	213	266	112	47	67	4	1647
1994	32	63	103	150	173	273	281	215	110	149	24	29	1602
1995	44	43	136	119	226	197	279	238	103	98	70	40	1593
1996	30	61	152	247	133	254	269	223	168	96	20	54	1707
1997	70	59	141	227	262	177	247	262	251	160	62	23	1941
1998	63	125	126	103	231	218	164	252	101	46	71	34	1534
1999	66	75	114	169	211	237	279	215	168	119	64	28	1745
2000	56	85	92	172	190	303	160	294	139	86	26	41	1644
2001	63	89	67	134	271	209	248	256	91	106	95	91	1720
2002	60	78	154	217	202	238	202	168	216	98	33	24	1690
2003	73	158	199	237	223	283	287	324	258	120	55	45	2262

Evolution du climat et répercussions sur le fonctionnement des hydrosystèmes au Grand-Duché de Luxembourg au cours des 150 dernières années

Laurent Pfister

CREBS – Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, 162a, Ave. de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Gilles Drogue

CREBS – Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, 162a, Ave. de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Christelle Poirier

ANETAME Ingénierie,
21, chemin du Plateau, F-67500 Haguenau, France

Lucien Hoffmann

CREBS – Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann, 162a, Ave. de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Résumé

Les débuts de l'étude scientifique du climat au Grand-Duché de Luxembourg peuvent être situés au milieu du 19^{ème} siècle, avec le démarrage systématique de relevés de diverses variables météorologiques par des professeurs de l'enseignement secondaire à Luxembourg-ville. Les premières observations hydrologiques systématiques ont démarré vers la fin du 19^{ème} siècle sur les principaux cours d'eau luxembourgeois, comme la Sûre ou encore la Moselle.

Suite aux aléas de la deuxième guerre mondiale, bon nombre des observations réalisées jusqu'au milieu des années 1940 ont été vraisemblablement perdues. Néanmoins, les quelques séries hydro-climatologiques

qui existent encore aujourd'hui ont permis, combinées avec les relevés de plus en plus nombreux et précis réalisés depuis le milieu du 20^{ème} siècle, d'étudier les grandes tendances dans le fonctionnement de nos hydrosystèmes, de même que leur sensibilité aux variations des facteurs climatiques. Il ressort de l'analyse de ces observations historiques que depuis le milieu du 20^{ème} siècle, les précipitations hivernales ont été marquées par une forte augmentation, essentiellement sous l'impulsion d'un accroissement sensible du nombre de journées avec des circulations atmosphériques de secteur Ouest. Les hydrosystèmes ont réagi à ces changements pluviométriques par un accroissement sensible des débits maximums en période hivernale.

Abstract

The scientific study of the climate of the Grand-Duchy of Luxembourg started by the middle of the 19th century, when systematic observations of climatic variables first took place on a regular basis. This actually was an initiative of a few professors of secondary schools of the city of Luxembourg. The first hydrological observations started by the end of the 19th century on the main rivers of the hydrographical network of the Grand-Duchy of Luxembourg, namely the Sure and the Moselle.

As a result of the second World War, many observations that had been made until the middle of the 1940s were probably lost. However, some historical hydro-climatological observation series are still available today. Their analysis, together with data issued by an ever increasing observation network during the second half of the 20th century, has allowed to study trends in the behaviour of the river systems, as well as their sensitivity to the variability of climatological variables. The analysis of those historical observation series has shown that since

the middle of the 20th century, winter rainfall has been characterised by a strong increasing trend, mainly due to a marked increase in the number of days with westerly

atmospheric circulations. The river systems have reacted to these changes in rainfall with a statistically significant increase of maximum daily runoff during winter.

Zusammenfassung

Die Anfänge der wissenschaftlichen Erfassung des Klimas im Grossherzogtum Luxemburg gehen auf die zweite Hälfte des 19^{ten} Jahrhunderts zurück, mit der systematischen Aufzeichnung der Tageswerte verschiedener meteorologischer Parameter durch Professoren des Sekundarunterrichts in Luxemburg-Stadt. Die ersten systematischen hydrologischen Aufzeichnungen auf unseren Hauptgewässern Sauer und Mosel datieren vom Ende des 19^{ten} Jahrhunderts.

Im Laufe des zweiten Weltkriegs sind viele hydro-meteorologische Aufzeichnungen die bis zur Mitte der 1940^{er} Jahre aufgezeichnet worden waren vermutlich zerstört worden. Trotz dieser schwierigen Datenlage konnten mittels einiger noch erhaltener Aufzeichnungen, kombiniert mit den rezenteren Daten die seit

der zweiten Hälfte des 20^{ten} Jahrhunderts in immer grösserer räumlicher und zeitlicher Auflösung erfasst werden, die Haupttendenzen im Verhalten unserer Flusssysteme, sowie deren Empfindlichkeit gegenüber der Variabilität von klimatologischen Variablen, studiert werden. Aus der Analyse dieser historischen Beobachtungsreihen ist hervorgegangen, dass seit der Mitte des 20^{ten} Jahrhunderts die Winterregenschichten sich durch eine starke Zunahme auszeichnen. Dies ist hauptsächlich auf den immer stärker werdenden Einfluss der Zahl an Wintertagen mit atmosphärischen Westzirkulationen zurückzuführen. Unsere Flusssysteme haben auf diese Änderungen in der zeitlichen Regenverteilung mit einer empfindlichen Zunahme der maximalen täglichen Wasserstände reagiert.

1. Introduction

En 1854, le professeur François Reuter-Chomé, enseignant la chimie à l'Athénée de Luxembourg, a démarré des observations journalières de température, de pluie et de pression atmosphérique (Drogue *et al.* dans ce volume). Une série complète d'observations météorologiques couvrant presque intégralement la deuxième moitié du 19^{ème} siècle est disponible, le professeur Reuter-Chomé ayant cessé ses relevés en 1895. Il a sans cesse milité en faveur de l'installation d'un réseau d'observation officiel tout au long de sa vie; en vain. A partir du début du 20^{ème} siècle l'Administration des Services Agricoles a mis en place un réseau d'observation comptant jusqu'à une vingtaine de postes d'observation. Rares furent cependant les sites d'observation ayant fonctionné sur des périodes prolongées de plusieurs décennies. De plus, au cours de la deuxième guerre mondiale un grand nombre de ces relevés météorologiques a malheureusement été saisi par l'occupant et la plupart de ces données n'ont pas été retrouvées jusqu'à présent. Il est donc à craindre qu'elles n'aient été définitivement perdues.

Néanmoins, grâce au travail de longue haleine de Eugène Lahr (1950), un recueil très fourni de toutes les séries d'observations météorologiques historiques remontant jusqu'au milieu du 19^{ème} siècle et couvrant près de 100 ans est aujourd'hui disponible (Drogue *et al.*, article précédant dans ce volume).

Depuis le milieu du 20^{ème} siècle, l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture continue de gérer un réseau d'observation des variables

météorologiques dont la densité n'a cessé de croître au fil des ans. D'abord réalisés par des bénévoles au pas de temps journalier, les relevés se font aujourd'hui de plus en plus souvent au moyen de systèmes de mesure automatisés, interrogeables à distance.

Les premières mesures limnimétriques systématiques ont été réalisées sur quelques cours d'eau à partir de la fin du 19^{ème} siècle. De multiples échelles limnimétriques furent installées par les pouvoirs publics sur les principaux cours d'eau comme l'Alzette, l'Eisch, la Mamer, la Sûre, ou encore la Moselle. Cependant, la plupart de ces observations ont été égarées, voire définitivement perdues, comme c'est le cas des relevés acquis jusqu'à la fin des années 1940. Un travail de recherche systématique dans les archives de diverses administrations a néanmoins permis de retrouver récemment un certain nombre de ces séries d'observations limnimétriques historiques.

A partir de 1950, l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture a progressivement remis en place un réseau d'échelles limnimétriques sur lesquelles des relevés étaient faits quotidiennement. Cependant, les inondations catastrophiques de 1993 et 1995 ont montré que ce système n'était plus adapté aux besoins de notre société moderne en matière de prévision et de préalerte aux crues et inondations. Dès lors, les pouvoirs publics ont procédé à l'installation progressive d'un réseau d'observation des niveaux limnimétriques totalement automatisé et relié en temps réel à un centre de calculs, chargé de fournir plusieurs heures à l'avance l'annonce d'éventuelles ondes de crue, voire d'inondations.

L'occurrence de plusieurs inondations importantes au Grand-Duché de Luxembourg, ainsi que dans des régions limitrophes au cours des 10 dernières années, a fait craindre aux milieux politiques et au grand public, qu'un changement était intervenu dans la relation pluie-débit de nos hydrosystèmes. Or, vu la complexité des processus hydro-climatologiques en jeu d'une part, et le nombre relativement faible d'enregistrements de variables climatologiques et hydrologiques sur de nombreuses décennies d'autre part, il était extrêmement difficile, voire aléatoire, de proposer sans une analyse approfondie des données existantes des explications fiables quant à l'origine de ces changements.

Dans ce contexte, le Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann a entrepris, en étroite collaboration avec les pouvoirs publics, des recherches systématiques sur deux volets complémentaires. D'une part, la saisie et l'analyse systématique de toutes les données hydro-climatologiques historiques disponibles doivent permettre de déterminer s'il y a des preuves scientifiques d'un changement dans la relation pluie-débit au Grand-Duché de Luxembourg, et d'autre part la mise en place d'un réseau de limnigraphes et de stations météorologiques d'une densité spatio-temporelle élevée et complémentaire au réseau des pouvoirs publics doit permettre de mieux comprendre la genèse des crues et inondations à l'échelle événementielle.

Cet article va ainsi traiter des résultats obtenus plus particulièrement dans le cadre de recherches menées par le Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann sur les changements dans la relation pluie-débit au cours des 150 dernières années au Grand-Duché de Luxembourg.

2. Hydro-climatologie du Grand-Duché de Luxembourg

2.1. La base de données hydro-climatologiques

Les séries de données climatologiques utilisées dans le cadre de cette étude sont décrites en détail, à la fois quant à leur origine et leur qualité, dans l'article 'Les archives climatologiques quantitatives de Luxembourg-ville: analyse primaire des longues séries chronologiques (1838-2003)' (Drogue *et al.*, article précédant dans ce volume).

Les séries d'observations hydrométriques, beaucoup moins nombreuses que les séries de variables climatologiques, couvrent les périodes suivantes:

1855-1869: Sûre à Wasserbillig (débits moyens annuels).

1876-1917: Sûre à Steinheim (débits moyens mensuels et débits maximums journaliers).

1949-2003: Sûre et affluents (Tab. 1).

L'inconvénient majeur des séries d'observations limnimétriques historiques est que les relevés quotidiens ont été faits la plupart du temps à des heures fixes. L'estimation des niveaux limnimétriques maximums est ainsi rendue très difficile, sans parler des problèmes liés à la fiabilité des courbes de tarage pour ces sites d'observation anciens.

Le Tab. 1 reprend les séries d'observations limnimétriques saisies à ce jour sur support informatique. Pour de très nombreuses stations, il faut cependant mentionner qu'il y a de fréquentes ruptures dans les séries de relevés (données non publiées).

De plus, des courbes de tarage fiables sur toute la gamme des relevés de hauteurs limnimétriques ne sont pas disponibles. Par conséquent, la transformation des hauteurs d'eau observées en débits est la plupart du temps extrêmement difficile, et donc entachée d'une très grande incertitude.

Un des meilleurs moyens pour contrôler les cotes limnimétriques journalières relevées en divers endroits du réseau hydrographique est la comparaison des débits spécifiques (Bultot *et al.* 1971). Or, comme des courbes de tarage fiables font défaut sur la grande majorité des stations limnimétriques historiques, il a fallu recourir à un test prenant appui sur l'équation de régression entre les cotes limnimétriques des différentes stations, celles-ci étant situées dans une région relativement homogène au niveau climatique.

L'étude de la qualité des séries d'observations a permis de mettre en évidence toute une série de problèmes dans de multiples sites d'observation. Outre des ruptures récurrentes dans les séries, les changements de sites d'observation sur un même cours d'eau, les changements de repère sur les échelles limnimétriques, ou encore les changements dans la forme des lits des cours d'eau sont autant de sources d'erreurs de mesure qui ont entraîné l'exclusion de ces séries d'observations dans le cadre de l'étude portant sur l'analyse de tendances. Ainsi, seules les stations Stadtbredimus (Aalbach), Esch/Alzette (Alzette), Steinsel (Alzette), Colmar-Berg (Attert), Gemünd (Our), Felsmühle (Syre), Ettelbruck (Wark), Goebelmühle (Wiltz) et Winseler (Wiltz) ont pu être retenues (Tab. 1).

Tab. 1. Stations limnimétriques saisies sur support informatique à ce jour (En gras: stations retenues pour l'analyse des tendances).

Cours d'eau	Stations	Début observations	Fin observations
Aalbach	Stadbredimus	1956	En cours
Alzette	Esch/Alzette A	1949	En cours
Alzette	Esch/Alzette B	1949	1981
Alzette	Itzigersté	1949	1983
Alzette	Beggen	1949	1974
Alzette	Steinsel	1969	En cours
Alzette	Moesdorf	1966	1977
Alzette	Ettelbruck	1949	En cours
Attert	Ell	1992	1994
Attert	Colmar-Berg	1949	En cours
Blees	Bleesmillen	1969	1988
Chiers	Rodange	1949	1970
Clerve	Kautenbach	1949	En cours
Dudelingenbach	Bettembourg	1949	1973
Eisch	Hunnebour	1949	1973
Ernz-Blanche	Reisdorf	1949	En cours
Ernz-Noire	Grundhof	1949	En cours
Kaylbach	Noertzange	1949	1969
Mamer	Mersch	1949	1983
Our	Gemünd	1962	En cours
Sûre	Michelau	1949	En cours
Syre	Felsmühle	1949	En cours
Wark	Ettelbruck	1949	En cours
Wiltz	Goebelsmühle	1949	En cours
Wiltz	Winseler	1949	En cours

2.2. Le régime hydrologique des cours d'eau luxembourgeois

Comme le montre la Fig. 1, la variation saisonnière de l'écoulement des cours d'eau luxembourgeois est de type unimodal (Pfister 2000), avec des hautes eaux centrées sur l'hiver (maximum en février), alternant avec les basses eaux d'été (minimum en septembre).

Le coefficient mensuel de débit (CMD = débit moyen mensuel / module annuel) souligne le caractère pluvial océanique du régime hydrologique des cours d'eau luxembourgeois (Fig. 1). Il est important de souligner que la saisonnalité de l'écoulement est beaucoup plus marquée que ne le sont les apports pluviométriques, qui ont une répartition plus régulière sur l'année. L'évolution de l'évapotranspiration au fil des mois (importante en été et faible en hiver) est un des facteurs clés dans cette variation saisonnière des écoulements. Le régime des cours d'eau luxembourgeois, à l'exception de la Moselle, peut ainsi être qualifié de 'pluvio-évaporal' (Loup 1974).

3. Analyses de séries hydro-climatologiques historiques au Grand-Duché de Luxembourg

Le Grand-Duché de Luxembourg, tout comme d'autres pays de l'Europe de l'Ouest, ont subi de multiples crues et inondations de grande ampleur au cours de la dernière décennie. Les pertes économiques liées à ces événements catastrophiques ont souvent été très importantes. La décrue à peine entamée, les changements dans l'occupation du sol, ainsi que le changement climatique étaient tour à tour accusés comme étant à l'origine de ces événements hydro-climatologiques majeurs (Mansell 1997; Pfister *et al.* 2000; Robinson *et al.* 2000; Pfister *et al.* 2004). Toutefois, les interactions du système climatique avec les hydrosystèmes sont d'une telle complexité, que la détection des causes qui sont à l'origine des changements dans la relation pluie-débit est extrêmement difficile.

Les tendances dans les séries hydrologiques ont souvent été liées à des changements qui ont affecté des variables climatologiques au cours des dernières décennies (McCabe 1996; Mansell 1997; Pfister *et al.* 2000; Hisdal *et al.* 2001; de Wit *et al.* 2001; Burn & Elnur 2002). Le système climatique est reconnu comme étant soumis à l'influence de changements qui sont d'origine anthropique et naturelle (Kondratyev & Cracknell 1998). Il a également été démontré que des changements dans l'occupation du sol, comme la déforestation, le drainage agricole, ou encore l'urbanisation, sont susceptibles de changer le comportement hydrologique des hydrosystèmes (Cosandey & Robinson 2000; Robinson *et al.* 2000).

Depuis que le Grand-Duché de Luxembourg a été soumis à de graves crues et inondations au milieu des années 1990, des efforts considérables ont été fournis pour mieux comprendre les facteurs qui ont généré ces événements. Il s'agit là d'une étape indispensable pour mieux évaluer les possibles futurs changements qui pourraient s'opérer d'ici une cinquantaine d'années sous l'effet d'un changement climatique éventuel, de même que leurs conséquences sur les infrastructures du pays.

Les travaux de recherche menés par le CRP-Gabriel Lippmann dans ce domaine ont porté plus particulièrement sur la relation existant entre des observations historiques de données pluie-débit et les types de circulations atmosphériques pour plusieurs affluents de la Sûre au Grand-Duché de Luxembourg. Pour ces recherches les données de pluie journalières étaient disponibles pour la période 1854-1884. De 1885 à 1949 seules les hauteurs pluviométriques mensuelles ont pu être

utilisées. Depuis, le nombre de postes d'observation a considérablement augmenté et des séries d'observation journalières complètes existent pour 13 postes d'observation sur la période 1954-2002.

Les changements ayant caractérisé les séries pluviométriques au cours des décennies successives ont été analysés et interprétés à travers l'utilisation de la classification des circulations atmosphériques (Grosswetterlagen), établie par Hess et Brezowski (1977). Cette classification journalière des circulations atmosphériques au-dessus de l'Europe de l'Ouest est disponible depuis 1881. Des relevés limnimétriques journaliers fiables, archivés depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, sont disponibles en série complète sur 9 postes d'observation au Grand-Duché de Luxembourg (Tab. 1).

La mise en relation des variations dans la relation pluie-débit au Grand-Duché de Luxembourg avec les types de circulations atmosphériques prédominants jour après jour au-dessus de l'Europe occidentale s'est imposée au vu des découvertes faites au cours des dernières années dans le domaine de l'hydro-climatologie à l'échelle de la planète. En effet, les modifications dans la répartition spatiale et temporelle des précipitations ont été largement documentées au cours des dernières années (Karl & Knight 1998; Osborn *et al.* 2000; Lebourgeois *et al.* 2001; De Luis *et al.* 2000; Brunetti *et al.* 2001; Hisdal *et al.* 2001). De nombreux travaux de recherche menés sur les tendances dans les séries hydrologiques ont lié celles-ci à des changements qui ont affecté d'abord des variables climatologiques (Mansell 1997; McCabe 1996; Pfister *et al.* 2000; Groisman *et al.* 2001; Hisdal *et al.* 2001; de Wit *et al.* 2001; Burn & Elnur 2002).

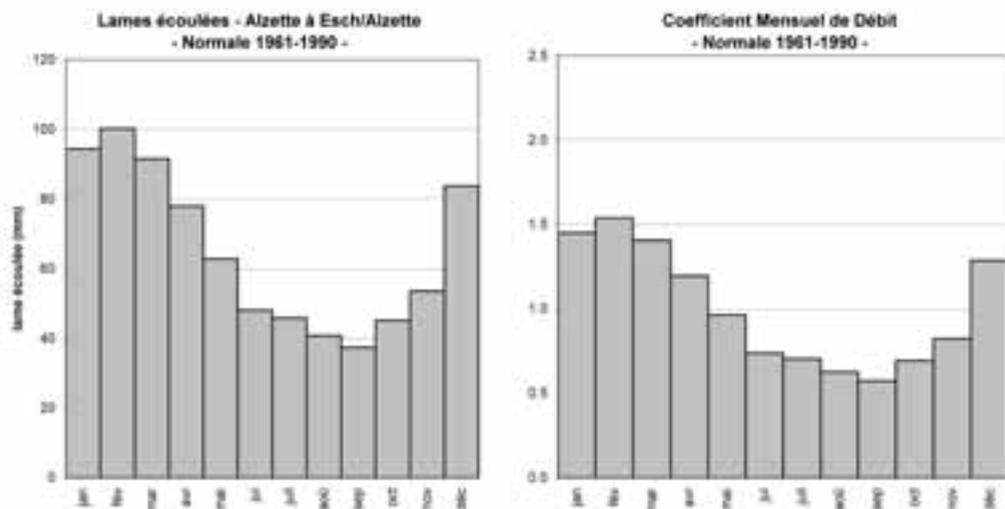


Fig. 1. Lames mensuelles écoulées et coefficients mensuels de débit de l'Alzette à Esch/Alzette (1961-1990). D'après Pfister (2000).

Après l'accumulation de preuves concernant les changements affectant les caractéristiques spatio-temporelles des apports pluviométriques en Europe, avec toutes les conséquences que cela implique au niveau de la réaction des hydrosystèmes, la relation entre les circulations atmosphériques et l'écoulement dans les cours d'eau est aujourd'hui étudiée de manière systématique. Hurrell & van Loon (1997) ont montré que l'Oscillation Nord Atlantique est restée dans une phase positive intense depuis 1980, contribuant ainsi très largement au réchauffement des températures hivernales au-dessus de l'Europe septentrionale, tout comme à des conditions nettement plus humides que la normale 1961-1990. Dans le Nord-Ouest de l'Europe, les totaux pluviométriques annuels dépendent principalement des circulations atmosphériques dites zonales, qui s'accompagnent de dépressions circulant dans le sens Ouest-Est au-dessus de l'Océan Atlantique. Ce sont donc ces circulations atmosphériques de secteur Ouest qui amènent, sous forme de familles de dépressions atmosphériques entières, des masses d'air douces et humides depuis l'Océan Atlantique vers l'Europe de l'Ouest. Or, des changements dans l'occurrence des journées avec des circulations atmosphériques de secteur Ouest ont été observés dans de nombreuses parties de l'Europe du Nord-Ouest au cours des 25 dernières années. Leur impact sur les apports pluviométriques et *in fine* sur l'écoulement s'est révélé être d'une importance capitale (Mansell 1997; Pfister *et al.* 2000; Pfister *et al.* 2004). Des études semblables menées aux Etats-Unis par McCabe (1996) et Lins & Michaels (1996) ont démontré que les variations dans la structure spatiale et temporelle des précipitations peuvent avoir des répercussions très importantes sur le régime des cours d'eau.

3.1. Analyse des séries pluviométriques

3.1.1. Variations observées dans les séries pluviométriques

L'analyse de données pluviométriques mensuelles sur la période 1854-2002 à Luxembourg-ville a révélé d'importantes fluctuations au fil des décennies (Pfister & Hoffmann 2002). Ainsi, autour de 1885, tout comme dans les années 1940 et 1970, les moyennes mobiles quinquennales n'ont varié qu'entre 550 et 640 mm, alors que dans les années 1860, 1920, 1960, 1980 et 2000 les moyennes quinquennales mobiles des hauteurs pluviométriques annuelles maximales atteignaient des valeurs comprises entre 820 et 940 mm (Fig. 2). Depuis 1980, 12 années avec plus de 800 mm de pluie ont été enregistrées. Le total pluviométrique annuel maximal absolu sur la

période d'observation 1854-2002 a été observé en 2000, avec 1187 mm.

Dans les grandes lignes les mêmes périodes de forte et de faible pluviosité ont pu être déterminées pour les semestres d'hiver (octobre-mars) et d'été (avril-septembre). Une forte variabilité du rapport entre les cumuls de pluie estivaux et hivernaux a pu être mise en évidence (Fig. 3). Aucune tendance nette ne peut être montrée sur ce rapport sur les 150 dernières années.

Cependant, l'étude de la structure des épisodes pluviométriques depuis 1954, début des relevés pluviométriques journaliers réguliers, a révélé quelques changements, notamment au cours des mois hivernaux. Ainsi, la contribution maximale due à un seul épisode pluvieux, correspondant à une séquence de journées pluvieuses qui n'a pas été interrompue par au moins une journée sans pluie, est passée de 200 mm dans les années 1970 à près de 450 mm dans les années 1990 (Pfister *et al.* 2000).

Afin de déterminer le rôle des circulations atmosphériques dans la répartition temporelle des précipitations au Grand-Duché de Luxembourg, une analyse détaillée de la contribution des différents types de circulations atmosphériques a été réalisée. Du fait que les relevés pluviométriques journaliers continus en de multiples postes d'observation ne sont disponibles que depuis le début des années 1950, cette analyse a dû être restreinte à la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Hess & Brezowski (1977) ont défini un ensemble de 29 types de circulations atmosphériques, qui correspondent à la distribution spatiale moyenne des pressions atmosphériques qui persistent pendant quelques jours au-dessus de l'Europe occidentale. Ces circulations peuvent être classées en trois grandes catégories, à savoir les circulations zonales, méridiennes et mélangées. Le Tab. 2 montre les contributions moyennes annuelles, estivales et hivernales dues à ces trois catégories pour les postes pluviométriques de Belvaux et Luxembourg-ville (Pfister *et al.* 2000).

Comme on peut le constater dans le Tab. 2, les circulations zonales sont associées avec plus de 55% des précipitations hivernales, suivies par des contributions presque équivalentes des circulations méridiennes et mélangées (environ 20%). Au cours des mois d'été, ce sont les circulations mélangées qui dominent, avec un apport de 45% à la pluviosité totale, tandis que les contributions des circulations zonales et méridiennes varient entre 25 et 30%. Parmi les types de circulations atmosphériques zonales, comprenant les circulations de secteur Nord-Ouest à Sud-Ouest, ce sont très clairement les circulations de secteur Ouest qui ont eu une influence grandissante sur la pluviosité hivernale depuis les années 1970 (Pfister 2000).

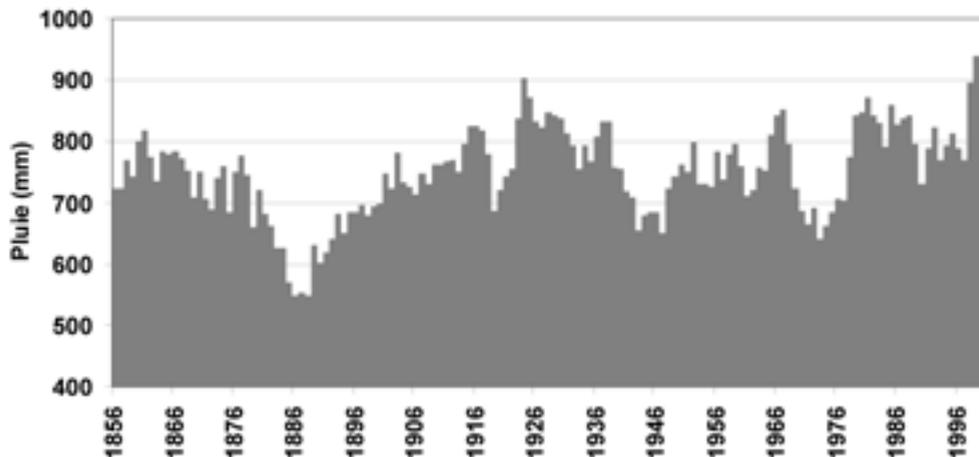


Fig. 2. Moyenne quinquennale mobile des cumuls pluviométriques annuels (octobre - septembre) à Luxembourg-ville entre 1856 et 2000.

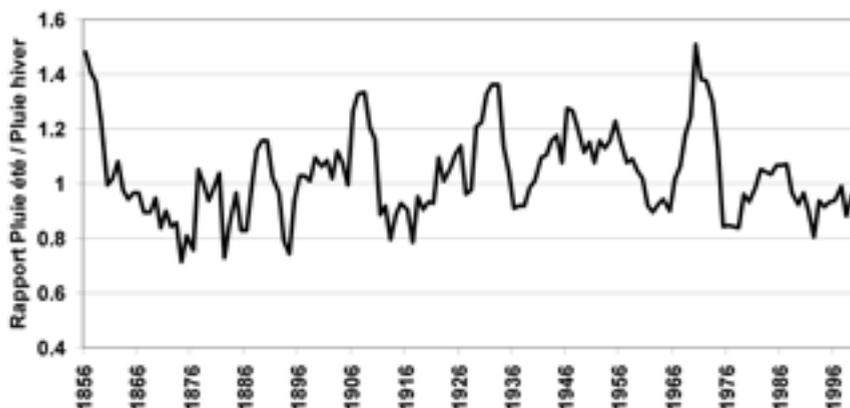


Fig. 3. Moyenne mobile quinquennale du rapport entre cumuls pluviométriques estivaux (avril - septembre) et hivernaux (octobre - mars) à Luxembourg-ville entre 1856 et 2000.

Pendant l'hiver, une augmentation moyenne de 230 mm due aux circulations d'Ouest sur la moyenne mobile quinquennale a pu être observée depuis les années 1950. Par conséquent, la contribution de ce type de flux atmosphérique à la pluviosité hivernale est passée de 20% dans les années 1950 à plus de 50% dans les années 1990 (Pfister 2000).

Alors que la moyenne quinquennale mobile de l'occurrence des journées avec circulations d'Ouest pendant le semestre hivernal variait entre 15 et 35 jours entre le milieu du 19^{ème} siècle et le milieu du 20^{ème} siècle, une forte augmentation du nombre de journées avec des circulations de secteur Ouest a pu être mise en évidence depuis les années 1950. La moyenne mobile quinquennale de l'occurrence est passée d'un peu plus de 15 jours dans les années 1950 à près de 45 jours au début des années

1990 (Fig. 4). Depuis, cette occurrence a légèrement baissé, mais reste encore très largement supérieure aux valeurs observées avant 1950. La variabilité de la pluviosité hivernale au Grand-Duché de Luxembourg est ainsi essentiellement due à des variations qui affectent la répartition des circulations atmosphériques au fil des saisons.

L'analyse des 110 dernières années montre que la répartition saisonnière des types de circulations atmosphériques a également subi des changements significatifs. Au début du 20^{ème} siècle, les circulations atmosphériques de secteur Ouest dominaient pendant le semestre estival, alors que depuis les années 1980, elles sont devenues plus fréquentes et persistantes au cours des mois hivernaux.

Au vu des variations observées dans les séries pluviométriques d'une part et du lien très fort

Tab. 2. Contributions moyennes annuelles, hivernales et estivales aux précipitations totales en fonction des trois catégories de circulations atmosphériques (zonales, méridiennes et mélangées) aux postes d'observation de Belvaux et Luxembourg-Findel (1954-1996).

	Année	Hiver	Eté
	%	%	%
Belvaux			
Circulation zonale	45.0	56.2	30.2
Circulation méridienne	23.3	21.8	25.2
Circulation mélangée	31.7	22.0	44.6
Luxembourg-ville			
Circulation zonale	44.0	56.9	30.8
Circulation méridienne	21.7	18.8	24.6
Circulation mélangée	34.3	24.3	44.6

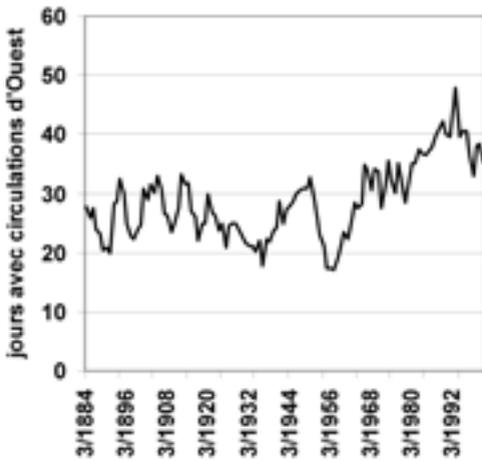


Fig. 4. Moyenne mobile quinquennale de l'occurrence hivernale de journées avec des circulations de secteur Ouest entre 1882 et 2003.

existant entre la pluviosité et les types de circulations atmosphériques d'autre part, une étude plus approfondie des tendances au moyen de tests statistiques s'est imposée. L'apport d'outils d'analyse statistiques devait notamment permettre d'évaluer le lien éventuel qui pouvait exister entre les variations qui ont pu affecter les apports pluviométriques et la réaction des hydrosystèmes.

3.1.2. Recherche de tendances dans les séries pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg

La recherche de tendances monotones dans les séries d'observations pluviométriques journalières a été réalisée sur la période 1954-2000 au moyen du test statistique de Kendall (Capéraà & Van Cutrem 1988). Ce test doit permettre d'estimer si une variable X marque ou non une tendance statistiquement significative vers une augmentation ou vers une diminution au cours du temps (variable Y).

Deux hypothèses sont formulées au départ:

H_0 : $\tau = 0$, il n'existe pas de corrélation entre X et Y

H_1 : $\tau \neq 0$, X et Y sont corrélés

Pour réaliser le test, le S de Kendall doit d'abord être calculé à partir des couples X, Y :

$$S = A - B$$

avec $A =$ nombre de cas où $Y_i < Y_j$, et $i < j$

$B =$ nombre de cas où $Y_i > Y_j$, et $i < j$

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)}$$

La variable T , associée à τ , de distribution normale et de moyenne égale à zéro, a une variance de:

$$\sigma_\tau = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)}$$

Le test de significativité est basé sur l'expression:

$$z_{\tau} = \tau \sqrt{\frac{9n(n-1)}{2(2n+5)}}$$

L'hypothèse nulle est rejetée au niveau de significativité α si $z_{\tau} > z_{\alpha/2}$ avec $z_{\alpha/2}$ étant la valeur critique.

Dans le cas d'une tendance significativement positive, l'hypothèse nulle ($\tau = 0$) est rejetée quand la variable auxiliaire z_{τ} est supérieure au seuil z_{α} ($z_{\tau} > z_{\alpha}$). z_{τ} est inférieur à $-z_{\alpha}$ dans le cas d'une tendance négative statistiquement significative ($z_{\tau} < -z_{\alpha}$).

Le test de Kendall a été appliqué sur une série de variables destinées à décrire autant que possible toutes les caractéristiques des apports

pluviométriques hivernaux. Ainsi, 12 variables ont été retenues dans un premier temps. Celles-ci décrivent des caractéristiques relatives à la quantité de pluie tombée, à l'intensité, ainsi qu'à la durée des épisodes pluvieux (Pfister *et al.* 2004).

Sur l'ensemble du territoire du Grand-Duché de Luxembourg, une tendance positive vers l'augmentation du nombre de jours pluvieux a pu être déterminée (Tab. 3). Toutefois, cette tendance ne s'est avérée être statistiquement significative que dans 6 stations pluviométriques sur 21. De manière similaire, la pluie totale hivernale a également été caractérisée par une tendance positive au cours des 50 dernières années, avec une significativité statistique confirmée dans 10 postes d'observation sur 21.

Tab. 3. Tendances constatées dans les stations pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg (1954-2000) et dans les régions limitrophes pour diverses caractéristiques pluviométriques (tendance positive statistiquement significative, +; tendance positive statistiquement non significative, (+); tendance négative statistiquement non significative, (-); tendance négative statistiquement significative, -). Sources données: Administration des Services Techniques de l'Agriculture (L), Deutscher Wetterdienst (D), Institut Royal de Météorologie (B).

	Jours avec pluie en hiver	Pluie totale hivernale	Pluie par épisode pluvieux	Pluie hivernale sous circulations de secteur Ouest
Aéroport-Findel	(+)	(+)	(+)	+
Altrier	(+)	(+)	(+)	+
Arlon (B)	+	+	+	+
Arsdorf	(+)	(+)	(+)	+
Belvaux	(+)	(+)	(+)	+
Bettborn	(+)	(+)	+	+
Bitburg (D)	+	+	+	+
Clervaux	(+)	(+)	+	+
Dasburg (D)	(+)	+	+	+
Ermsdorf	(+)	(+)	(+)	+
Kehmen	+	+	(+)	+
Koerich	(-)	+	+	+
Libramont (B)	(+)	+	+	+
Lorentzweiler	+	+	+	+
Mettlach (D)	(+)	+	(+)	+
Remerschen	+	(+)	+	+
Roeser	+	+	(+)	+
St. Hubert (B)	(+)	(+)	(+)	+
Trier (D)	(+)	(+)	+	+
Virton (B)	(-)	+	+	+
Winterspelt (D)	(+)	(+)	(+)	+

Ces résultats indiquent clairement qu'il y a eu un changement au cours des 50 dernières années aussi bien sur les totaux pluviométriques que sur la fréquence des épisodes pluvieux.

Une analyse plus détaillée sur des variables décrivant les totaux pluviométriques à l'échelle du semestre hivernal, comme de l'épisode pluvieux, a révélé des tendances positives statistiquement significatives pour les quantités de pluie dues à un seul épisode pluvieux, ainsi que pour les apports pluviométriques dus aux circulations atmosphériques par secteur Ouest pendant le semestre hivernal (Tab. 3). Ces tendances ont été statistiquement significatives dans tous les postes d'observation.

3.1.3. Variabilité spatiale des modifications subies par les champs pluviométriques

Une analyse plus approfondie des conséquences de ces tendances, notamment sur les apports pluviométriques hivernaux induits par les flux atmosphériques de secteur Ouest, a révélé une hétérogénéité spatiale du phénomène à l'échelle du Grand-Duché de Luxembourg.

En effet, à l'échelle du pays les champs pluviométriques annuels sont caractérisés par un fort gradient Ouest-Est, qui reflète un gradient similaire au niveau de la topographie, marquée d'une part par les reliefs des côtes de Moselle à l'Ouest et les hauteurs des Ardennes dans le Nord du Grand-Duché. L'influence de la topographie

est même accrue lorsqu'on considère les apports pluviométriques par flux atmosphériques d'Ouest. Comme le montre le taux d'accroissement annuel des apports pluviométriques par flux d'Ouest au cours des 50 dernières années (Fig. 5), on observe un fort gradient Ouest-Est, avec les taux d'accroissement les plus élevés qui se situent dans la moitié occidentale du Grand-Duché de Luxembourg (taux d'accroissement > 5 mm/an), tandis que les taux les plus faibles sont relevés dans la partie orientale du pays (taux d'accroissement d'environ 1.5 mm/an).

Les changements observés au cours des 50 dernières années, aussi bien au niveau des totaux pluviométriques semestriels qu'au niveau de la durée et de l'intensité des épisodes pluvieux, montrent que les circulations atmosphériques zonales d'Ouest ont pris une place prédominante dans la configuration spatio-temporelle des champs pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg. A cela s'ajoute un forçage supplémentaire auquel ces changements sont soumis par l'intermédiaire de la topographie locale, qui a en effet un rôle amplificateur ou réducteur sur les changements observés, selon les cas d'ascendance forcée ou les effets d'abri.

Ces différentes recherches sur les changements dans la structure spatio-temporelle des apports pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg soulignent la nécessité d'étendre les investigations aux éventuelles conséquences sur le fonctionnement et le régime hydrologique des hydrosystèmes.

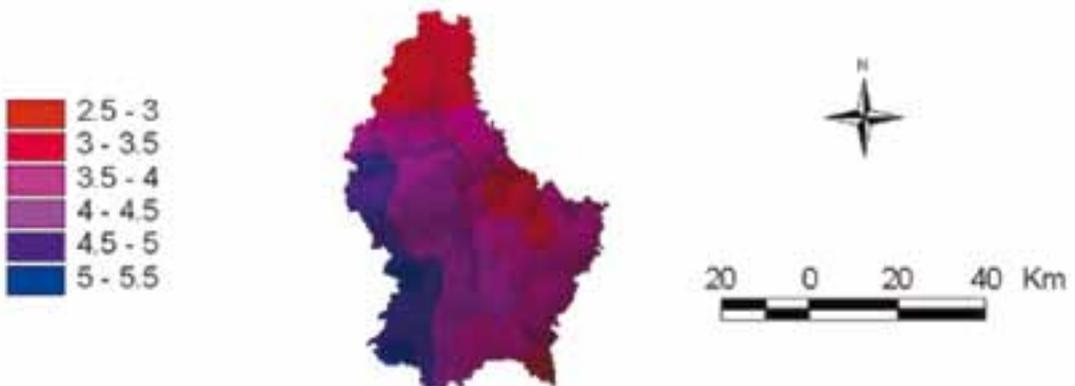


Fig. 5. Taux d'accroissement annuel (mm/an) de la pluie par circulations atmosphériques de secteur Ouest au cours du semestre hivernal au Grand-Duché de Luxembourg (1954-2000).

3.2. Analyse des séries limnimétriques

3.2.1. Variations observées dans les séries limnimétriques

L'étude des débits moyens mensuels de la Sûre à Steinheim de 1876 à 1917 confirme le régime pluvio-évaporal, avec une alternance prononcée entre hautes eaux hivernales et basses eaux estivales. Le débit moyen estival était de $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 8 \text{ m}^3/\text{s}$), tandis que le débit moyen hivernal atteignait près de $72 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\pm 25 \text{ m}^3/\text{s}$) (Fig. 6). Sur les 40 ans de la série d'observation, les débits moyens saisonniers de la Sûre ont été marqués par une forte variabilité (Fig. 7). Ainsi, les débits moyens hivernaux de la Sûre ne dépassaient que rarement les $80 \text{ m}^3/\text{s}$ entre 1889 et 1909, tandis qu'avant 1889 et après 1909, ce seuil a été régulièrement dépassé. Les débits moyens estivaux ont révélé une forte variabilité sur l'ensemble des 4 décennies.

Les débits journaliers maximums de la Sûre à Steinheim ont régulièrement atteint des valeurs entre 600 et $800 \text{ m}^3/\text{s}$, avec une crue de près de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ particulièrement forte qui s'est produite en 1880 (Fig. 8).

3.2.2. Recherche de tendances dans les séries hydrométriques au Grand-Duché de Luxembourg

Après application du test statistique du tau de Kendall, il s'est avéré qu'aussi bien les débits moyens journaliers et les débits journaliers maximums de la Sûre à Steinheim n'ont pas été

soumis à une quelconque tendance significative au cours de la période 1876-1917. Cette constatation vient donc corroborer les résultats obtenus sur l'analyse des séries pluviométriques historiques pour le Grand-Duché de Luxembourg, qui n'ont pas non plus laissé paraître de tendance significative entre le milieu du 19^{ème} siècle et le milieu du 20^{ème} siècle.

L'analyse de tendances sur des classes de percentiles de 5% sur les niveaux limnimétriques journaliers hivernaux observés après 1954 a été réalisée pour 9 stations d'observation sur le réseau hydrographique du Grand-Duché de Luxembourg (Tab. 4). La distribution des fréquences des niveaux limnimétriques journaliers a été utilisée pour déterminer trois catégories de ces mêmes niveaux: élevés (supérieurs au percentile 80%, c.-à-d. hauteurs limnimétriques égalées ou dépassées 20% du temps), modérés (compris entre les percentiles 20% et 80%) et faibles (niveaux journaliers inférieurs au percentile 20%). L'analyse du nombre moyen de jours avec des niveaux supérieurs au percentile 5% a révélé des résultats très contrastés, essentiellement en fonction de la localisation des stations d'observation (Pfister *et al.* 2004).

Dans le Gutland, où le grès de Luxembourg et les marnes dominent, aucune tendance significative n'a pu être déterminée pour des niveaux d'eau élevés. L'occurrence des niveaux modérés s'est révélée diminuer de manière significative dans certains bassins, alors que l'occurrence des niveaux d'eau faibles a diminué dans tous les bassins versants (Pfister *et al.* 2004).

Dans l'Ösling, les jours avec des niveaux d'eau élevés n'ont connu ni une augmentation, ni une diminution significative. Les niveaux modérés se sont révélés être divisés en deux tendances

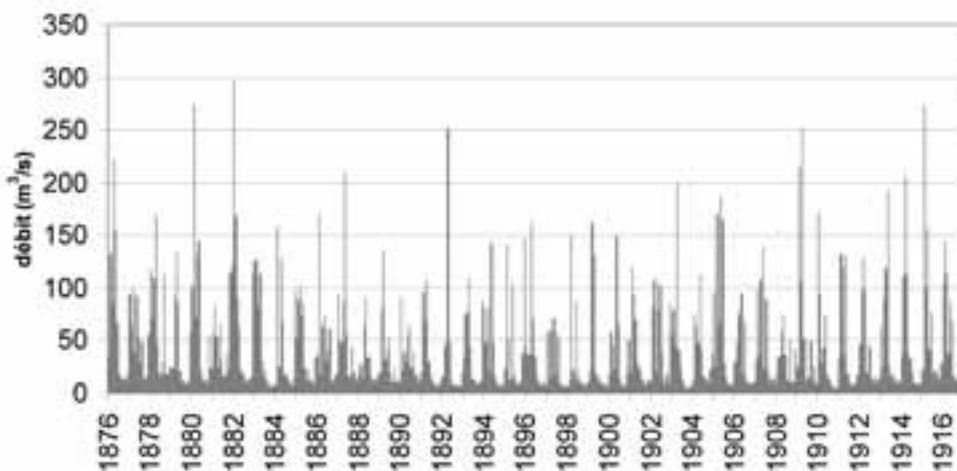


Fig. 6. Débits moyens mensuels de la Sûre à Steinheim entre 1876 et 1917.

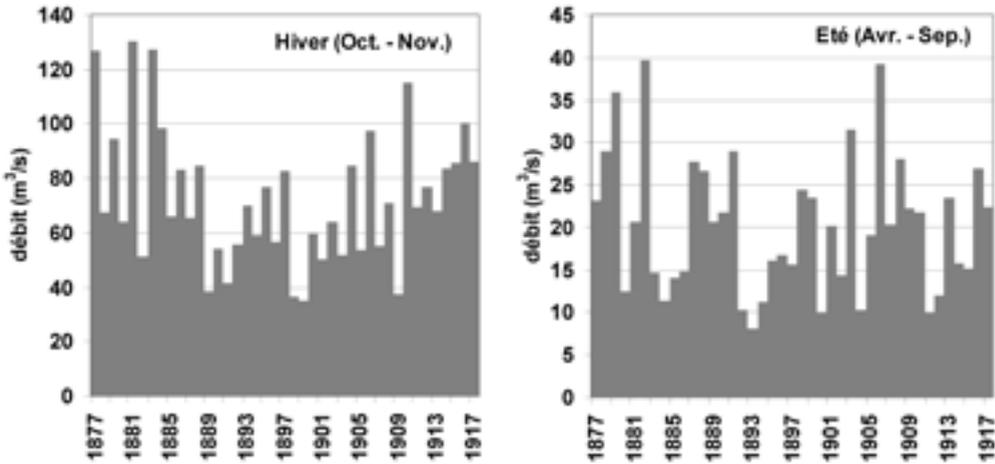


Fig. 7. Débits moyens hivernaux et estivaux de la Sûre à Steinheim entre 1876 et 1917.

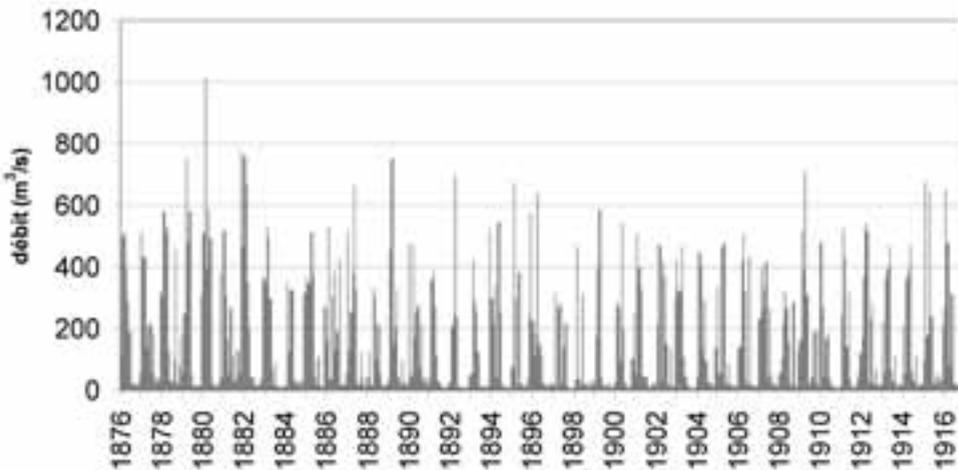


Fig. 8. Débits maximums journaliers de la Sûre à Steinheim entre 1876 et 1917.

bien distinctes, avec les niveaux d'eau les plus élevés montrant une tendance significative vers la diminution de leur occurrence et les niveaux d'eau les plus faibles une tendance significative vers une augmentation de leur occurrence. L'occurrence des jours avec des niveaux d'eau faibles s'est révélée diminuer de manière significative dans tout le Gutland (Pfister *et al.* 2004).

Au Grand-Duché de Luxembourg, il y a donc eu une tendance significative vers une diminution de l'occurrence de jours avec des niveaux d'eau faibles au cours des 50 dernières années. La diminution des occurrences de niveaux d'eau faibles en hiver indique qu'il y a eu un changement dans la relation pluie-débit au cours des dernières décennies. Des totaux pluviométriques hivernaux plus élevés

sont ainsi susceptibles d'avoir pu entraîner une augmentation généralisée de la contribution de l'écoulement de base à l'écoulement total.

Les bassins localisés dans l'Ösling ont montré des changements à travers toute la gamme de classes de percentiles, tandis que dans le Gutland seulement les niveaux d'eau les plus bas ont été moins fréquents. L'Ösling est caractérisé par des substrats schisteux plutôt imperméables et des sols peu profonds, ce qui induit une contribution naturelle de l'écoulement de base relativement modérée. Par conséquent, les bassins situés dans l'Ösling sont particulièrement sensibles à tout changement dans les précipitations. De larges parties du Gutland sont situées sur du grès et sont ainsi caractérisées par une contribution importante

de l'écoulement de base et une implication plus réduite des écoulements de surface. Leur réactivité à des changements de précipitations, particulièrement en termes d'épisodes très intenses et/ou longs, est beaucoup moins forte que dans l'Ösling. Des totaux pluviométriques hivernaux plus élevés sont néanmoins susceptibles d'augmenter considérablement les niveaux d'eau faibles dans le Gutland, notamment à cause d'une contribution plus importante de l'écoulement de base à l'écoulement total.

Suite à une augmentation de l'humidité du sol, des précipitations importantes sont susceptibles d'avoir un impact plus important sur les niveaux d'eau élevés. L'analyse des classes de percentiles n'a montré aucune tendance dans l'occurrence de niveaux d'eau élevés au cours des mois hivernaux au cours des 50 dernières années. Toutefois, cette étude n'a pas pris en compte les éventuelles tendances qui auraient pu affecter les niveaux journaliers maximums observés chaque hiver. Même si l'occurrence des événements hydrologiques extrêmes ne semble pas avoir changé, son importance a pu s'accroître, suite à une humidité du sol plus élevée d'une part et des précipitations extrêmes plus fréquentes d'autre part.

Les niveaux d'eau journaliers maximums en hiver (octobre à mars) ont ainsi été analysés pour 9 stations limnimétriques afin de détecter des tendances qui auraient pu avoir lieu au Grand-Duché de Luxembourg au cours des 50 dernières années. Le test statistique du tau de Kendall a révélé des tendances positives pour tous les postes d'observation (Tab. 4). Pour la plupart des stations, une tendance statistiquement significative vers l'augmentation des niveaux d'eau maximums

hivernaux au cours du semestre hivernal a pu être ainsi déterminée.

3.2.3. Variabilité spatiale des tendances observées sur les séries d'observations limnimétriques

Au Grand-Duché de Luxembourg, l'altitude moyenne des bassins versants est caractérisée d'une part par un gradient Ouest-Est négatif, traduisant l'influence des reliefs de côte et du massif Ardennais dans la partie occidentale, et d'autre part par un gradient Nord-Sud négatif, dû aux altitudes plus élevées dans les Ardennes.

Comme il a été démontré auparavant, les totaux pluviométriques annuels reflètent ces gradients altimétriques, avec les valeurs les plus fortes qui sont observées dans le Nord et dans l'Ouest du pays, et les valeurs les plus faibles qui sont observées dans le Sud et l'Est du Grand-Duché.

Le forçage topographique de la configuration spatiale de la pluie, notamment par circulations atmosphériques de secteur Ouest influence directement la variabilité spatiale des tendances observées sur les niveaux d'eau journaliers maximums au semestre hivernal (Fig. 9). Les tendances positives observées pour les niveaux d'eau journaliers maximums augmentent en effet avec les altitudes.

Les augmentations de la pluie totale, de la durée et de l'intensité des épisodes pluvieux, documentées par les tendances qui prédominent au Grand-Duché de Luxembourg, sont donc susceptibles

Tab. 4. Stations limnimétriques au Grand-Duché de Luxembourg avec les tendances observées (selon le tau de Kendall) pour les hauteurs d'eau journalières maximales hivernales (périodes cf Tab. 1) et altitudes moyennes des bassins versants (tendance positive statistiquement significative, +; tendance positive statistiquement non significative, (+); tendance négative statistiquement non significative, (-); tendance négative statistiquement significative, -). Source données: Administration des Services Techniques de l'Agriculture.

	Alzette <i>Esch/ Alzette</i>	Alzette <i>Steinsel</i>	Attert <i>Colmar- Berg</i>	Syre <i>Fels- mühle</i>	Aalbach <i>Stadt- bredimus</i>	Wiltz <i>Winseler</i>	Wiltz <i>Goebels- mühle</i>	Our <i>Gemünd</i>	Wark <i>Ettelbrück</i>
Années d'observation	50	34	47	44	37	37	49	35	48
Tendance	+	+	(+)	(+)	(+)	+	+	+	+
Altitude moyenne du bassin (en m)	355	325	343	290	228	436	446	438	388

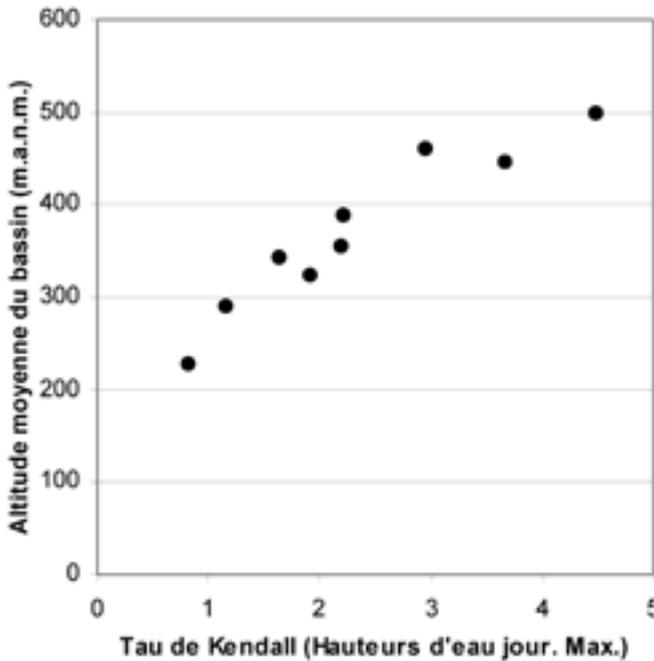


Fig. 9. Relation entre l'altitude moyenne (en mètres au-dessus du niveau de la mer) des bassins versants et le tau de Kendall pour les niveaux d'eau journaliers maximums (semestre hivernal).

d'avoir causé une tendance vers l'augmentation des niveaux d'eau journaliers maximums. Les changements ayant touché la pluviométrie ont ainsi pu augmenter l'humidité générale dans les bassins et entraîner des conditions propices à la production de crues importantes.

4. Conclusion

Alors qu'entre le milieu du 19^{ème} siècle et le milieu du 20^{ème} siècle les apports pluviométriques au Grand-Duché de Luxembourg n'avaient été marqués que par une variabilité somme toute naturelle, on note au cours des cinquante dernières années une tendance significative vers une augmentation des types de circulations atmosphériques de secteur Ouest et Sud-Ouest. Même si certaines caractéristiques de pluie semblent avoir subi des changements dans leur distribution à méso-échelle, il est évident qu'il existe une forte variabilité de la réponse hydrologique à ces changements. Les zones qui renforcent ces changements, tels que les obstacles orographiques qui forment une barrière contre les masses d'air qui progressent, sont également à l'origine d'une amplification de la réponse des hydrosystèmes.

L'analyse de séries temporelles d'observations hydro-climatologiques sur cinq décennies sur le Grand-Duché de Luxembourg a montré que le signal du changement climatique observé a eu des conséquences très contrastées sur l'écoulement maximal journalier hivernal. Ceci est essentiellement dû à l'orientation des circulations atmosphériques dominantes de secteur Ouest, qui créent des durées, intensités et totaux des épisodes pluvieux plus importants durant les mois d'hiver. De plus, les tendances positives dans la durée et l'intensité des épisodes pluvieux peuvent avoir des conséquences importantes sur la genèse de l'écoulement, selon les caractéristiques physiographiques de la zone étudiée. Une augmentation du nombre de journées avec de la pluie et/ou de la durée des épisodes pluvieux peut entraîner une humidité générale plus importante dans les bassins versants, créant ainsi des conditions propices à la formation de coefficients d'écoulement de crue plus importants.

Dans la partie septentrionale du Grand-Duché de Luxembourg, l'écoulement de surface domine sur les substrats schisteux peu perméables, tandis que dans la partie méridionale, l'infiltration de la pluie est un processus important sur les substrats gréseux, causant des coefficients d'écoulement plus faibles (Pfister *et al.* 2002).

L'analyse spatio-temporelle de la relation pluie-débit au Grand-Duché de Luxembourg au cours des dernières décennies a ainsi permis de mettre en évidence l'existence d'une modification considérable de la structure spatio-temporelle des apports pluviométriques d'une part et une réaction des hydrosystèmes toute aussi contrastée dans sa répartition dans l'espace d'autre part. Ces changements sont essentiellement dus à une modification majeure dans la distribution des circulations atmosphériques au cours du semestre hivernal.

Des efforts considérables seront à fournir dans un futur proche pour déterminer aussi bien le forçage qu'entraînent ces changements au niveau des circulations atmosphériques, tout comme l'évolution future des variables hydro-climatologiques dans le contexte d'un éventuel changement climatique, combiné à une modification massive de l'occupation du sol dans les décennies à venir.

Remerciements

Ce travail a été partiellement réalisé dans le cadre du projet de recherche CLIMAT, mené par le Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann et financé par le Fonds National de la Recherche du Grand-Duché de Luxembourg. Les auteurs tiennent à remercier tout particulièrement Monsieur R. Kipgen de l'Administration de la Gestion de l'Eau, Madame D. Buchel, Monsieur C. Wiltgen et Monsieur R. Schoder de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture, ainsi que MM. G. Müller et G. Toussin des Ponts-et-Chaussées pour la mise à disposition de la plupart des données hydro-climatologiques utilisées dans cette étude. Enfin, les auteurs tiennent également à remercier le 'Deutscher Wetterdienst', ainsi que l'Institut Royal de Météorologie de Belgique pour avoir fourni les données pluviométriques de plusieurs stations d'observation en Allemagne et en Belgique.

Bibliographie

- Brunetti M., Colacino M., Maugeri M. & Nanni T. 2001. - Trends in the daily intensity of precipitation in Italy from 1951 to 1996. *International Journal of Climatology* 21: 299-316.
- Bultot F., Dupriez G. L. & Seyvert J. 1971. - Contrôle des cotes hydrométriques journalières - Test du rapport des cotes réduites. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology* XVI: 73-82.
- Burn D. H. & Elnur M. A. 2002. - Detection of hydrologic trends and variability. *Journal of Hydrology* 255: 107-122.
- Capéraà P. & Van Cutrem B. 1988. - Méthodes et Modèles en Statistique Non-Paramétrique – Exposé Fondamental. Presses de l'Université de Laval, Bordas, 358 p.
- Cosandey C. & Robinson M. 2000. - Hydrologie Continentale. Armand Colin, Paris, 360 p.
- De Luis M., Raventos J., Gonzalez-Hidalgo J. C., Sanchez J. R. & Cortina J. 2000. - Spatial analysis of rainfall trends in the region of Valencia (East Spain). *International Journal of Climatology* 20: 1451-1469.
- De Wit M. (ed.), Warmerdam P., Torfs P., Uijlenhoet R., Roulin E., Cheymol A., van Deursen W., van Walsum P., Ververs M., Kwadijk J. & Buiteveld H. 2001. - Effect of Climate Change on the Hydrology of the River Meuse. Wageningen University Environmental Sciences, Sub-Department Water Resources, Rapport 104, 134 p.
- Groisman P. Y., Knight R. W. & Karl T. R. 2001. - Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the twentieth century. *Bulletin of the American Meteorological Society* 82: 219-246.
- Hess P. & Brezowski H. 1977. - Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 15: 1-14.
- Hisdal H., Stahl K., Tallaksen L. M. & Demuth S. 2001. - Have streamflow droughts in Europe become more severe or frequent? *International Journal of Climatology* 21: 317-333.
- Hurrell J. W. & van Loon H. 1997. - Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change* 36: 301-326.
- Karl T. R. & Knight R. W. 1998. - Secular trends of precipitation – Amount, frequency, and intensity in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 231-241.

- Kondratyev K. & Cracknell A. 1998. - Observing Global Climate Change. Taylor and Francis, London, 562 p.
- Lahr E. 1950. - Un siècle d'observations météorologiques appliquées au climat du Grand-Duché du Luxembourg. Administration des Services Agricoles, Luxembourg, Imprimerie Bourg-Bourger, 287 p.
- Lebourgeois F., Granier A. & Bréda N. 2001. - Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers. Annales des Sciences Forestières 58: 733-754.
- Lins H. F. & Michaels P. J. 1996. - Observed climate variability and change, in Nicholls N., Gruza G. V., Jouzel J., Karl T. R., Ogallo L. A. & Parker D. E. (eds), Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of the Workgroup I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge-New York-Melbourne, 572 p.
- Loup J. 1974. - Les Eaux Terrestres. Masson, Paris, 175 p.
- Mansell M. G. 1997. - The effect of climate change on rainfall trends and flooding risk in the west of Scotland. Nordic Hydrology 28: 37-50.
- McCabe Jr. G. J. 1996. - Effects of winter atmospheric circulation on temporal and spatial variability in annual streamflow in the Western United States. Hydrological Sciences Journal 41: 873-887.
- Osborn T. J., Hulme M., Jones P. D. & Basnett T. A. 2000. - Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation. International Journal of Climatology 20: 347-364.
- Pfister L. 2000. - Analyse spatio-temporelle du fonctionnement hydro-climatologique du bassin versant de l'Alzette (Grand-duché de Luxembourg) - Détection des facteurs climatiques, anthropiques et physiogéographiques générateurs de crues et d'inondations. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 240 p.
- Pfister L., Drogue G., El Idrissi A., Iffly J.-F., Poirier C. & Hoffmann L. 2004. - Spatial variability of trends in the rainfall-runoff relationship: A meso-scale study in the Mosel basin. Climatic Change 66: 67-87.
- Pfister L. & Hoffmann L. 2002. - Evidence of a climate-induced change in maximum streamflow of the Alzette river (Grand-Duchy of Luxembourg): 89-96, in Krahe P. & Herpertz D. (eds), Book of abstracts - Workshop 'Ermittlung hydrometeorologischer Referenzbedingungen für die Einschätzung der Hochwassergefährdung in grossen Flusseinzugsgebieten', 6 - 7 März 2001, Koblenz (Allemagne).
- Pfister L., Humbert J. & Hoffmann L. 2000. - Recent trends in rainfall-runoff characteristics in the Alzette river basin, Luxembourg. Climatic Change 45: 323-337.
- Pfister L., Humbert J., Iffly J.-F. & Hoffmann L. 2002. - Use of regionalised stormflow coefficients in view of hydro-climatological hazard mapping. Hydrological Sciences Journal 47: 479-491.
- Robinson M., Boardman J., Evans R., Heppell K., Packman J. & Leeks G. 2000. - Land use change: 30-54, in Acreman M. (ed.), The Hydrology of the UK - A Study of Change. Routledge, London.

Trajectoire climatique et réponse hydrologique à l'horizon 2050: l'exemple de deux cours d'eau luxembourgeois

Gilles Drogue

CREBS-Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann,
162a, Avenue de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Lucien Hoffmann

CREBS-Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann,
162a, Avenue de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Patrick Matgen

CREBS-Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann,
162a, Avenue de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Laurent Pfister

CREBS-Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies,
Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann,
162a, Avenue de la Faïencerie,
L-1511 Luxembourg, Grand-Duché de Luxembourg

Thierry Leviandier

Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie, UMR-MA 102 ENGEES-ULP,
1, quai Koch,
F-67070 Strasbourg cedex, France

Auteur correspondant

e-mail: drogue@crp.gl.lu
tél: (352) 47 02 61 404
fax: (352) 47 02 61 449

Résumé

Dans le contexte d'un réchauffement climatique probablement chronique au cours des prochaines décennies, il est impératif d'émettre des scénarios aptes à quantifier les répercussions des variations futures du climat sur nos hydrosystèmes. Cet article propose deux trajectoires possibles du climat luxembourgeois à l'horizon 2050, fondées sur deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) et marquées à des degrés divers par une océanisation hivernale (hivers doux et humides) et

une dégradation xéothermique estivale (étés chauds et secs). La réponse hydrologique aux conditions climatiques futures, de deux affluents de l'Alzette jaugés depuis plusieurs années, a été simulée à l'aide d'un modèle hydrologique de type conceptuel. Les résultats indiquent i) une stationnarité du débit moyen annuel, ii) une durée de retour plus courte pour les quantiles de crue, iii) des hautes eaux plus prononcées en hiver avec un décalage du maximum au mois de mars, iv) des basses eaux singulièrement plus creusées en été.

Abstract

In the context of a very likely global warming in the future decades, elaborating scenarios for quantifying the impact of climate variations on hydro-systems is of major importance. Based on two IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) emission scenarios, this paper suggests two climate scenarios for the Grand-Duchy of Luxembourg in the 2050's, both characterized, more or less, by more humid and warmer conditions in winter, as well as drier and warmer conditions in

summer. The hydrological response of two gauged Alzette river tributaries to these future climate forcings has been simulated with a conceptual rainfall-runoff model. Outcomes of the modelling impact assessment indicate: i) no evolution for the annual mean discharge, ii) a higher winter flood hazard magnitude for a given return period, iii) more pronounced high water levels with a shift towards a maximum in March, iv) severe low flows in summer.

Zusammenfassung

Im Zusammenhang einer möglichen Klimaerwärmung im Laufe der nächsten Jahrzehnte ist es unabdingbar Szenarien aufzustellen, welche die Einflüsse der künftigen Klimaschwankungen auf Gewässer abschätzen. Diese Studie schlägt zwei mögliche Klimaszenarien für das Jahr 2050 vor, gemäss zweier Treibhausgasausstosszenarien des IPCC, die sich, mehr oder weniger, durch feuchtere und mildere Winter und wärmere und trockenere Sommer auszeichnen. Für zwei Nebenflüsse der Alzette wurde der Impact einer

möglichen klimatischen Veränderung mit Hilfe eines konzeptuellen hydrologischen Modells simuliert. Die Ergebnisse lassen auf i) eine Stationarität des jährlichen durchschnittlichen Abflusses, ii) eine kürzere Wiederkehrzeit bestimmter aktueller Abflussquantile, iii) höhere Spitzenabflüsse während der Wintermonate und eine Verschiebung des jährlichen Spitzenabflusses auf den Monat März und iv) eine Verringerung der Niedrigabflüsse während der Sommermonate schliessen.

1. Introduction

L'une des évolutions les plus remarquables du climat luxembourgeois et plus largement de celui de l'Europe du Nord-Ouest au cours des cinquante dernières années réside, depuis la fin des années 1970, dans un changement de régime atmosphérique hivernal caractéristique d'une phase positive de l'oscillation nord-atlantique (NAO⁺ en anglais). Ce régime atmosphérique préférentiel, dû en partie à l'action de l'océan Atlantique tropical nord sur l'atmosphère des moyennes latitudes et à l'accroissement d'origine anthropique de la concentration des gaz à effet de serre (Cassou 2004), s'est traduit par une augmentation en fréquence et en persistance du flux atmosphérique perturbé d'ouest en hiver et par la récurrence d'hivers doux et humides. Le changement de régime pluviométrique hivernal ainsi généré, présente toutefois une anisotropie spatiale étroitement liée à la cinématique des masses d'air et en particulier à l'effet de la topographie sur les masses d'air pluviogènes dirigées par un flux zonal perturbé d'ouest (Pfister *et al.*, ce volume). Le changement de régime pluviométrique hivernal observé au cours des deux dernières décennies a laissé une empreinte significative sur le signal de débit des affluents luxembourgeois de la Sûre et de la Moselle, en particulier sur les débits maximums annuels (Pfister *et al.* 2004). Dès lors, il est légitime, avec l'acuité des questions que soulève la gestion récurrente des inondations depuis quelques années sur les fleuves et rivières du nord-ouest du continent européen et en particulier du Grand-Duché de Luxembourg, de s'interroger sur l'évolution prévi-

sible à moyen terme du régime hydrologique des cours d'eau autant en hautes eaux qu'en basses eaux. De nombreux programmes et publications scientifiques ont permis de proposer un large spectre de scénarios climatiques et hydrologiques possibles pour les prochaines décennies (GIEC 2001). Un faisceau de présomptions, notamment fondé sur la convergence qualitative des modèles numériques de circulation générale, tend à indiquer que les hydrosystèmes continentaux européens seront sujets à court terme aux effets d'un réchauffement climatique planétaire significatif, induit par un effet de serre additionnel anthropogénique (e.g. Planton 2001). L'eau étant à la fois ressource, vecteur et milieu, les variations climatiques annoncées pour les décennies futures sont susceptibles d'affecter de nombreuses composantes du cycle de l'eau et donc du milieu éco-géographique. Ainsi par exemple, en Europe occidentale, les massifs forestiers pourraient connaître une modification de leur distribution et de leur productivité sous l'effet d'un changement de régime thermique ou pluviométrique. La prolifération de certains agents pathogènes serait facilitée par l'occurrence d'hivers plus doux (Beniston & Tol 1998). Toujours selon ces auteurs, les écosystèmes d'eau douce, notamment lacustres, pourraient aussi être affectés par un risque d'acidification accru dans des bassins versants à faible capacité de neutralisation sous l'effet d'apports plus massifs de polluants acides véhiculés par des pluies plus abondantes. Les conséquences possibles, à défaut d'être garanties, des projections climatiques concernant l'Europe occidentale, doivent donc être appréhendées pour mieux en anticiper les effets, favoriser une gestion intégrée et durable des ressources en eau au niveau des

bassins versants et objectiver les politiques d'aménagement du territoire en zone inondable, où se mêlent souvent des intérêts contradictoires. C'est dans cette perspective que cet article apporte une contribution à l'étude de la réponse hydrologique de deux cours d'eau affluents de l'Alzette, situés au Grand-Duché de Luxembourg, à des scénarios climatiques sélectionnés parmi les futurs possibles à l'horizon 2050. Cette contribution s'inscrit parmi un panel d'études antérieures ou en cours à propos de l'évolution du climat dans la Grande Région au cours du 21^{ème} siècle et des conséquences hydrologiques (Drogue *et al.* 2004a; Drogue *et al.* 2004b), la réponse à la question de l'impact hydrologique des variations climatiques futures étant largement incertaine et supposant donc d'adopter différents angles d'attaque. Après avoir dressé un bref état de l'art sur les méthodes de conception des scénarios climatiques, le volet prospectif de nos investigations sera fondé sur une utilisation croisée des sorties d'un Modèle numérique de Circulation Générale Atmosphérique (MCG), d'un générateur stochastique de climat et d'un modèle hydrologique pluie-débit, destiné à simuler l'évolution des grandeurs hydrologiques (quantiles de crue, débit moyen mensuel, etc.) sous de nouvelles conditions climatiques. L'horizon 2050 retenu est à la fois utile aux décideurs en termes de planification et d'aménagement du territoire et il s'inscrit dans une logique de développement durable, puisqu'il concerne l'héritage possible que nous léguerons aux générations futures. Il convient toutefois de noter qu'à cet horizon temporel rapproché, les modèles numériques de circulation générale parviennent difficilement à isoler le signal climatique imputable au facteur anthropique seul, celui-ci étant encore largement « noyé » dans la variabilité intrinsèque du système climatique (Arnell *et al.* 1997). Les conclusions auxquelles nous aboutirons ne permettront donc pas d'imputer les modifications de régime hydrologique induites par les scénarios climatiques aux activités humaines seules. Les scénarios climatiques envisagés intègrent le forçage climatique transitoire lié aux émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et de particules aérosols (suies, etc.) prévus par les modèles économiques et publiés dans le troisième rapport d'avancement du GIEC (2001). L'analyse des conséquences de l'évolution du climat régional sur les deux cours d'eau sélectionnés sera effectuée dans une optique « toute chose égale par ailleurs », c'est-à-dire en considérant l'occupation du sol comme un facteur stationnaire, l'instationnarité temporelle concernant exclusivement les précipitations et la température de l'air. La mise en œuvre d'une méthode d'analyse des changements climatiques et de leur répercussion sur l'hydrologie de surface comporte quatre pré-requis fondamentaux qui serviront de fil conducteur à notre analyse bibliographique et à notre cadre méthodologique:

- Des données hydro-climatologiques historiques pour le bassin versant étudié.
- Les scénarios globaux et locaux définissant les conditions climatiques futures.
- Un modèle pluie-débit et un générateur de climat adaptés à la zone test.
- Des variables hydrologiques quantifiant l'impact des variations climatiques sur les débits.

1.1. Les données historiques

Les études d'impact hydrologiques se basent en général sur la comparaison de normales climatiques standards, caractérisant le climat présent et le climat futur. Ainsi, pour la situation climatique actuelle, qualifiée de période de contrôle par les modélisateurs du climat, c'est la normale standard 1961-1990 définie par l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) qui fait loi. Le vocable de « normale climatique » désigne une période au moins égale à 30 ans, sur laquelle une moyenne arithmétique d'un paramètre atmosphérique est établie, conférant une valeur de référence à ce paramètre (Beltrando & Chémery 1995). La normale 1961-1990 offre l'avantage d'être représentative de la variabilité climatique récente du climat tempéré semi-océanique que nous expérimentons, puisqu'elle inclut une période sèche et une période humide, et d'être bien documentée à l'échelle mondiale par un réseau de mesure météorologique dense et bien réparti sur les différents continents. Par souci d'intercomparabilité avec d'autres travaux, les séries de mesure climatologiques exploitées dans le cadre de ce travail se rapporteront sauf mention contraire à la période 1961-1990.

1.2. Etablissement des scénarios climatiques futurs: outils et terminologie

Le problème de la conception de scénarios climatiques futurs peut être appréhendé de multiples façons (GIEC 2001). Au demeurant, seuls les modèles numériques de circulation générale ou les modèles climatiques de méso-échelle opérant à une échelle spatiale plus fine sont capables de prendre explicitement en considération l'impact potentiel des GES sur le système climatique.

le plus complet, le plus utilisé et le plus accepté en matière de variabilité et de changements climatiques (Bourque 1999). L'atmosphère (et parfois les autres sous-systèmes) et l'océan sont subdivisés en milliers de colonnes ou verticales couvrant la totalité de la planète. Dans le cas sus-cité, l'atmosphère est découpée en 19 niveaux et l'océan en compte 20. Le modèle climatique tente de résoudre la physique de l'atmosphère (au sein d'une même verticale) et sa dynamique qui prend en compte les échanges latéraux entre verticales. La résolution verticale d'un modèle fait référence au nombre de couches modélisées à l'intérieur des colonnes, alors que sa résolution horizontale fait référence à la quantité, et donc à la dimension des colonnes qui recouvrent la planète. Cette structure permet de décrire le système climatique dans ses trois dimensions spatiales. Les valeurs calculées par le modèle pour un point de la grille représentent en fait une valeur moyenne décrivant l'état de l'atmosphère pour une surface horizontale appelée maille ou pavé. La superficie de la maille est définie par la résolution horizontale. Pour un modèle comme HadCM2, elle est par exemple de 2.5° de latitude par 3.75° de longitude, ce qui représente approximativement à nos latitudes une maille horizontale de 295 km x 278 km.

Les MCG présentent des faiblesses importantes qui rendent l'exploitation de leur simulation à des fins hydrologiques parfois difficile. La limitation principale réside dans leur résolution spatiale souvent trop lâche pour envisager des investigations sur des bassins versants de méso-échelle (< 1000 km²). Les processus atmosphériques qui conditionnent la distribution spatio-temporelle des précipitations et plus largement le climat régional sont de ce fait assez mal représentés par ce type de modèle climatique.

La pluie est générée dans des situations de l'atmosphère où les mécanismes de grande échelle (advection), de moyenne et de petite échelle (convection) interviennent. A l'échelle des mailles de MCG (200 à 300 km de côté), la topographie locale n'est pas résolue. Ainsi, il arrive fréquemment que les incertitudes des MCG dans la paramétrisation des précipitations se traduisent par une surestimation de leur fréquence et une sous-estimation de leur intensité (Fig. 2). Ce sont par conséquent les taux de variation des paramètres climatiques entre deux normales climatiques, bien plus que leurs valeurs brutes journalières ou mensuelles qui doivent être exploités lors d'étude d'impact à finalité hydrologique (Kilsby *et al.* 1997; Prudhomme *et al.* 2002).

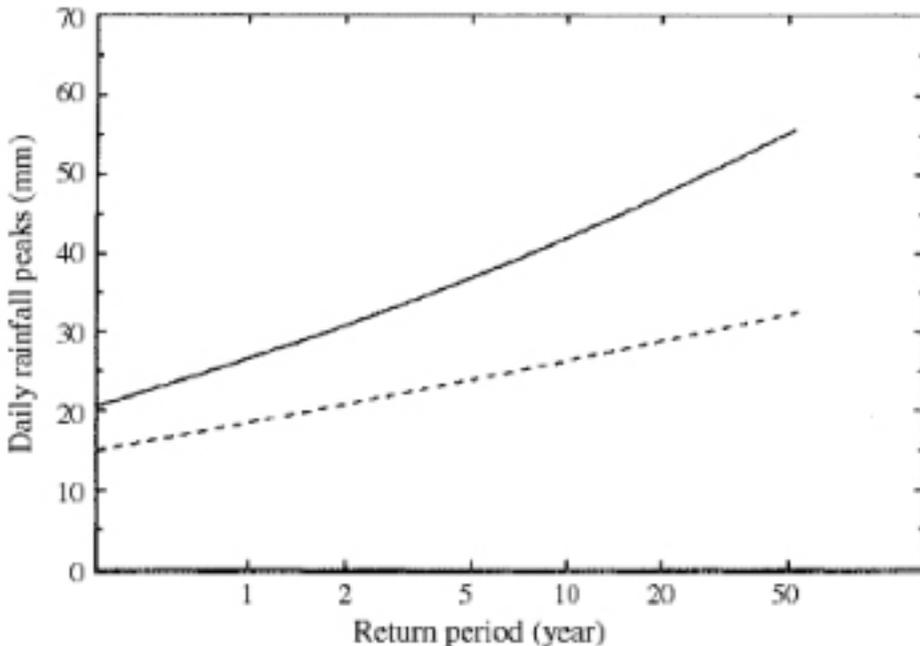


Fig. 2. Comparaison entre les quantiles journaliers de précipitations observés (1961-1990 - trait continu) et simulés par le MCG HadCM2 en phase de contrôle (trait discontinu) pour la même maille. Tiré de « Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? » Prudhomme C., Reynard N., Crooks S., 2002, Hydrological Processes 16: 1137-1150, Copyright John Wiley & Sons Limited. Reproduit avec permission.

1.2.2. Incertitudes sur les projections climatiques

1.2.2.1. Variabilité des constituants de l'atmosphère induite par les scénarios socio-économiques

Deux générations de MCG se sont succédées depuis les années 1980: les MCG offrant des solutions climatiques à l'équilibre, c'est-à-dire correspondant à une composition de l'atmosphère stationnaire (un doublement du CO₂ par exemple) et les MCG transitoires, en vogue actuellement et offrant des solutions climatiques pour une composition atmosphérique en évolution graduelle (de la situation actuelle vers un doublement du CO₂ dans l'atmosphère par exemple). Outre la diversité des structures et des modes d'utilisation des MCG, il convient de prendre en compte la variété des scénarios d'émissions atmosphériques, correspondant à différents modèles économiques, qui déterminent également l'ampleur des variations climatiques projetées aux différentes échéances. Ces scénarios d'émission définis par le GIEC ont été regroupés sous l'acronyme SRES (Special Report on Emissions Scenarios) dont les projections anticipent les développements futurs de l'agriculture et de l'industrie qui représentent une source majeure de GES en l'absence de politique de régulation. Outre les GES, il convient de prendre en considération les aérosols qui constituent des particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère, qui ont un rôle radiatif important, en dispersant le rayonnement solaire direct et en absorbant une partie du rayonnement direct et infrarouge dans l'atmosphère. Certains aérosols, notamment sulfatés, forment des noyaux de condensation par leurs propriétés hydrophiles, favorisent la concentration des gouttes d'eau et des cristaux de glace par nucléation dans les nuages, et ce faisant, diminuent l'efficacité des processus de formation des nuages. L'extinction radiative générée par les aérosols atmosphériques a pour effet d'apporter une contribution significativement négative au forçage radiatif (Petit 2003).

Parmi les nombreux types d'aérosols en suspension, les aérosols dominants proviennent de l'érosion éolienne des sols, des embruns, de l'industrie, et des éruptions volcaniques. Les principaux précurseurs des aérosols atmosphériques sont les oxydes nitreux (NO_x), l'hydrogène sulfaté (H₂S), et l'azote hydrogéné (NH₃) d'origine anthropogénique (industrie, agriculture, combustion du fuel fossile) ou biogénique (océans, volcans, animaux domestiques, etc.). La quantification de l'impact des changements climatiques dû à l'évolution des aérosols demeure entachée d'une incertitude importante, compte tenu de la difficulté d'évaluer leur influence sur le système climatique actuel. A titre d'exemple, la Fig. 3 b indique l'évolution de la courbe enveloppe de la température planétaire

simulée à différents horizons au cours du 21^{ème} siècle par les modèles climatiques de circulation générale, en fonction des courbes d'évolution de l'émission et de la concentration en CO₂ et SO₂ atmosphériques relatives aux différents scénarios socio-économiques du SRES (Fig. 3 a). Par exemple, le scénario socio-économique indexé A1 et ses variantes (Fig. 3 a), correspondent à un monde en rapide croissance économique, marqué par une faible croissance démographique et une percée rapide des nouvelles technologies. Une définition qualitative et quantitative complète des différents scénarios d'émissions peut être trouvée dans le rapport scientifique du GIEC (2001). Ainsi, pour un même modèle d'évolution socio-économique, certains scénarios climatiques prennent en compte uniquement le forçage positif (piégeage accru du rayonnement) provoqué par une augmentation des GES alors que d'autres intègrent le forçage négatif des aérosols sulfatés qui tendraient à atténuer le réchauffement climatique. Les différences dans le traitement des concentrations et des émissions atmosphériques effectués par les modèles climatiques globaux, se répercutent donc sur l'évolution de la température (Fig. 3 b) ou des précipitations.

1.2.2.2. Variabilité induite par le couplage océan-atmosphère

Les modalités du couplage océan-atmosphère sont également susceptibles d'influencer les variations régionales futures de la température et des précipitations. L'étude de l'évolution future de la NAO sur la base d'une vingtaine de MCG, a permis à Palmer & Raisanen (2002) de montrer que le risque que l'Europe du Nord-Ouest expérimente des précipitations extrêmes doublerait sous l'effet d'un doublement de la teneur en CO₂. A l'opposé, compte tenu de la fonte actuelle de la calotte glaciaire arctique, on pourrait s'attendre à une extinction de la circulation thermo-haline (CTH) similaire à ce qui s'est produit au cours des derniers millénaires et donc à un refroidissement de plusieurs degrés plutôt qu'à un réchauffement climatique au cours des prochaines décennies. En réalité, le Dr. Pachauri, consultant du GIEC, interviewé sur <http://www.changingclimate.org> indique que l'inlandsis actuel n'est pas de taille suffisante pour libérer une quantité d'eau importante modifiant durablement le régime de la CTH. Il s'agirait donc d'un scénario de faible probabilité mais à impact important. Plus probablement, les MCG simulent une augmentation des précipitations aux hautes latitudes sous l'effet d'un accroissement de la teneur en gaz carbonique et par conséquent, un affaiblissement de la CTH. Des changements de température plus subtiles pourraient alors se produire en Europe, changeant selon la région considérée. Par ailleurs, Rahmstorf (1995), testant la sensibilité de la CTH au changement du cycle hydrologique, a montré, à l'aide d'un modèle de couplage océan-atmosphère, qu'un changement modéré du flux

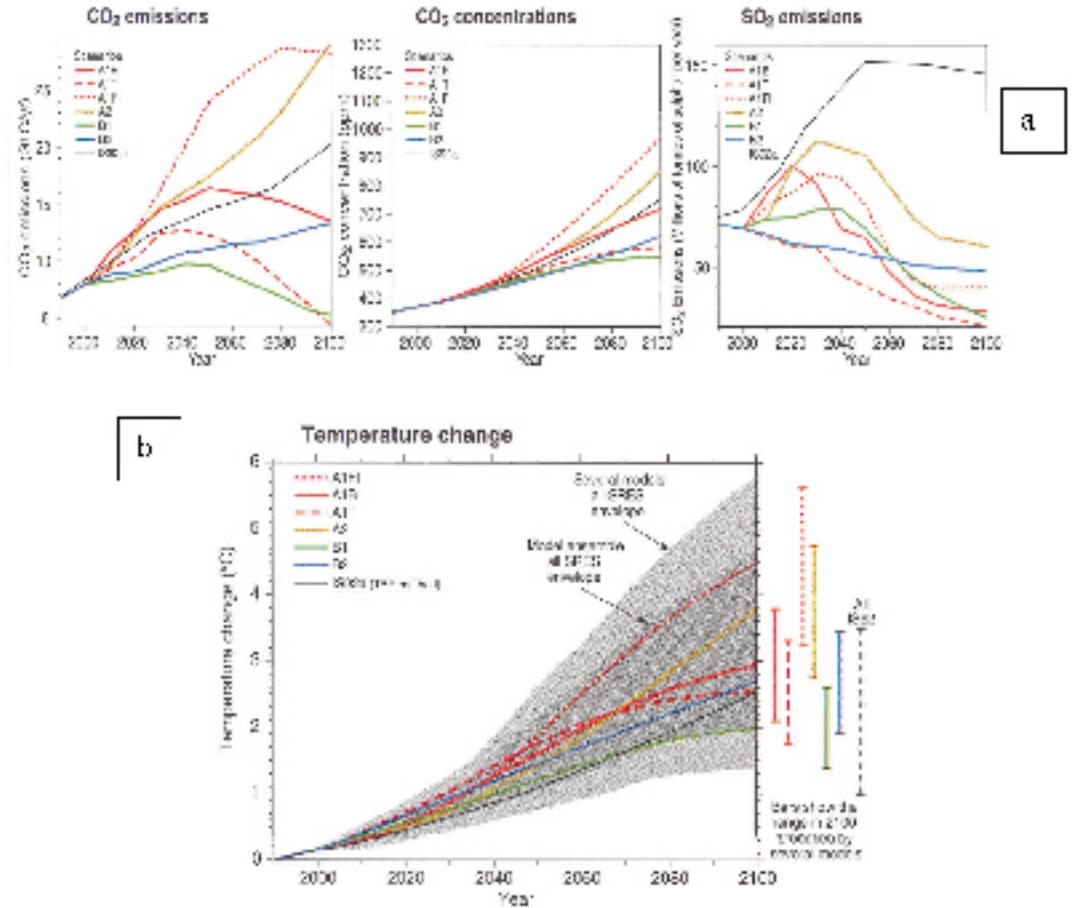


Fig. 3. Réponse de la température planétaire à l'évolution du CO₂ et du SO₂ atmosphériques au cours du 21^{ème} siècle (a), simulée par un ensemble de MCG (b) (GIEC 2001).

d'eau douce entrant dans la circulation océanique aux hautes latitudes, pourrait modifier la situation d'équilibre actuel, provoquant des changements substantiels du climat des régions bordant l'Atlantique Nord, modifiant la température de quelques degrés sous une échéance de quelques années seulement. Au total, les projections climatiques décrivant le climat du 21^{ème} siècle fournissent un spectre très large d'évolutions possibles reposant sur des hypothèses multiples, et témoignant de la complexité du système climatique. Il ressort de ces projections, que la réponse du système climatique telle qu'elle est simulée par les modèles climatiques s'inscrit dans une fourchette de variation importante qui doit nécessairement être prise en compte pour tester des hypothèses basses, moyennes ou hautes et ainsi, associer une fourchette d'incertitude aux simulations hydrologiques.

1.3. Le problème du transfert d'échelle

1.3.1. Panorama des méthodes existantes

On l'aura compris, la prise en compte des processus climatiques de méso-échelle, particulièrement dans l'élaboration de scénarios pluviométriques, pour la production de hyéto-graphes correspondant aux conditions climatiques futures, est plus réaliste que l'utilisation directe des sorties de MCG, inopérante à l'échelle méso β (20-200 km) selon la classification de Orlanski (1975). Plusieurs méthodes dites de désagrégation d'échelle (downscaling en anglais) ont été élaborées pour traiter ce problème de transfert d'échelle dans le contexte du changement clima-

rique (Fig. 4). Une synthèse de ces méthodes est fournie dans le troisième rapport d'avancement du GIEC (GIEC 2001). Pour mettre en relation les sorties de modèles climatiques d'échelle grossière avec une échelle plus compatible avec les études d'impact sur l'hydrologie de surface, différentes méthodes de désagrégation spatio-temporelle ont été développées dans la littérature. On peut les ventiler en trois grandes catégories (Kilsby *et al.* 1997):

- Les méthodes basées sur des relations statistiques entre la circulation atmosphérique générale et les variables locales du climat (e.g. Wilby *et al.* 1998). Il s'agit par exemple,

d'exploiter la corrélation entre la probabilité d'occurrence des précipitations et leur intensité d'une part, et des variables ou indices atmosphériques représentant des facteurs explicatifs potentiels de leur génération atmosphérique.

Les prédicteurs les plus fréquents sont la pression atmosphérique moyenne rapportée au niveau de la mer, la force de la composante zonale du flux synoptique de surface ou d'altitude (gradient de pression), la force de la composante méridienne du flux synoptique de surface ou d'altitude (gradient de pression), la force du flux résultant, la vorticité (indicateur

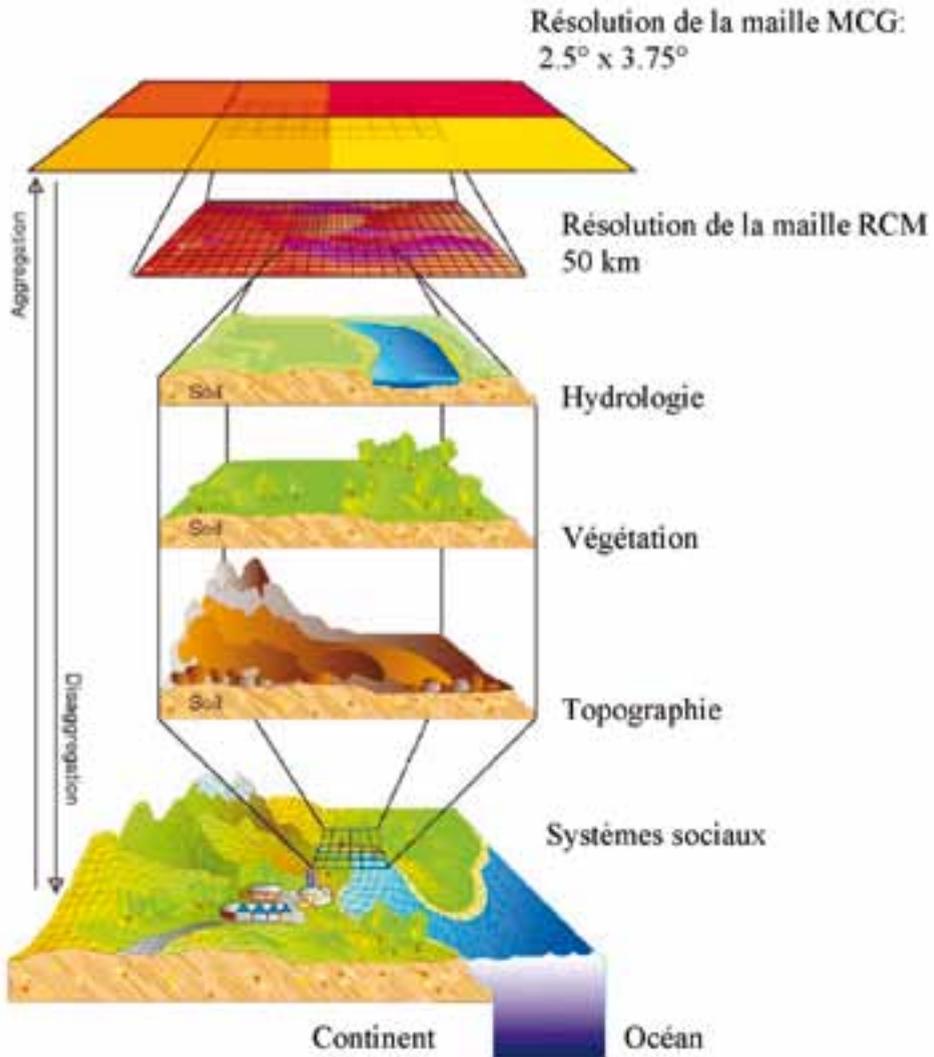


Fig. 4. Transfert d'échelle de la maille d'un MCG vers l'échelle du bassin versant (d'après Viner D., <http://www.cru.uea.ac.uk/link>). RCM: Regional Climate Model.

du sens de rotation de l'air dans un centre d'action). Ces trois indices peuvent être déterminés sur la base du champ de pression atmosphérique de surface (MSLP) ou aux niveaux des géopotentiels 700 hPa, 500 hPa, etc. On peut également ranger dans cette catégorie de méthode de désagrégation d'échelle par voie statistique, le couplage d'un générateur stochastique de climat capable de produire l'occurrence d'événements particuliers et extrêmes (longues périodes pluvieuses, longues périodes sèches) qui intéressent l'hydrologie au premier chef (Semenov & Barrow 1997) aux extrants désagrégés de MCG. Les paramètres statistiques (moyenne, écart-type, séquences douces ou froides, etc.) associés aux chroniques de précipitations, de température ou de rayonnement global, sont alors « perturbés » en fonction des changements de moyenne et de fréquence d'occurrence annoncés par les MCG. L'inconvénient de ce type d'approche est de ne pas utiliser directement les indices atmosphériques dérivés des sorties de MCG dans le processus de génération des chroniques de pluie et de température, et d'engendrer par connexion entre précipitation et température, une modification de la moyenne et de l'autocorrélation des températures (Wilby *et al.* 1998).

- Les méthodes basées sur des relations empiriques à base physique entre échelle continentale et locale utilisant une classification des types de situations synoptiques (Bardossy & Van Mierlo 2000). Une probabilité d'occurrence des précipitations et leur intensité moyenne journalière sont associées aux différentes configurations isobariques identifiées comme des modes de variations synthétiques de la circulation atmosphérique.
- Les méthodes souvent qualifiées de dynamiques, qui recourent à un modèle climatique régional emboîté dans un modèle de circulation générale, le second fournissant les conditions aux limites au premier (par exemple Christensen & Christensen 1998). Notons que certains auteurs ont procédé à une simple interpolation des sorties de modèle climatique au-dessus de leur zone d'étude (Sefton & Boorman 1997; Middelkoop *et al.* 2001), qui peut parfois se justifier en fonction de la taille du bassin versant sur lequel est envisagé l'étude d'impact.

1.3.2. Du bon usage des extrants de MCG pour l'établissement de scénarios climatiques

La désagrégation d'échelle statistique suppose le plus souvent, comme nous l'évoquions plus haut, d'établir une liste de prédicteurs atmosphériques de grande échelle qui soient pertinents vis-à-vis de la variabilité locale du climat. Cette exigence

implique d'utiliser un MCG qui ait la capacité de reproduire convenablement les modalités dynamiques et physiques du climat présent et de fournir des valeurs d'indices atmosphériques suffisamment précises par rapport aux valeurs réelles ou approchées par le biais de réanalyses. Celles-ci correspondent à des observations de surface interpolées à l'aide de modèles atmosphériques (<http://ncep.noaa.gov>). Des études préliminaires sur le modèle HadCM2, ont montré que certaines intégrations (HadCM2SUL par exemple), tendaient à surestimer l'indice de vorticité et donc à donner au climat actuel (1961-1990) une connotation trop anticyclonique par rapport aux valeurs d'indices déterminés à l'aide des champs atmosphériques délivrés par les réanalyses du NCEP (National Centres for Environmental Prediction)/NCAR (National Centre for Atmospheric Research) (Wilby *et al.* 1998). Avant d'établir un taux de variation entre les sorties de MCG (précipitation, température, etc.) présentes et futures (2041-2070 par exemple), il est donc nécessaire lorsque cela est possible de débiaiser les valeurs d'indice atmosphériques issues de ces intégrations. Une autre source d'incertitude réside dans les conditions d'initialisation du MCG qui déterminent en partie la trajectoire que prendra le modèle au cours de l'expérience de simulation.

1.4. Choix du modèle pluie-débit

La procédure suivie pour quantifier l'impact des variations climatiques consiste en général à caler le modèle pluie-débit sur les séries de mesure climato-hydrologiques disponibles, puis de l'utiliser pour simuler une chronique de débit et déterminer les variables hydrologiques caractérisant la réponse hydrologique du bassin versant étudié. Les types de modèles hydrologiques potentiellement applicables pour estimer les conséquences hydrologiques de l'instationnarité climatique sont nombreux et répondent chacun à une finalité différente. Nous reprenons ici pour l'essentiel la synthèse effectuée par Perrin (2000) qui propose différentes clés de différenciation des modèles pluie-débit. Ainsi, ils peuvent être :

- déterministes ou stochastiques suivant la prise en compte de lois physiques de l'écoulement ou d'une distribution de probabilité;
- globaux (SWM de Stanford...), semi-distribués ou spatialisés suivant que le bassin versant est considéré dans l'espace comme une unité homogène, qu'il est divisé en sous-unités supposées homogènes (éventuellement des sous-bassins comme HBV-96), ou qu'il est finement divisé en mailles (Mike-SHE, CEQUEAU, etc.);
- cinématiques (descriptifs) ou dynamiques (explicatifs) suivant que l'évolution temporelle

du système est simplement décrite ou mise en relation avec les forces qui en sont la cause;

- empiriques (ARMAX...) ou conceptuels (TOPMODEL...), suivant les relations utilisées pour modéliser la transformation de la pluie en débit et suivant la représentation du système modélisé.

Le type de fonctionnement du modèle au cours du temps peut aussi entrer en ligne de compte, le modèle pouvant simuler les chroniques de débit en continu ou par événement. Le type et la quantité de données requises, le but du modèle ou le pas de discrétisation temporelle concerné (heure, jour, mois, année) sont encore des critères de classification potentiels. Le modèle employé dans le cadre de cette étude appartient à la classe des modèles conceptuels à réservoirs. Perrin (2000) les décrit ainsi: « les modèles à réservoirs conceptuels sont schématiquement constitués de réservoirs interconnectés qui assurent la transformation de la pluie en débit. Ils sont moins abstraits que les modèles boîte-noire dans leur représentation de la transformation de la pluie en débit, même si leur interprétation physique n'est pas immédiate. Ces modèles sont structurés à partir de deux composants majeurs:

- un module de production responsable de la détermination des bilans en eau, c'est-à-dire de la répartition de la pluie brute en pluie nette (alimentant le débit), en quantité évaporée et en quantité stockée;
- un module de routage ou de transfert permettant d'assurer la répartition spatiale et temporelle de la quantité d'eau transitant dans le cours d'eau.

Rarement directement mesurables, les fonctions dépendent de paramètres qui doivent être optimisés par une procédure de calage numérique.» La catégorie des modèles conceptuels se différencie de celle des modèles à réservoirs empiriques en ce qu'elle se réfère directement à la manière dont le concepteur perçoit la transformation de la pluie en débit (démarche hypothético-déductive). Les modèles empiriques (Young 2002) quant à eux, se construisent sans a priori sur la transformation pluie-débit, simplement sur la base des données hydro-météorologiques et de leur ajustement progressif au cours du processus de modélisation (démarche inductive). Pour asseoir le choix du modèle hydrologique sur des bases solides, Lindström *et al.* (1997) proposent de vérifier que le modèle sélectionné répond aux qualités suivantes:

- Le modèle doit avoir des fondements scientifiques sains.
- Les besoins en données doivent être en accord avec la disponibilité de celles-ci sur la majorité des bassins.

- La complexité du modèle doit être justifiée en termes de performance. De nombreuses études dont Refsgaard & Knudsen (1996) ou encore Wilcox *et al.* (1990) ont montré que, dans un but opérationnel, le gain d'efficacité des modèles complexes à base physique sur les modèles simples est loin d'être démontré.
- Le modèle doit être convenablement validé.
- Le modèle doit être compréhensible par les utilisateurs.

Le choix et l'utilisation d'un modèle pluie-débit devrait aussi être dicté par un principe supplémentaire: le principe de parcimonie recommandé par Nash & Sutcliffe (1970) et imposant la nécessité de structures simples et sans redondances. En effet, la sur-paramétrisation des modèles conceptuels est fréquente et de nombreux exemples dans la littérature sembleraient indiquer que la modélisation pluie-débit pourrait donner des résultats satisfaisants avec moins d'une dizaine de paramètres. Sur la problématique de la simulation des effets des conditions climatiques futures sur les débits, l'emploi d'un modèle pluie-débit conceptuel n'est pas la panacée. En effet, l'aptitude d'un modèle à tenir compte de conditions climatiques non-stationnaires, évaluée par exemple à travers le « differential split-sample test » de Klemes (1986), n'est pas aisée à démontrer puisque par définition, la réponse hydrologique future des bassins versants aux changements environnementaux est inconnue. Evans & Schreider (2002), disposant d'une série de débits suffisamment longue, ont pu montrer que les paramètres du modèle global conceptuel IHACRES étaient relativement indépendants par rapport à une hausse de 20 % des précipitations sur la période de mesure. Cependant cette hausse de précipitation n'intègre pas la modification de la variabilité pluviométrique ou encore la hausse des températures correspondant aux scénarios climatiques futurs. Boorman & Sefton (1997), au terme d'une synthèse bibliographique, montrent que la plupart des auteurs aboutissent à la conclusion que, s'il existe un biais incompressible lors de l'application d'un modèle pluie-débit calé dans les conditions climatiques actuelles pour des conditions climatiques modifiées, celui-ci peut être considéré comme négligeable par rapport aux effets induits par le changement du climat sur la ressource en eau et le comportement des cours d'eau. La publication récente de Kaleris *et al.* (2001) s'accommode difficilement de cette position. Leurs travaux, utilisant une démarche de modélisation pluie-débit dans le cadre de prédictions climatiques futures, ont montré que l'erreur de prédétermination des débits, issue du modèle pluie-débit employé dans le contexte climatique actuel, était largement supérieure à l'incidence sur les débits du changement climatique sous un doublement du CO₂ atmosphérique. Dans ces conditions, le régime hydrologique futur d'un cours d'eau peut

donc difficilement être anticipé. L'application de la méthodologie de Kaleris *et al.* (2001) suppose néanmoins de disposer de séries hydrologiques suffisamment longues pour pouvoir quantifier l'incertitude du modèle pluie-débit, sur le débit moyen journalier par exemple. D'autre part, de nombreuses études et celle-ci en fera partie, concluent en affirmant que les résultats obtenus ne fournissent qu'un ordre de grandeur de l'impact prévisible et que les changements pronostiqués sont sujets à de multiples incertitudes. Celles-ci résident souvent dans la non prise en compte des rétroactions positives ou négatives existant entre les différents compartiments du cycle de l'eau. La plupart des modèles climatiques annoncent une hausse de la température estivale dans nos régions, qui devrait accélérer le recyclage des eaux de précipitation, l'évapotranspiration atteignant plus souvent son niveau potentiel (Evans & Schreider 2002). Or, les modèles conceptuels à réservoir recourent en général à l'évapotranspiration potentielle (ETP) pour régler les échanges au niveau du réservoir de production. L'augmentation de la température estivale va s'accompagner d'un accroissement de l'ETP qui va donc soustraire une quantité d'eau non négligeable à l'exutoire du bassin simulé. Or cette démarche ignore la rétroaction négative (c'est-à-dire qui atténue l'intensité du changement climatique) exercée par la végétation placée dans des conditions de sécheresse édaphique qui par régulation stomatique, va limiter ses échanges avec l'atmosphère et donc répondre très en deçà de la demande atmosphérique, et *de facto* atténuer la diminution drastique des réserves en eau que pourrait laisser présager l'utilisation du facteur ETP seul. Des études menées en chambre à transpiration, ont également montré que l'élévation de la teneur en CO₂ se traduisait par une diminution de la conductance stomatique, soit une meilleure efficacité dans l'utilisation de l'eau du sol au niveau des feuilles des arbres testés (Norby *et al.* 1996). Il y aurait donc une certaine plasticité dans la réponse végétative au changement de régime thermique et de composition chimique de l'atmosphère. La complexité des processus à prendre en compte est donc importante et les rétroactions susceptibles de moduler la réponse hydrologique au forçage climatique, nombreuses. Il faut conclure que le type d'étude d'impact hydrologique tel que celle menée ici, à défaut d'être d'une grande fiabilité permet d'une part d'avoir une connaissance de l'incertitude des projections faites à différentes échéances et le cas échéant, d'approcher la nature des changements hydrologiques et donc d'anticiper suffisamment tôt leur répercussion sur notre environnement. Boorman & Sefton (1997) relèvent que l'un des faits dont on peut avoir la quasi-certitude est que les changements affectant la pluviosité (quantité, intensité, durée) ont un effet plus important en termes de facteur d'impact sur les débits que les autres variables climatiques. Cette assertion se vérifie bien d'ailleurs sur le territoire luxembourgeois au cours des cinquante dernières

années avec des nuances locales guidées par le relief (Pfister *et al.* ce volume). La catégorie des modèles globaux conceptuels était-elle donc adaptée à résoudre la problématique posée? Bronstert *et al.* (2002) militent en faveur de l'utilisation des modèles hydrologiques à base physique semi-distribués qui, par leur représentation spatialisée du cycle de l'eau sont seuls à-mêmes de prendre en compte conjointement l'effet des changements d'occupation des sols et de régime climatique sur les processus et les variables hydrologiques. Ce point demande à être nuancé dans la mesure où il est possible de mettre en relation les paramètres d'un modèle conceptuel avec certains descripteurs physiques de bassins versants, dont l'occupation du sol, et donc d'envisager une régionalisation de l'impact hydrologique du signal climatique et des changements d'occupation du sol, comme le suggèrent par exemple Sefton & Boorman (1997). Ajoutons avec Boorman & Sefton (1997) que si l'on se contente de traiter le volet climatique des changements attendus, l'incertitude relative aux paramètres parfois nombreux que les modèles à base physique emploient peut être rédhibitoire. Nous avons finalement choisi d'utiliser un modèle pluie-débit conceptuel parcimonieux qui minimise le poids des conditions de calage (identification des paramètres optimaux par minimisation d'une fonction objectif) des paramètres sur les résultats finaux.

1.5. Les variables hydrologiques

Elles sont légion et permettent d'extraire une information variée sur les chroniques de débit simulées. Certains auteurs préfèrent se limiter à des variables intégratrices (le module annuel par exemple) eu égard à l'incertitude relative aux simulations pluie-débit (Menzel & Bürger 2002). Pour notre part nous recourrons à des variables permettant de caractériser à la fois le comportement moyen et extrême des cours d'eau analysés.

2. Matériel et méthodes

2.1. Présentation du MCG et des scénarios climatiques utilisés

2.1.1. Le modèle de circulation générale atmosphérique HadCM3

Issu de la troisième génération des MCG mis au point et utilisés depuis 1998 par le centre de

prévision Hadley hébergé par le Bureau Météorologique du Royaume Uni, le modèle couplé océan-atmosphère HadCM3 est décrit en détail par Gordon *et al.* (2000) et Pope *et al.* (2000). Il se distingue de ses prédécesseurs, dont HadCM2, par une haute résolution spatiale au-dessus de l'océan qui affranchit de la nécessité d'ajuster les flux de chaleur ou de vapeur d'eau à la surface de l'océan. Le MCG HadCM3 comprend 19 niveaux d'une résolution de 2.5° de latitude par 3.75° de longitude, ce qui représente une matrice globale de 96 x 73 cellules. Cette grille est équivalente à une résolution spatiale de 417 km x 278 km à l'Equateur, qui se réduit à une maille élémentaire de 295 km x 278 km au 45° parallèle (Fig. 5).

Les principales nouveautés de cette version du MCG HadCM3 résident dans l'implémentation d'un nouveau schéma radiatif et d'un nouveau schéma de surface, incluant le traitement de la solidification et de la fusion de l'eau du sol, et de l'influence de la température et de la concentration en CO₂ sur la résistance stomatique. Le schéma de convection a également été amélioré. Les limites de la maille élémentaire du modèle climatique HadCM3 entourant la région Luxembourg-Alzette (50°N-7.5°E) sont représentées sur la Fig. 6. Précisons que la forme de la maille ne reflète pas la rotondité de la Terre, le rectangle 2.5° x 3.75° étant en réalité de grand axe N-S au sol.

2.1.2. Les scénarios climatiques testés

Un éventail d'intégrations du modèle HadCM3 a été réalisé, dans le but de prendre en compte les différents scénarios socio-économiques du SRES, déjà évoqués précédemment (<http://cru.uea.ac.uk/link> et GIEC 2001). L'intégration nommée HadCM3 SRES1 a été prise comme référence pour la représentation du climat actuel sur la période 1961-1990. Elle a été forcée en utilisant l'augmentation historique des GES sur la période 1860-1990, puis diversifiée selon différents scénarios d'émission sur la période de simulation 1990-2100. Le doublement de la teneur en CO₂ atmosphérique est prévu à l'horizon 2080 pour le scénario A2a et au-delà de 2100 pour le scénario B2a (Fig. 3). Les taux de variations appliqués aux moyennes mensuelles de précipitation et de température de la normale 1961-1990 ont été établis entre les sorties de HadCM3 SRES1, HadCM3 A2a et HadCM3 B2a, ces deux dernières intégrations appartenant à un ensemble d'intégrations réalisées avec différentes conditions d'initialisation pour les familles de scénarios d'émission A2 (plutôt pessimiste) et B2 (plutôt optimiste). Ceux-ci ont été calés sur des modèles environnementaux et des projections démographiques spécifiques. Les projections climatiques simulées par les intégrations HadCM3 A2 et HadCM3 B2 pour le 21^{ème} siècle font état d'une augmentation comparable des températures de l'ordre de 1.5 à 2°C en moyenne annuelle à l'horizon

2050, dans la gamme des simulations effectuées sous différents forçages atmosphériques (GIEC 2001). Certaines équipes de recherche « indépendantes » du consortium GIEC (par exemple Michaels *et al.* 2002) suggèrent néanmoins, sur la base de nouvelles découvertes sur le forçage radiatif induit par les aérosols du carbone noir (black carbon), que le réchauffement climatique planétaire pourrait être moins prononcé que ce que laisse entendre le troisième rapport d'avancement du GIEC (GIEC 2001). En termes de hauteurs pluviométriques mensuelles, les deux scénarios d'émission A2 et B2 pronostiquent un climat plus sec en moyenne annuelle dans une cinquantaine d'années à nos latitudes, avec des hivers plus humides et des étés plus secs que l'actuel. Les données atmosphériques mensuelles afférentes aux trois intégrations (HadCM3 SRES1, HadCM3 A2a et HadCM3 B2a) et exploitées pour l'établissement des scénarios climatiques, sont les suivantes:

- Température de l'air en °C à 1.5 m
- Intensité pluviométrique moyenne en mm/jour à 1.5 m du sol
- Humidité relative (%) à 1.5 m
- Pression atmosphérique au niveau de la mer (hPa)
- Altitude du géopotential à 500 hPa (m)
- Altitude du géopotential à 950 hPa (m)

Le jeu de données est issu du projet climatologique « Climate impact LINK » et nous a été fourni par D. Viner de l'Unité de Recherche Climatologique de l'Université East Anglia de Norwich (<http://cru.uea.ac.uk/link>). Notons que, faute de temps, il n'a pas été possible de valider les indices atmosphériques calculés sur la période 1961-1990, à partir des données issues de l'intégration HadCM3 SRES1 par rapport aux réanalyses du NCEP, censées donner une estimation plus précise du climat et de ses composantes sur les cinquante dernières années grâce au recours au réseau d'observation climatologique mondial. Nous comparerons néanmoins, sur une région englobant notre zone d'étude, la magnitude et la saisonnalité des valeurs d'indices obtenues avec des résultats d'autres auteurs, déterminés sur la base de réanalyses du NCEP.

2.2. Le générateur stochastique de climat

Le couplage du générateur stochastique de climat et d'un modèle pluie-débit offre l'avantage d'augmenter significativement la quantité de données à disposition et de reproduire un large éventail de conditions climatiques probables, alliant des épisodes pluvieux et des variations thermiques

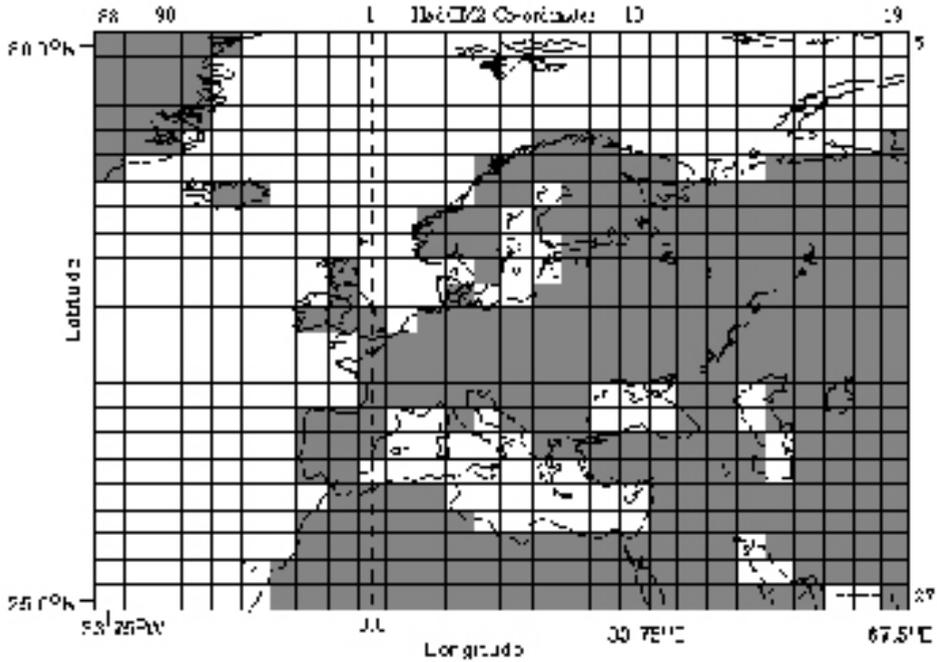


Fig. 5. Schéma de discrétisation spatiale du domaine « Europe » dans le modèle numérique de circulation générale HadCM3. Résolution spatiale de $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ (<http://cru.uea.ac.uk/link>).

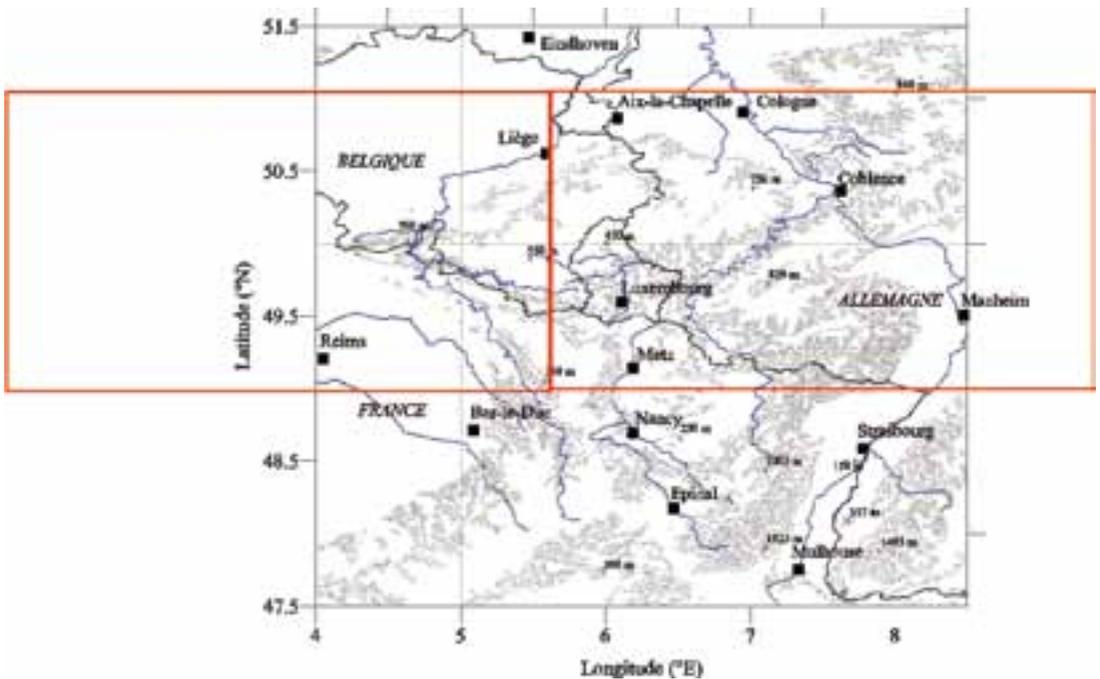


Fig. 6. Pavé élémentaire (à droite) du modèle HadCM3 au point de grille $50^\circ\text{N}-7.5^\circ\text{E}$ englobant la région d'étude.

aux propriétés structurales multiples (forme, longueur, magnitude). La prise en compte de cette variabilité permet en outre d'apprécier le risque (au sens statistique) encouru dans l'estimation des grandeurs hydrologiques par une démarche de modélisation pluie-débit. Un générateur stochastique autorise la génération de séries climatologiques correspondant à deux phases climatiques en tenant compte de leurs différences statistiques (moyenne et écart-type) sur les précipitations et l'ETP *via* la température. Celles-ci, introduites dans un modèle pluie-débit, servent à simuler des séries de débits et donnent une estimation des débits caractéristiques dans deux contextes climatiques différents. De nombreux générateurs stochastiques de pluie ont été mis au point à des fins d'application hydrologique (Burlando & Rosso 2002; Leviandier *et al.* 2001) et le plus souvent couplés à des modèles pluie-débit pour l'estimation des quantiles de crue (Arnaud & Lavabre 2002). Pour notre part, désireux d'utiliser un outil facilement disponible, accessible et permettant de simuler conjointement des séries longues de précipitation et de température sous conditions climatiques présentes et futures, notre choix s'est plutôt porté vers un générateur stochastique de climat qui présente moins de raffinement qu'un générateur stochastique dédié aux précipitations, mais qui simule conjointement les variables climatiques les plus usuelles. Un générateur stochastique de climat (traduction de « weather stochastic generator » en anglais), est un modèle numérique permettant de générer des chroniques météorologiques (pluie, températures minimale et maximale, rayonnement global) sur le long terme ayant des propriétés statistiques (moyenne, écart-type) similaires aux séries météorologiques observées en lieu donné. Le générateur que nous avons utilisé se nomme LARS-WG (Semenov & Barrow 1997; Semenov & Barrow 2002). Du domaine public (www.lars.bbsrc.ac.uk/model/larswg.html), il a été conçu initialement pour des applications en agronomie, notamment pour mesurer l'impact des changements climatiques sur les rendements agricoles. D'un point de vue technique, la motivation première de la conception de LARS-WG était de dépasser les limitations d'une approche markovienne dans la génération des occurrences de précipitations, utilisée fréquemment dans la littérature (Richardson 1981). Notons que ce générateur a été validé en de nombreux sites d'Europe sous des climats différents et s'est révélé plus performant que son homologue WGEN (Semenov *et al.* 1998). LARS-WG, générateur stochastique semi-paramétrique (qui ne fait pas d'hypothèses *a priori* sur le type de distribution) local ou mono-site (il ne tient pas compte de la corrélation spatiale entre sites de mesure), se caractérise par une certaine parcimonie, au sens où le nombre de paramètres devant être ajustés pour la simulation des chroniques journalières est réduit. Le principe de génération des séries climatologiques est inspiré de Racsko *et al.* (1991).

LARS-WG génère les séries de précipitation en traitant simultanément leur occurrence et leur intensité (Semenov & Barrow 2002). La longueur des séquences sèches (sans pluie) et pluvieuses (> 0 mm), et l'intensité pluviale journalière, sont générées à l'aide d'une distribution fréquentielle semi-empirique qui évolue en fonction de l'accumulation des observations au cours du temps. Cette fonction semi-empirique est caractérisée par dix intervalles (i_1, i_2, \dots, i_{10}) dans lesquels sont ventilés les événements de la série mesurée, les $i_{j\text{èmes}}$ événements tombant dans le j ème intervalle. Avant d'envisager une étude hydrologique à l'aide du générateur de climat, il convient de tester son aptitude à reproduire le climat de la région dans laquelle il est appliqué. Comme nous le signalons plus haut, LARS-WG a été appliqué en plusieurs sites d'Europe avec succès. Nous avons voulu néanmoins confirmer ces résultats sur notre jeu de données climatologiques. Pour illustrer les résultats statistiques, le poste pluviométrique de Koerich situé à 10 km à vol d'oiseau de Luxembourg-ville et la station climatologique de Findel-aéroport nous serviront de fil rouge, la période de référence correspondant à la normale 1971-2000.

2.2.1. Les séries de précipitation

Pour caractériser le régime pluviométrique actuel, plusieurs variables-tests, importantes d'un point de vue hydrologique (en fréquence, intensité et durée), ont été considérées: la durée moyenne des séquences sèches et humides, le total pluviométrique moyen mensuel, l'écart-type pluviométrique moyen mensuel, le maximum pluviométrique journalier, la distribution fréquentielle des intensités journalières et de la hauteur de précipitation maximale hivernale (octobre-mars) sur 10 jours de pluie consécutifs. Pour être sûr que les propriétés statistiques des séries de précipitation et de température générées convergent vers les propriétés statistiques des séries météorologiques observées, la simulation a été effectuée sur une durée suffisamment longue de 1000 ans (Arnaud 1997). Le critère de validation consiste donc à comparer la statistique des variables pluviométriques précitées, calculée sur la série de précipitation du poste pluviométrique de Koerich, à celle calculée sur les séries de précipitation générées à l'aide de LARS-WG.

Les hauteurs de précipitations moyennes mensuelles et l'intensité moyenne mensuelle du maximum pluviométrique journalier sont reproduites avec succès par le générateur qui simule correctement les fluctuations annuelles de ces deux variables (Fig. 7 a et 7 b). En termes de variabilité interannuelle, si le maximum pluviométrique journalier est bien simulé, l'écart-type des totaux mensuels d'hiver (trimestre DJF) est sous-estimé par le générateur.

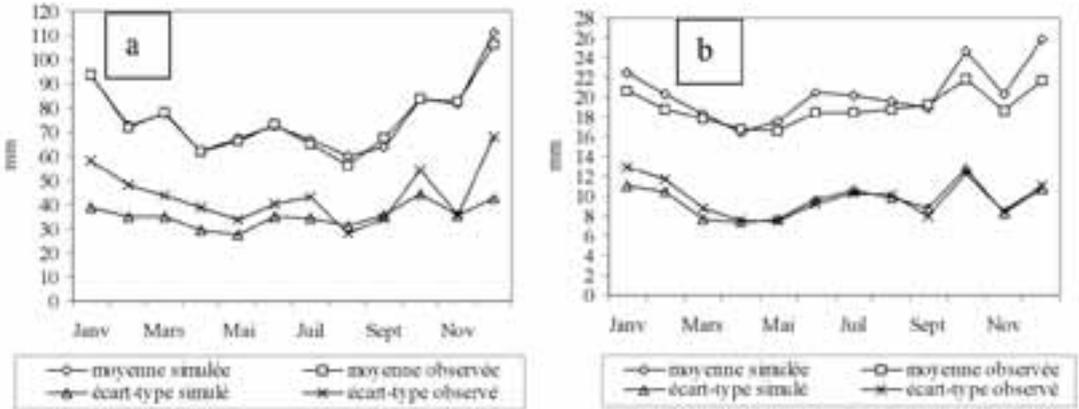


Fig. 7. Comparaison de la moyenne et de l'écart-type interannuel observés et simulés des précipitations mensuelles (a) et du maximum pluviométrique journalier (b). Poste pluviométrique de Koerich période 1971-2000.

Outre la plus grande sensibilité à l'échantillonnage des écart-types, la non prise en compte dans la génération des précipitations quotidiennes des conditions de circulation atmosphérique qui dictent, en hiver, la distribution temporelle des abats pluvieux, et la répétition de la même distribution empirique d'année en année (alors qu'en réalité la loi de distribution des précipitations varie d'année en année) sont deux éléments qui peuvent expliquer ce comportement. S'agissant non plus de l'intensité mais de la fréquence de non dépassement ou période de retour empirique du maximum pluviométrique journalier, il a fallu dans un premier temps déterminer la période de retour empirique T associée aux différentes intensités maximales journalières selon la distribution empirique de Hazen, qui s'écrit:

$$F(x) = (r-0.5)/n$$

avec r , le rang de la valeur x et n la taille de l'échantillon. La période de retour s'obtient en prenant l'inverse de la fonction $F(x)$. 30 valeurs du maximum pluviométrique journalier ont été extraites, pour chacun des mois de l'année, de la série de précipitation observée d'une part, et 1000 valeurs, pour chacun des mois de l'année, de la série générée d'autre part. Ces valeurs du maximum pluviométrique journalier ont été ensuite classées par ordre décroissant et la période de retour déterminée pour chacune des valeurs selon la méthode précitée. En consultant la Fig. 8, on s'aperçoit que l'intensité du maximum pluviométrique journalier est restituée d'une façon satisfaisante en toute saison pour une période de retour restant dans la fourchette des valeurs observées, c'est-à-dire 30 ans. En revanche, le générateur stochastique éprouve quelques difficultés à générer des intensités pluviométriques exceptionnelles qui n'ont pas été enregistrées sur la période de mesure, d'où le caractère asymptotique du maximum pluviométrique journalier simulé au-delà d'une période de

retour de 100 ans (Fig. 8).

L'application de la même procédure fréquentielle à l'ultime variable-test, fait apparaître une divergence importante entre les séries de précipitation observée et simulée (Fig. 9 a), qui trahit l'incapacité apparente du générateur LARS-WG à simuler des épisodes pluvieux longs et intenses. En réalité, un examen plus attentif des chroniques de pluie journalière générées en période hivernale (Fig. 9 b), montre l'occurrence de fortes intensités pluviométriques journalières isolées pouvant dépasser 60 mm/24 h, ce qui correspond davantage à un faciès d'épisodes pluvieux convectifs. Le volume pluviométrique est donc globalement bien restitué, mais LARS-WG génère des précipitations journalières indépendantes, alors qu'en réalité, au cours d'un épisode pluvieux abondant, notamment en hiver, il arrive fréquemment que plusieurs jours de fortes intensités se succèdent, et il est rare qu'un jour de forte pluie ne soit pas précédé ou suivi par un ou plusieurs jours de pluie. Pour évaluer l'influence de la divergence des structures pluviométriques sur la magnitude des forts débits de pointe, nous avons repris quatre épisodes de pluie représentatifs générés par LARS-WG, situés au cœur de l'hiver. La date d'occurrence du pic pluviométrique a été modifiée de façon à comparer des structures d'épisode continues et discontinues.

Les nouveaux hyétogrammes ont été injectés dans le modèle pluie-débit MHR (voir plus loin) en reprenant le bassin-pilote de l'Eisch à Hagen pour les raisons invoquées ci-dessous (voir 2.4.2.). Les résultats sont présentés sur la Fig. 10. Dans le cas a, deux jours sans pluie ont été supprimés pour créer un épisode de pluie continu, dans le cas b, un seul jour sans pluie a été supprimé, tandis que dans les cas c et d, c'est un intermédiaire sans pluie de 4 et 3 jours respectivement qui a été supprimé, avant l'occurrence du pic pluviométrique. Il ressort que l'écart d'amplitude des débits de pointe est propor-

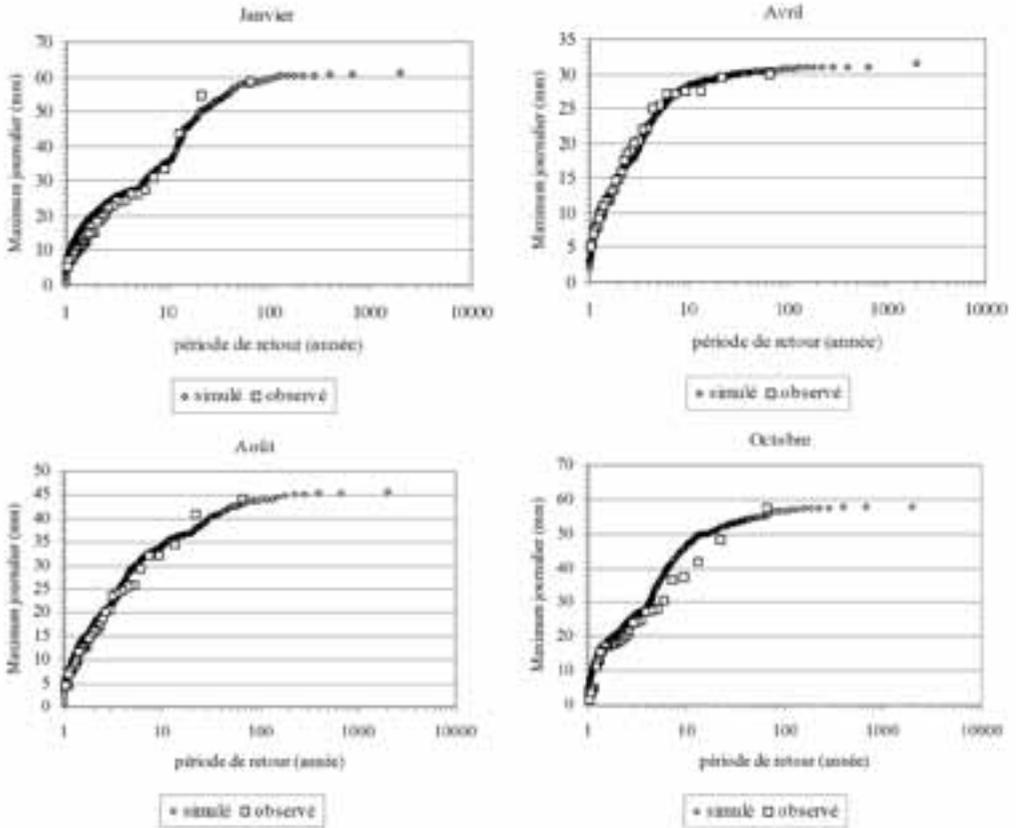


Fig. 8. Intensité du maximum pluviométrique journalier observée et simulée pour différentes périodes de retour empiriques et pour quatre mois de l'année représentatifs des quatre saisons (poste pluviométrique de Koerich, période 1971-2000).

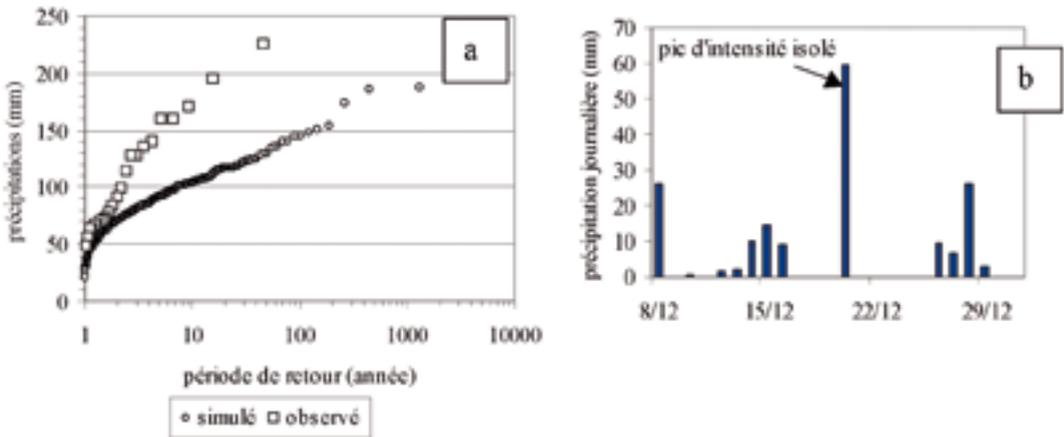


Fig. 9. a) Période de retour empirique de la hauteur de précipitation maximale hivernale sur 10 jours de pluie consécutifs observée et simulée. b) Exemple de hyétoGRAMME généré par LARS-WG en période hivernale.

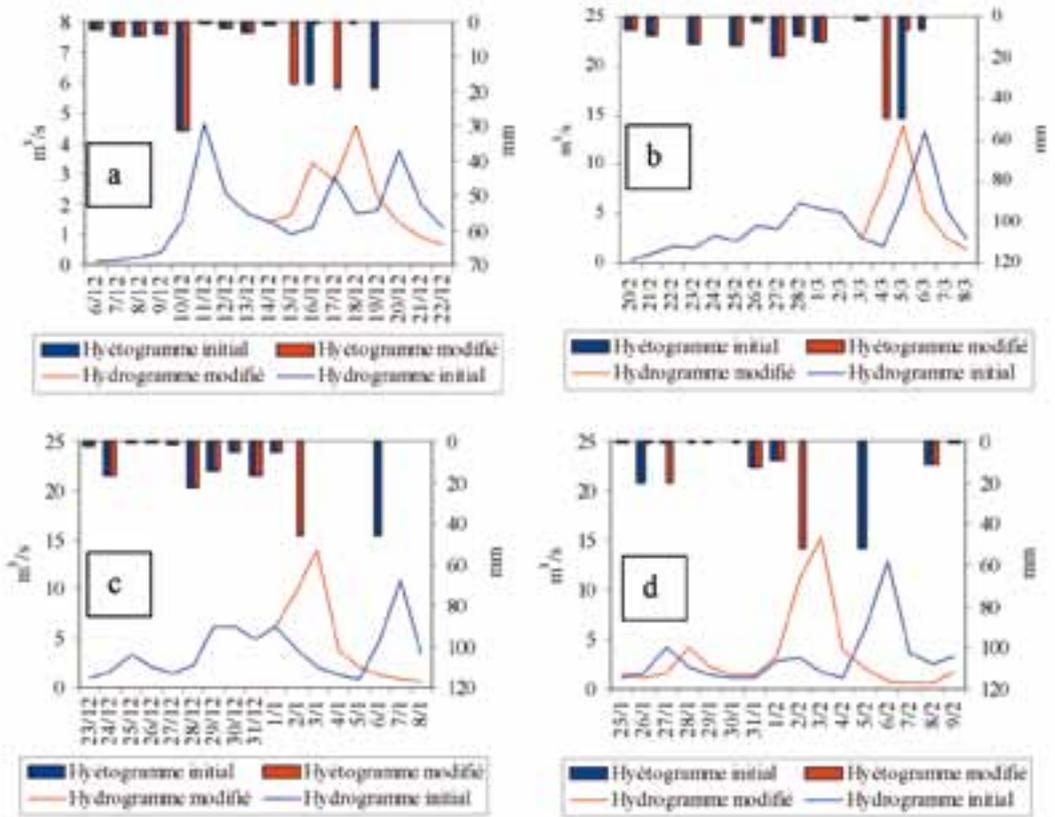


Fig. 10. Influence de la localisation temporelle du pic pluviométrique sur l'amplitude des débits de pointe. Bassin versant de l'Eisch à Hagen. Suppression de 2 jours (a), d'un seul jour (b), de 4 jours (c), respectivement de 3 jours (d) sans pluie avant l'occurrence du pic pluviométrique.

tionnel à la longueur de l'intermède sans pluie (Fig. 10 a, c, d vs Fig. 10 b). La différence entre les débits de pointe simulés avec les hyétoigrammes modifiés et les hyétoigrammes initiaux, s'élève à 20 % en moyenne, ce qui n'est pas négligeable. Par rapport à une structure pluviométrique réaliste (hyétoigrammes modifiés), la génération des séquences de pluie intense par LARS-WG aurait donc pour effet de sous-estimer les forts débits de pointe dans une proportion somme toute raisonnable, par rapport aux écarts importants entre les épisodes pluviométriques continus des hyétoigrammes initiaux et modifiés. De plus, les temps de montée des deux cours d'eau sélectionnés pour l'étude d'impact (voir 2.4.2.) étant inférieurs à la journée, les limitations de LARS-WG ont une incidence réduite.

Enfin la durée moyenne des séquences humides et sèches est convenablement reproduite par le générateur de climat au cours des différents mois de l'année, comme l'atteste la Fig. 11.

2.2.2. Les séries de température journalières

Pour caractériser le régime thermique actuel, les variables-tests correspondant aux moyennes et aux écart-types mensuels ont été comparées. Les résultats, reportés sur les Fig. 12 a et 12 b soulignent une bonne concordance d'ensemble des valeurs observées et simulées. Par ailleurs, Semenov *et al.* (1998) notent que le générateur LARS-WG a quelques difficultés à restituer avec précision les séquences prolongées de gel ($T_n < 0^\circ\text{C}$) et les séquences chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$).

Au total, et dans une perspective d'application hydrologique, nous retiendrons de ce banc d'essai que le générateur stochastique de climat LARS-WG, en dépit d'une certaine difficulté à reproduire la structure temporelle des épisodes pluvieux associant durée et forte intensité, présente un bon comportement d'ensemble et une aptitude acceptable à reproduire les propriétés statistiques du climat présent de la région étudiée, aux pas de temps journalier, mensuel et annuel. La sous-

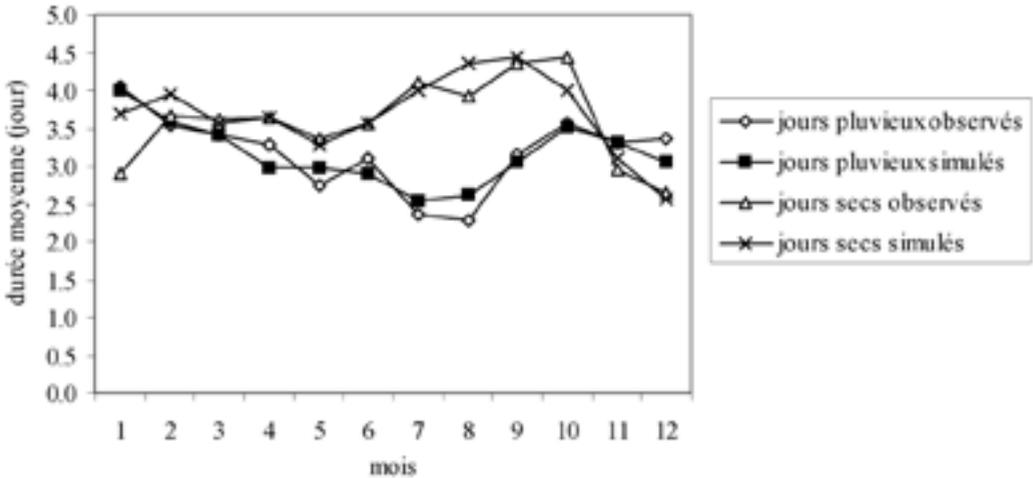


Fig. 11. Durées moyennes observées et simulées des séquences sèches et pluvieuses. Poste pluviométrique de Koerich, période 1971-2000.

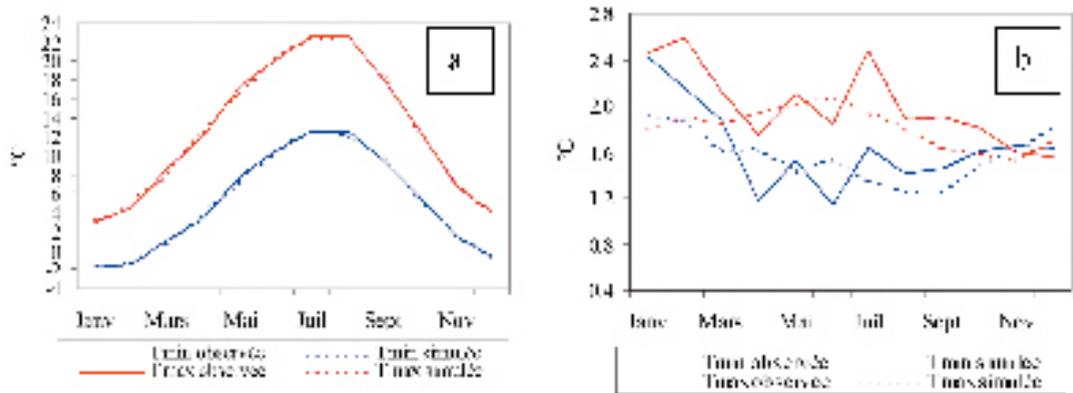


Fig. 12. Températures mensuelles minimales et maximales: (a) moyennes observées (station météorologique de l'aéroport du Findel) et simulées par LARS-WG et (b) écart-types observés (station météorologique de l'aéroport du Findel) et simulés par LARS-WG, période 1971-2000.

estimation des cumuls pluviométriques journaliers maximaux implique une sous-estimation des plus forts débits de pointe annuels, les pics d'intensité isolés de saison froide augmentant le temps de décrue entre deux séquences moyennement pluvieuses.

2.3. Le modèle hydrologique MHR

Le modèle pluie-débit MHR est un modèle conceptuel à réservoir doté de 4 paramètres libres, qui simule les débits aux pas de temps horaire et journalier en utilisant les données de précipitations et d'évapotranspiration potentielle (ETP) en données d'entrée (Leviandier *et al.* 1994; Perrin

2000). Il comprend une cascade de réservoirs linéaires incluant un module de neutralisation non-linéaire, un module non-linéaire de routage amont-aval, un hydrogramme unitaire et un module d'échanges souterrains (Fig. 13). La méthode de calage des paramètres est empruntée à Rosenbrock (1960) et correspond au type local, directionnel pas-à-pas. Il s'agit donc d'une stratégie itérative dans laquelle, partant d'un point dans l'espace des paramètres, on se déplace dans une direction qui améliore continûment la valeur de la fonction critère, jusqu'à ne plus pouvoir générer d'amélioration (Perrin 2000). Compte tenu de la parcimonie des paramètres libres du modèle MHR, l'occurrence des optima multiples, ce que Beven (2001) appelle l'équifinalité des paramètres,

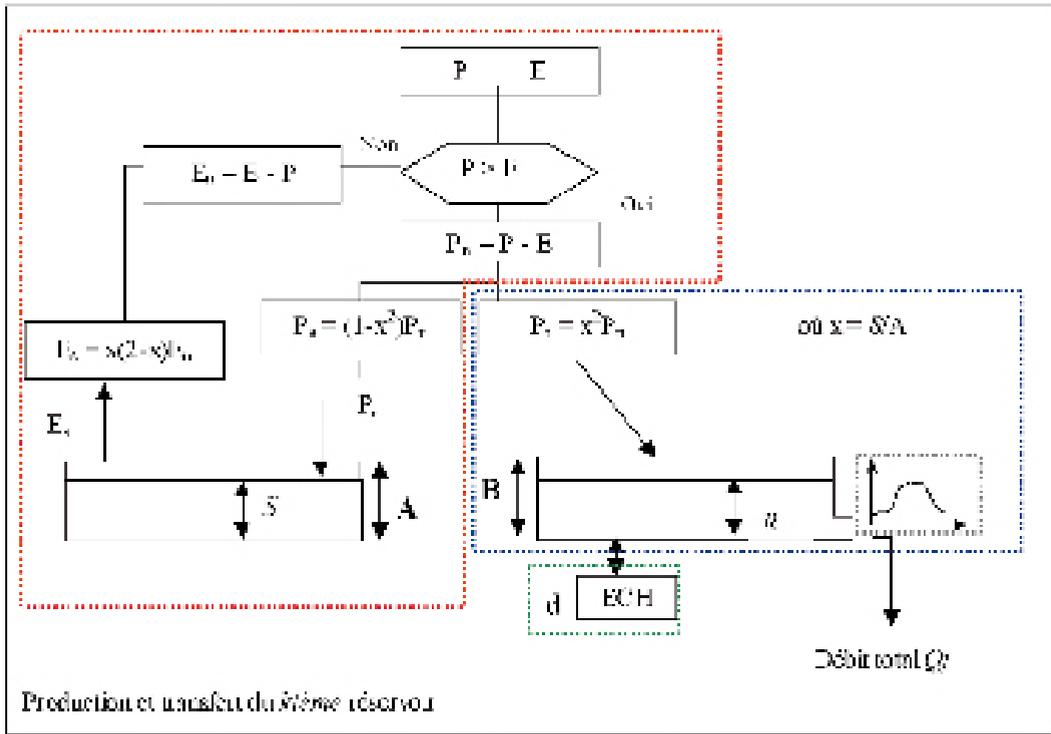


Fig. 13. Représentation schématique de la structure du modèle MHR.

P: précipitation, E: évapotranspiration, Index n: net, Index s: réservoir sol, Index r: réservoir de routage, S: hauteur d'eau dans le réservoir sol, R: hauteur d'eau dans le réservoir de routage, A: capacité maximale de stockage du réservoir sol, B: capacité maximale de stockage du réservoir de routage, ECH: module d'échange souterrain, d: paramètre contrôlant ECH, Q_j : débit total du i ème réservoir. Tirets rouges: fonction de production, tirets bleus: fonction de routage, tirets verts: module d'échange souterrain, tirets noirs: hydrogramme unitaire.

est rare (Edijatno *et al.* 1999). L'applicabilité du modèle MHR pour la prédétermination des débits a été vérifiée autant localement que régionalement dans le bassin versant de l'Alzette (Drogue *et al.* 2002). Les simulations pluie-débit que nous allons réaliser sont donc conditionnelles et ne prétendent pas à l'exactitude.

2.4. Méthodologie générale adoptée pour l'étude d'impact

Compte tenu de la disponibilité du générateur stochastique de climat LARS-WG et des données atmosphériques issues du modèle climatique HadCM3 au pas de temps mensuel, nous avons opté pour une approche couplant ces deux outils numériques, en s'inspirant partiellement des travaux de Semenov & Barrow (1997) et de Hellström *et al.* (2001). Ainsi, dans le but de simuler l'impact hydrologique des changements

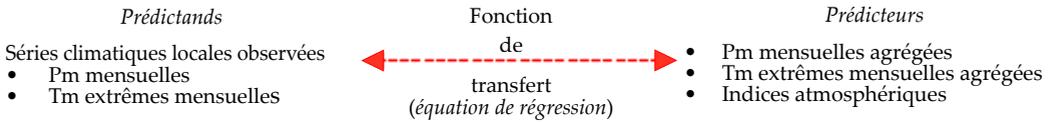
climatiques futurs, plusieurs étapes, reportées sur l'organigramme de la Fig. 14, ont guidé notre progression.

2.4.1. Désagrégation d'échelle des séries climatiques par voie statistique

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations et des températures utilisées pour la génération des séries climatiques quotidiennes ont été modifiées en fonction du taux de variation déduit de la comparaison entre précipitations et températures moyennes mensuelles locales désagrégées pour le climat présent 1961-1990 (en utilisant l'intégration HadCM3 SRES1) et pour la normale climatique 2041-2070 (en utilisant les intégrations HadCM3 A2a et B2a) (Fig. 14). La désagrégation spatiale a été effectuée en appliquant une procédure de régression multiple linéaire de type pas à pas, entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles mesurées localement (prédicteurs), et

Etape 1: Normale climatique actuelle 1961-1990

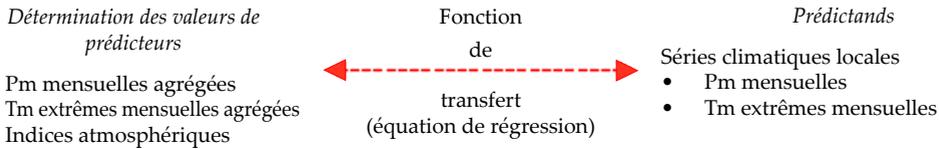
1. Désagrégation d'échelle des séries mensuelles simulées par le MCG à la maille



2. Détermination des paramètres statistiques sur les séries quotidiennes de précipitation et de températures extrêmes

3. Génération de la série millénaire de précipitation et de température extrêmes quotidiennes et simulation des chroniques de débit

Etape 2: Normale climatique future (2041-2070)



Taux de variation de Pm et Tm extrêmes mensuelles désagrégées entre la normale climatique actuelle et future
 Application à Pm et Tm actuelles

Etape 3 : Comparaison des chroniques de débit

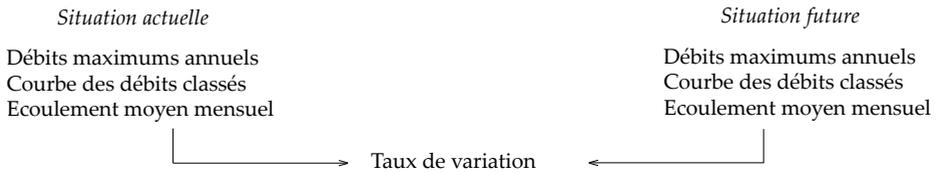


Fig. 14. Méthodologie d'évaluation de l'effet des scénarios climatiques sur la relation pluie-débit. Pm: précipitations mensuelles, Tm: températures mensuelles.

certaines variables atmosphériques (prédicteurs), dont les précipitations et les températures mensuelles simulées par le MCG à l'échelle du pavé couvrant la zone d'étude (Fig. 6). Les niveaux de corrélation partielle étant généralement faibles entre prédicteur(s) et prédicteurs, nous avons toléré un seuil de signification de 10 % lors de la sélection de ces derniers. Le cas échéant, après inclusion du premier prédicteur significatif dans l'équation de régression, l'inclusion d'un deuxième prédicteur significatif ne s'est faite qu'à la condition que celui-ci ne soit pas corrélé au seuil de 10 % avec le prédicteur précédent. Sur la base des travaux cités en littérature (e.g. Wilby *et al.* 1998; Hellström *et al.* 2001) différentes variables et indices atmosphériques, d'envergure régionale, ont été déterminés à partir des variables climatologiques de surface listées en 2.1.2, de la pression atmosphérique moyenne rapportée au niveau de la mer et de l'altitude du champ de géopotential 500 hPa, en adoptant une analyse en points de grille.

La sélection des variables et indices atmosphériques a été effectuée en supposant que leur valeur moyenne mensuelle est susceptible d'expliquer au moins en partie, les processus génétiques (ascendances dynamiques pour les précipitations par exemple) et la variabilité mensuelle et interannuelle des totaux de précipitations ou de la température de l'air au sein de notre région d'étude. Au total, la liste des prédicteurs retenus se compose ainsi:

- Force de la composante zonale du flux synoptique de surface (W) ou au niveau 500 hPa (W500)
- Force de la composante méridienne du flux synoptique de surface (S) ou au niveau 500 hPa (S500)
- Force du flux résultant de surface (F) et au niveau 500 hPa (F500)
- Vorticité de surface (Z) et au niveau 500 hPa (Z500)

- Altitude du géopotential 500 hPa au point de grille 50°N-7.5°E
- Epaisseur de la couche atmosphérique entre les géopotentials 950 et 500 hPa au point de grille 50°N-7.5°E
- Précipitations simulées au point de grille 50°N-7.5°E
- Températures simulées au point de grille 50°N-7.5°E

Précisons que lorsque l'indice *W* est positif, l'air se déplace d'ouest en est et vice-versa. Lorsque l'indice *S* est négatif, le flux atmosphérique est dirigé du Nord au Sud. Les valeurs positives de la vorticité, qui est une mesure de la rotation atmosphérique, renvoient à une courbure cyclonique (basses pressions, air convergent de surface), et les valeurs négatives à une courbure plutôt anticyclonique (hautes pressions, air divergent de surface). La prise en compte du champ de géopotential 500 hPa permet de connaître la dynamique de l'atmosphère libre et notamment, à travers l'indice de vorticité, si les centres d'action, dépressions ou anticyclones, sont d'origine dynamique ou thermique, confinés aux basses couches troposphériques ou relayés en altitude, ce dernier cas de figure favorisant l'instabilité verticale sur une épaisseur troposphérique importante. La magnitude et le signe du gradient d'altitude calculé dans les directions W-E ou N-S au niveau du géopotential 500 hPa renseignent également sur la vitesse et le sens de la circulation d'altitude. Ainsi, une circulation rapide d'ouest, accompagnée d'un train de perturbations, est souvent responsable de cumuls pluviométriques importants sur notre région d'étude. A cette liste de prédicteurs a été ajoutée l'humidité spécifique de surface (g/kg) déduite de la formule simplifiée suivante (Guyot 1997):

$$r = 0.622 (e/PA)$$

où *e* (mb) désigne la pression partielle de vapeur d'eau estimée à partir de *T_m* (°C) et *HR* (%), respectivement température de l'air et humidité relative moyennes mensuelles simulées par le MCG, *PA* (mb) la pression atmosphérique. L'humidité spécifique, déterminée au point de grille 50°N-7.5°E est plus pertinente vis-à-vis de la genèse des précipitations que l'humidité relative dans la mesure où elle renseigne sur le contenu en masse de vapeur d'eau dans l'air, indépendamment de la température de l'air. La hauteur d'eau précipitable, malheureusement indisponible, aurait également pu être exploitée pour désagréger les précipitations. La normale climatique 1961-1990 a été utilisée pour caler l'équation de régression multiple entre les prédicteurs mentionnés ci-dessus et les précipitations et températures mensuelles enregistrées localement (prédictants). Plutôt que de prendre les valeurs brutes des prédicteurs, ce sont les différences à leur moyenne

interannuelle sur la période 1961-1990 qui ont été utilisées aussi bien pour les données issues de l'intégration HadCM3 SRES1 que pour celles issues des intégrations HadCM3 A2a et B2a sur la normale 2041-2070. Ceci permet de soustraire, dans l'ajustement de l'équation de régression, l'effet d'échelle induit par les ordres de grandeur très contrastés des indices atmosphériques, pouvant conduire dans certains cas à des estimations négatives des cumuls de précipitation. Le niveau de performance de la méthode de désagrégation a été évalué sur la base de la qualité de reconstitution du cycle saisonnier. Rappelons que l'hypothèse majeure qui sous-tend cette méthode de désagrégation statistique, consiste à poser comme préalable que le MCG restitue convenablement la circulation atmosphérique générale correspondant à la dynamique future du système climatique à nos latitudes, et que la relation statistique entre un indice atmosphérique et le climat local est stationnaire et univoque, ce qui est une simplification de la réalité. Précisons d'autre part, que nous ne prenons en compte par le biais de cette méthode de désagrégation, que les variations affectant la moyenne des précipitations et des températures sans intégrer leur variabilité temporelle (longueur des périodes sèches et humides, écart-type des températures journalières) au niveau du générateur stochastique (Fig. 14). Il aurait fallu pour cela comparer les paramètres statistiques des séries quotidiennes de précipitations et de températures issues de l'intégration HadCM3 SRES1 au point de grille 50°N-7.5°E à ceux dérivés des séries quotidiennes de précipitations et de températures issues des intégrations HadCM3 A2a et B2a. Deux éléments nous en ont dissuadé: d'une part l'incertitude très grande pesant sur l'estimation de la fréquence des jours pluvieux dans les séries de données issues des MCG, souvent surestimée comme nous l'évoquions précédemment; et, d'autre part, l'étape d'extraction des données quotidiennes trop longue dans le temps imparti. Nous avons donc considéré que la variabilité actuelle des séries journalières de précipitation et de température se conservait à l'horizon 2050.

2.4.2. Bassins versants expérimentaux

Deux tributaires de l'Alzette ont été sélectionnés pour cette étude d'impact climato-hydrologique prospective. Il s'agit de l'Eisch à Hagen et de la Wark à Ettelbruck (Fig. 15). Ces deux cours d'eau drainent un bassin versant de respectivement 47.2 km² et 82.2 km². L'occupation des sols est dominée par les surfaces agricoles et prairiales sur le bassin versant de l'Eisch à Hagen (75 % environ) tandis que la couverture forestière représente plus de 40 % sur le bassin de la Wark à Ettelbruck. Le point commun de ces deux bassins versants réside dans la part très faible des surfaces urbanisées

qui n'excèdent pas 10 %. Ils ont également pour avantage de représenter deux types de réponse hydrologique distincts, l'un de facture marneuse plus impulsif à haut rendement hydrologique en période de crues, l'Eisch à Hagen, l'autre de facture grés-schisteuse moins réactif et productif, la Wark à Ettelbruck. De plus, la taille de ces deux unités hydrographiques est suffisamment modeste pour qu'un poste pluviométrique unique suffise à estimer avec une précision acceptable la lame d'eau précipitée. Rappelons en effet, que le générateur LARS-WG est mono-site, et donc incapable de prendre en compte la corrélation

spatiale entre postes pluviométriques dans la génération des pluies. Par ailleurs, compte tenu des conclusions concernant l'aptitude du modèle MHR à reproduire les hydrogrammes observés au cours des années récentes (Drogue *et al.* 2002) et à rendre compte d'un changement climatique sur les chroniques de débit (Drogue 2003), il convenait de privilégier des cours d'eau garantissant un niveau d'efficacité maximale pour le modèle pluie-débit MHR. Sur les six ans de chroniques de débit journaliers disponibles, la version journalière du modèle MHR a été calée sur les quatre premières années de mesure (1997-2000), la période restante

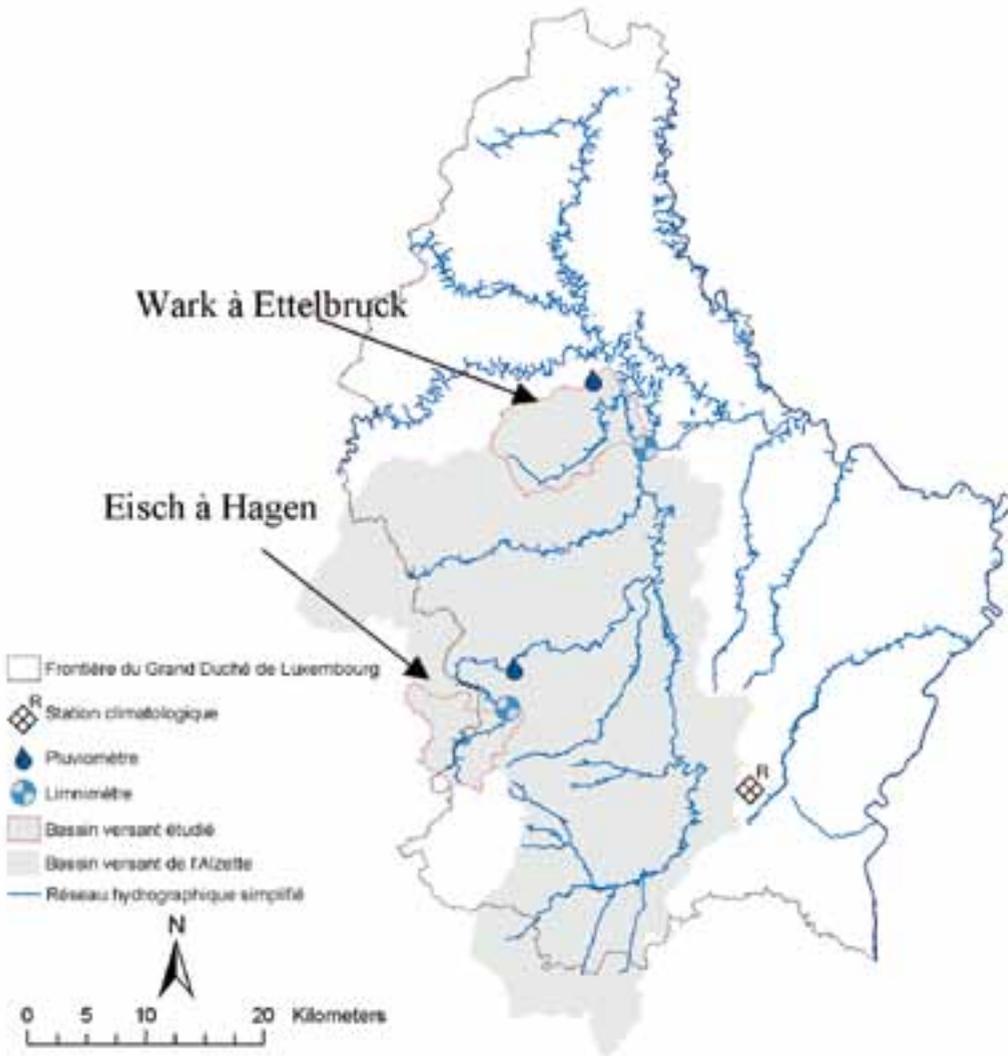


Fig. 15. Localisation des bassins versants et de l'équipement hydro-climatologique. Station climatologique: Findel-aéroport

étant conservée pour le contrôle du modèle, de janvier 2001 à juin 2002 pour l'Eisch à Hagen, et de janvier 2001 à juillet 2002, soit environ un an et demi, pour la Wark à Ettelbruck. Notons dans ce dernier cas, que le modèle hydrologique a été paramétré sans prise en compte de l'influence du barrage de rétention de Welscheid, activé pour la première fois lors de la crue de janvier 2001. Par conséquent, les projections faites sur le régime de crue de la Wark à Ettelbruck ne prennent pas en compte un éventuel écrêtement des débits de pointe des événements de crue se produisant sous des conditions climatiques futures.

Les séries de températures minimales et maximales servant au calcul des séries d'ETP selon la formule de Hamon (Hamon 1961) et à la paramétrisation du générateur de climat ont été enregistrées à la station climatologique de Findel-aéroport (Fig. 15). Une série d'ETP unique a donc été utilisée pour les deux bassins versants retenus. Les séries pluviométriques journalières enregistrées au pluviomètre historique le plus proche de chacun d'eux, ont permis de paramétrer la composante pluviométrique du générateur LARS-WG sur la normale 1961-1990. Il s'agit des postes pluviométriques de Koerich pour l'Eisch à Hagen et de Kehmen pour la Wark à Ettelbruck. La procédure de couplage entre le générateur stochastique et le modèle pluie-débit MHR est décrite sur la Fig. 14, notamment en ce qui concerne la longueur des séries climatiques.

3. Résultats et discussion

3.1. Calage et contrôle du modèle pluie-débit

Les critères de performance présentés dans le Tab. 1 ont été déterminés sur chacune des sous-périodes (Tab. 2). Les lames d'eau écoulées observées et simulées ont également été comparées (Fig. 16) ainsi que les débits de pointe sélectionnés au-delà du seuil de quatre fois la valeur du débit moyen interannuel de chaque sous-période de mesure.

Les résultats montrent que le modèle MHR est apte à simuler la répartition saisonnière et l'amplitude des débits moyens mensuels des deux bassins-versants (Fig. 16), que l'hydrogramme observé est reconstitué convenablement par le modèle pluie-débit aussi bien en période de crues que d'étiage (Tab. 2), et que la statistique des débits de pointe est quantifiée avec une précision acceptable voire très honorable pour la Wark (Fig. 17 a et 17 b). Les niveaux de performance du modèle sont comparables en calage et contrôle, la période correspondant à cette dernière phase

étant néanmoins plus courte que la première. Fort de ces observations, le modèle pluie-débit a été calé sur l'ensemble de la période de mesure disponible pour obtenir un jeu de paramètres le plus représentatif possible du comportement hydrologique présent des deux cours d'eau sélectionnés.

3.2. Corrélation entre séries climatiques locales et simulées au point de grille

En mettant en vis-à-vis les cumuls de précipitation (Fig. 18 a) et les températures observées et simulées (Fig. 18 b) par le MCG HadCM3 au point de grille le plus proche de notre zone d'étude (50°N-7.5°E), il apparaît clairement que le modèle climatique rend compte avec parcimonie des valeurs mensuelles mesurées pour chacune des variables climatiques sur la normale 1961-1990. Du reste, l'éclatement du nuage de points pour les précipitations mensuelles, traduit une variabilité que l'on pourrait très bien retrouver au sein du pavé couvrant la zone d'étude, entre le poste pluviométrique de Koerich et un poste qui serait implanté par exemple à l'est de Coblenz. Il convient de rappeler qu'un modèle climatique est destiné à générer des conditions météorologiques à long terme qui, une fois analysées, généreront des séries statistiques s'approchant du climat planétaire réel (Bourque 1999). Un modèle climatique fournit donc une réalisation possible du système climatique au-dessus d'une région donnée et n'est pas un outil de prévision météorologique au sens strict.

Si l'on considère le cycle saisonnier mesuré et estimé des deux variables climatiques sur la normale 1961-1990 (Fig. 19 a et 19 b), deux tendances nettes se dégagent:

- Les précipitations estivales sont surestimées par le MCG, alors qu'en période hivernale, les hauteurs pluviométriques moyennes mensuelles sont reproduites avec plus de réalisme.
- La saisonnalité des températures est restituée avec exactitude, les plus forts écarts entre estimé et observé qui atteignent parfois 2-3°C, étant à l'actif de la période s'étendant de novembre à février (Fig. 19 b). Le restant de l'année en revanche, le MCG estime très convenablement la température moyenne mensuelle. L'établissement d'une fonction de désagrégation spatiale ne s'avère donc pas indispensable, en première approximation, pour les mois concernés.

Tab. 1. Critères de performance appliqués aux séries hydrologiques modélisées. Le niveau de performance du modèle est d'autant plus élevé que (C1 est proche de 0, C2 de 1, C3 de 1 et C4 de 1)

Caractéristique hydrologique	Formule	Auteur
Bilan hydrologique	$C1 = \frac{\sum_i Q_{sim_i}}{\sum_i Q_{obs_i}} - 1$	
Débits journaliers	$C2 = 1 - \frac{\sum_i (Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_i (Q_{obs_i} - \overline{Q_{obs}})^2}$	Nash-Sutcliffe (1970)
Basses eaux	$C3 = 1 - \frac{\sum_i (\ln(Q_{sim_i} + \varepsilon) - \ln(Q_{obs_i} + \varepsilon))^2}{\sum_i (\ln(Q_{obs_i} + \varepsilon) - \ln(\overline{Q_{obs}} + \varepsilon))^2}$	Ferrin (2000)
Hautes eaux	$C4 = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs_i} + \overline{Q_{obs}})(Q_{sim_i} - Q_{obs_i})^2}{\sum_i (Q_{obs_i} + \overline{Q_{obs}})(\overline{Q_{obs}} - Q_{obs_i})^2}$	

3.3. Corrélation entre séries climatiques locales et indices atmosphériques

La saisonnalité des indices atmosphériques déterminée à partir de la pression atmosphérique estimée au niveau de la mer (Fig. 20 a), montre une opposition des saisons extrêmes, l'hiver se caractérisant par une force de flux synoptique plus importante que l'été, où les gradients de pression sont moins vigoureux aussi bien dans la direction zonale que méridienne. On peut expliquer cette distribution par l'occurrence plus fréquente de situations anticycloniques ou de marais barométriques durant cette saison. En outre, le cycle saisonnier de W et S montre que l'écoulement de l'air s'effectue majoritairement d'ouest en est en hiver et du sud au nord dans les basses couches, ce que vérifient la trajectographie et la fréquence des directions empreintées par les masses d'air en hiver sur l'Europe nord-occidentale (Paul 1992). D'après les simulations de HadCM3 SRES 1, la vorticité de surface, fréquemment négative, indiquant donc la prédominance de situations à

courbure anticyclonique, atteint un optimum au printemps, marqué par des conditions plus cycloniques, ce qui se vérifie en partie dans la statistique des situations synoptiques de Paul (1992) pour le Nord-Est français sur la période 1981-1990. En altitude (Fig. 20 b), la vigueur du cycle saisonnier est moins prononcée, les gradients d'altitude du champ de géopotential 500 mb et donc les vitesses d'écoulement étant plus grandes dans la direction W-E que S-N. Le tracé saisonnier de la vorticité totale à 500 hPa indique des conditions généralement plus anticycloniques qu'en surface, surtout en hiver. Brandsma & Buishand (1997) obtiennent pour la région rhénane, en exploitant les données atmosphériques issues des réanalyses du NCEP sur la période 1961-1990, une distribution saisonnière similaire de l'indice de vorticité de surface Z, avec des valeurs majoritairement négatives, ainsi que de la force des composantes zonale et méridienne de surface.

Au total, même s'il demeure possible que l'intégration HadCM3 SRES1 tende à générer des valeurs de vorticité trop souvent négatives à l'instar du modèle climatique HadCM2 (Wilby

Tab. 2. Valeurs des critères de performance en calage et contrôle pour la période de mesure 1997-2002. C: calage - V: vérification

Cours d'eau	Exutoire	Précip. mm	ETP mm	C1		C2		C3		C4	
				C	V	C	V	C	V	C	V
Eisch	Hagen	1091	623	-0.11	-0.06	0.83	0.88	0.70	0.70	0.87	0.91
Wark	Ettelbruck	1024	623	0.03	0.09	0.88	0.94	0.80	0.87	0.92	0.97

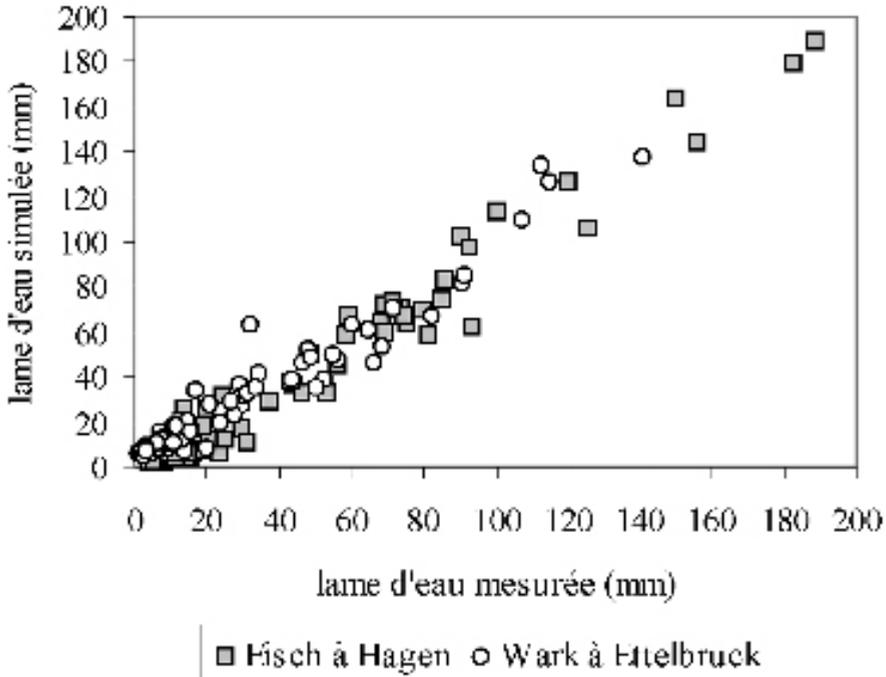


Fig. 16. Débit moyen mensuel observé et simulé sur la période de mesure 1997-2002.

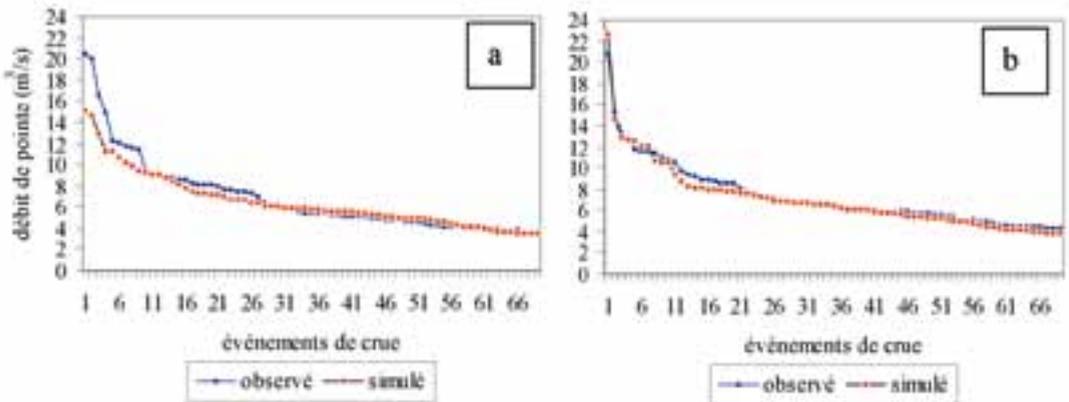


Fig. 17. Débits de pointe observés et simulés sur la période de mesure 1997-2002.
a) Eisch à Hagen, b) Wark à Ettelbruck.

et al. 1998), conférant un caractère trop anticyclonique au climat de la normale 1961-1990, il semble bien qu'il soit capable de fournir une image fidèle de la circulation atmosphérique aux latitudes tempérées occidentales. L'analyse des coefficients de corrélation partiels entre indices atmosphériques et variables climatiques enregistrées localement, a permis d'établir des fonctions de transfert pour certains mois de l'année sur la

normale 1961-1990, d'ailleurs plus nombreux pour la température de l'air que pour la pluviosité, dont la variabilité interannuelle demeure très forte en particulier en hiver. Les pourcentages de variance expliquée, généralement faibles, s'échelonnent entre 31 et 59 % pour les cumuls de précipitation mensuels, et entre 31 et 77 % pour les températures mensuelles (Tab. 3). Les prédictors sont variables selon le mois considéré. Les indices

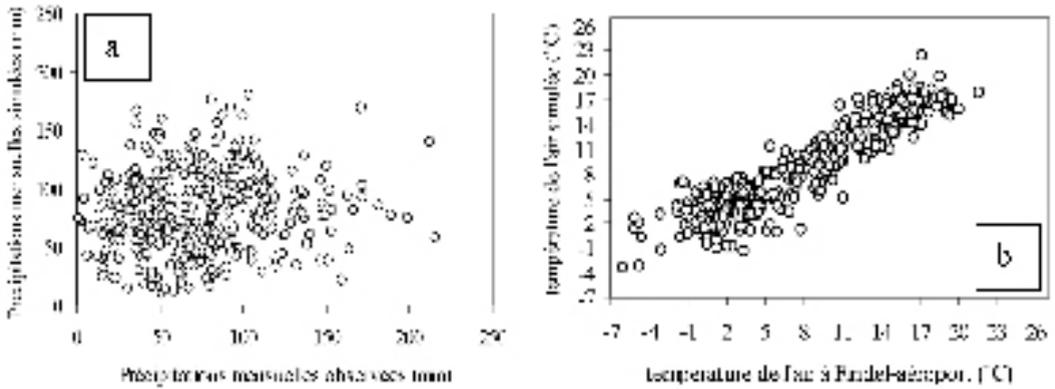


Fig. 18. Comparaison entre les hauteurs de précipitation (a) et les températures moyennes mensuelles (b) mesurées et simulées par l'intégration HadCM3SRES1 pour le pavé 50°N-7.5°E. Période 1961-1990.

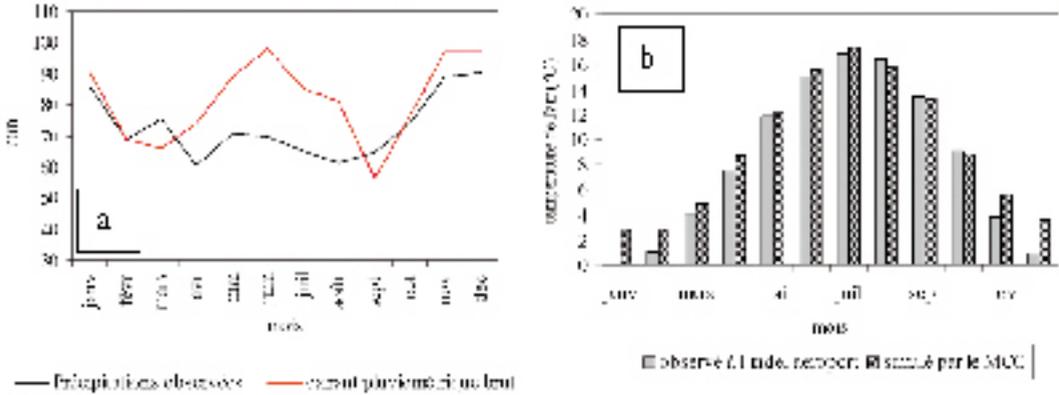


Fig. 19. Comparaison des régimes pluviométrique (a) et thermique (b) simulés par l'intégration du MCG HadCM3 (scénarios SRES1) au point de grille 50°N-7.5°E et mesurés *in situ* (Findel-aéroport). Période 1961-1990.

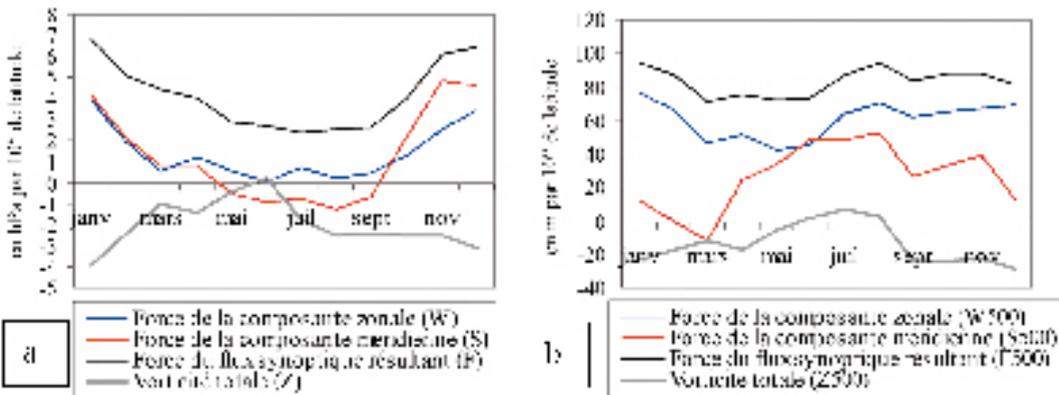


Fig. 20. Cycle saisonnier des indices atmosphériques sur la période 1961-1990. (a) Au niveau de la mer; (b) Au niveau 500 hPa. Etabli sur la base de l'intégration HadCM3 SRES1.

Tab. 3. Fonctions de transfert établies sur la normale 1961-1990 et appliquées à la désagrégation d'échelle des précipitations et des températures moyennes mensuelles.

	Postes pluviométriques de Koerich et Kehmen			Poste thermométrique de Findel-aéroport		
		r	ETE		r	ETE
Janvier	85.440 + 0.452 F500	0.31	44.3	-0.018 - 0.295 S + 0.068 W500	0.72	1.9
Février	extrant brut	-	-	1.065 - 0.165 PA	0.33	2.5
Mars	75.312 + 9.025 TMCG	0.38	36.0	4.047 - 0.032 S500	0.44	1.8
Avril	extrant brut	-	-	7.527 - 0.013 PMCG	0.31	1.4
Mai	extrant brut	-	-	11.816 + 0.507 W + 0.195 PA	0.77	1.1
Juin	69.930-5.290 F + 6.954 Z	0.536	27.5	extrant brut	-	-
Juillet	65.204 + 10.626 S	0.35	30.9	extrant brut	-	-
Août	61.363 + 0.564 W500 + 0.262 Z500	0.59	21.9	extrant brut	-	-
Septembre	extrant brut	-	-	extrant brut	-	-
Octobre	extrant brut	-	-	9.069 + 0.202 F	0.32	1.4
Novembre	extrant brut	-	-	3.83 + 0.011 S500 - 0.012 Z500	0.52	1.2
Décembre	90.294 + 5.302 Z	0.375	52.5	extrant brut	-	-

ETE: erreur-type d'estimation

Extrant brut: exploitation des sorties du MCG sans désagrégation. TMCG: température mensuelle simulée à 1.5 m au point de grille 50° N-7.5E, PMCG: précipitation mensuelle simulée au point de grille 50° N-7.5E, S500: force de la composante méridienne du flux synoptique au niveau 500 hPa, Z: vorticité totale de surface, Z500: vorticité totale à 500 hPa, PA: pression atmosphérique réduite au niveau de la mer au point de grille 50° N-7.5E, F500: force du flux résultant au niveau 500 hPa, W500: force de la composante zonale du flux synoptique au niveau 500 hPa.

atmosphériques déterminés à partir du champ de géopotential 500 hPa ressortent majoritairement dans l'explication de la variance de la température et des précipitations mensuelles observées en surface. L'interprétation des équations de régression obtenues est esquissée ici mais supposerait de mener des investigations plus détaillées sur les relations entre situations synoptiques et variables climatiques de surface. Le signe de la relation statistique entre pr dictants et prédicteurs est conforme dans la plupart des cas à ce que l'on pouvait attendre intuitivement (Tab. 3). Ainsi, une circulation d'altitude plus rapide que la normale favorise une pluviosité plus abondante en janvier, tandis que c'est plutôt une différence positive à la normale, donc une cyclonicit  plus importante qui accompagne les mois humides en décembre. Au mois d'août, une force du vent géostrophique d'ouest en altitude et une cyclonicit  plus grandes que la normale sur la colonne troposphérique, favorisent l'occurrence de mois plus pluvieux que la normale. Cette observation pourrait rejoindre en partie la relation qu'indique Pagney (1994) entre précipitations et influence maritime dans l'est de la France.

L'équation trouvée pour les températures mensuelles du mois de janvier peut s'interpréter comme l'occurrence d'un temps plus doux que la normale à la faveur d'un flux méridien moins vigoureux dans les basses couches et d'une circulation zonale d'ouest en altitude plus vigoureuse

que la normale. En mai, l'influence o anique se retrouve avec le prédicteur W, positivement corrélé à la température de l'air, le second facteur PA soulignant le fait que des conditions plus anticycloniques que la normale s'accompagnent en général d'un temps plus ensoleillé à cette saison. Enfin, notons que l'épaisseur atmosphérique et l'humidité spécifique de surface à l'échelle du pavé au point de grille 50°N-7.5°E n'interviennent dans aucune équation de régression. Tout en suivant un cycle saisonnier corrélatif à celui de la température de l'air, ces prédicteurs ne suffisent pas cependant à rendre compte de la variabilité interannuelle des températures mensuelles de surface. Il est probable que la prise en compte de l'humidité spécifique au niveau de géopotential 850 hPa ou 700 hPa correspondant davantage aux niveaux de condensation à la base des nuages, aurait donné de meilleurs résultats pour le pronostic des précipitations mensuelles.

3.3.1. Validation de la procédure de désagrégation régionale

L'application des équations de régression multiples aux précipitations et températures mensuelles, permet de corriger pro-parte leur cycle saisonnier (Fig. 21 a et 21 b), particulièrement au cœur de l'été pour les totaux pluviométriques où l'incertitude est maximale. L'absence de fonctions de transfert pour certains mois de l'année oblige à recourir

à l'extrait brut du MCG, ce qui maintient un niveau d'incertitude non négligeable sur les taux de variation inférés pour chacun des scénarios d'émission à l'horizon 2041-2070.

Si les fonctions de désagrégation mettent mieux en adéquation les régimes simulés et observés sur la période 1961-1990, retenue pour le calage des équations de régression, il convient de démontrer leur validité dans une optique de changement climatique, c'est-à-dire en testant leur aptitude à reproduire une augmentation ou une diminution en moyenne des régimes pluviométrique et thermique locaux. Pour cela, nous avons déterminé dans un premier temps les écarts entre températures et précipitations moyennes mensuelles mesurées localement sur la décennie 1991-2000, par rapport aux normales mensuelles de la période 1961-1990. Ce sont en particulier les mois de décembre (à la faveur des mois de décembre 1993 et 1998) et de janvier qui ont connu un regain de pluviosité et un réchauffement importants (Tab. 4).

Les écarts ou taux de variation entre les sorties brutes et désagrégées sur la décennie 1991-2000 et la normale climatique 1961-1990 ont ensuite été

déterminés pour les deux scénarios d'émission A2a et B2a (Fig. 22 a-d). Seuls les mois où des fonctions de transfert ont été calées sont présentés. D'une manière générale, le gain de précision apporté par la procédure de désagrégation est faible, ce qui n'est pas très étonnant compte tenu des équations de régression majoritairement « molles » (part importante de variance non expliquée) qui ont été trouvées. La prise en compte des indices atmosphériques se traduit néanmoins par certaines améliorations des sorties du MCG. Pour la température de l'air (Fig. 22 a-c), le changement de température est mieux restitué aux mois de mai et d'octobre pour le scénario d'émission A2a, ce qui est important en termes d'ETP, alors qu'en hiver, les écarts sont sous-estimés systématiquement à l'instar du scénario d'émission B2a, pour lequel, les sorties brutes du MCG indiquent un réchauffement hivernal exagéré (Fig. 22 c).

Malgré un niveau de variance expliqué satisfaisant pour la fonction de transfert des températures du mois de janvier (Tab. 3), l'écart entre températures désagrégées et mesurées *in situ* suggère un climat nettement plus frais que l'observé (Fig. 22). La fonction de transfert ne

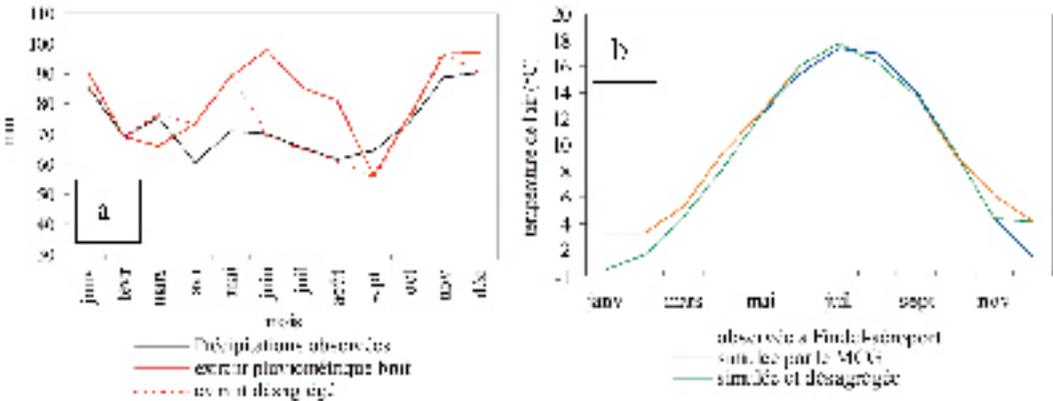


Fig. 21. Régimes pluviométrique (a) et thermique (b) après désagrégation d'échelle sur la normale 1961-1990.

Tab. 4. Ecart et taux de variation à la normale climatique 1961-1990 des températures et des hauteurs pluviométriques mensuelles enregistrées sur la décennie 1991-2000.

°C	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	année
1961-1990	0.2	1.4	4.6	7.9	12.4	15.3	17.3	17.1	13.9	9.5	4.1	1.2	8.7
1991-2000	1.4	2.1	5.8	8.8	13.3	15.8	18.3	18.5	14.1	9.1	4.4	2	9.5
Δ à la normale	1.2	0.7	1.2	0.8	0.9	0.5	1.4	1.4	0.2	-0.4	0.3	0.8	0.7
mm	janv	févr	mars	avr	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	année
1961-1990	83	69	75	61	71	70	65	61	65	74	89	90	873
1991-2000	94	72	60	59	62	69	69	63	84	89	83	129	933
% à la normale	13	5	-20	-3	-13	-1	6	3	30	20	-7	43	7

faisant intervenir que des indices caractérisant la circulation atmosphérique, il est probable que ceux-ci sont insuffisants pour restituer l'amplitude du réchauffement climatique, qui ne relève pas seulement d'un changement de trajectoire de la circulation atmosphérique générale mais aussi d'un réchauffement intrinsèque des masses d'air en mouvement. La sous-estimation du relèvement des températures hivernales peut dans une certaine mesure être tempérée par le fait que l'ETP demeure un terme marginal du bilan hydrologique durant cette saison. Pour les précipitations mensuelles, la correction du profil saisonnier déjà observé précédemment se vérifie aux mois de juin et de juillet (Fig. 22 c-d), mois toujours sur-dotés en pluie par le MCG. Notons également la forte sous-estimation du taux de variation ayant affecté

le mois de décembre. L'allongement de la période de validation, encore impossible pour le moment, devrait permettre de confirmer ces tendances obtenues sur les températures et les précipitations. Ainsi, la méthode de désagrégation appliquée aux valeurs mensuelles de température et de précipitation est encore perfectible. Elle laisse subsister à ce stade de l'analyse une part importante de variabilité temporelle non expliquée, que de nouveaux prédicteurs, déterminés à d'autres niveaux de géopotentiels ou tenant mieux compte des mécanismes aérologiques précurseurs des épisodes de pluie intenses notamment (direction du flux synoptique, instabilité verticale, humidité atmosphérique) pourraient en partie couvrir. L'insuccès relatif de la procédure de désagrégation spatiale souligne aussi le problème de la non univocité de la relation entre les indices caractérisant la circulation atmosphérique et les séries de précipitation ou de température locales.

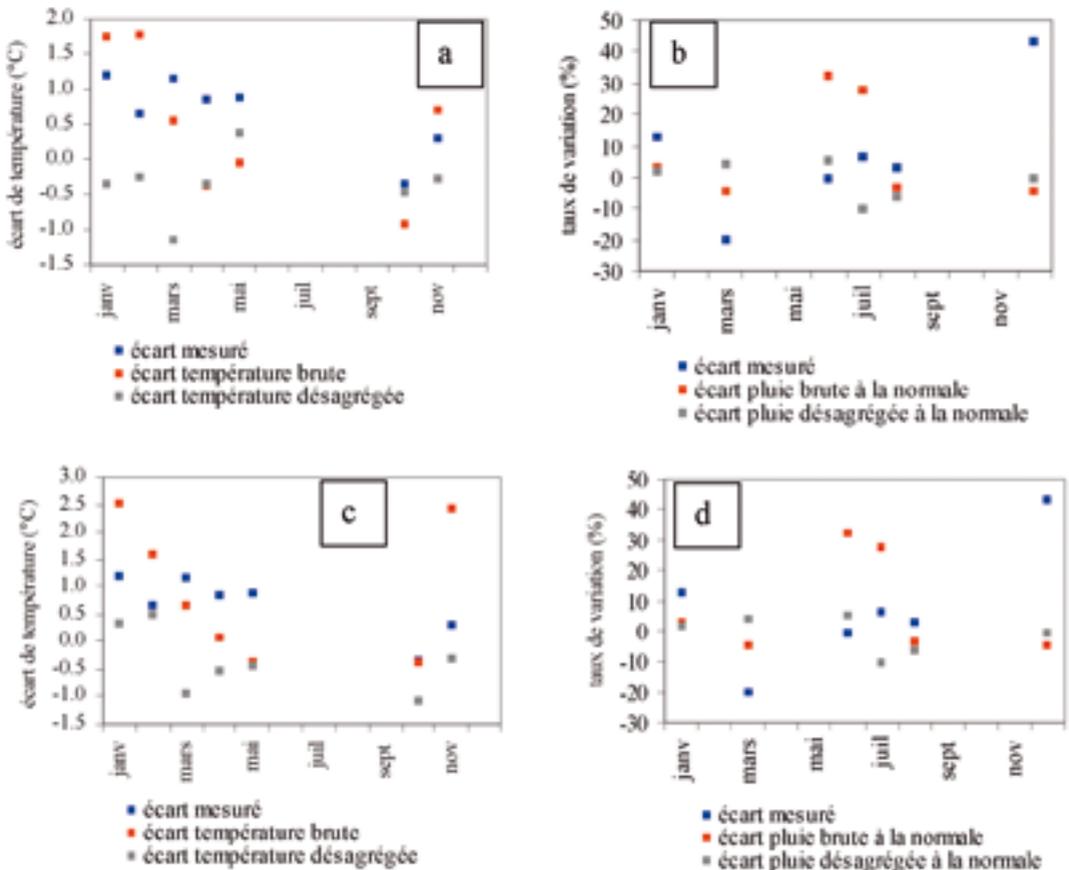


Fig. 22. Comparaison des écarts observés, bruts et désagrégés entre les températures et les précipitations mensuelles de la décennie 1991-1990 et la moyenne interannuelle 1961-1990 pour les scénarios d'émission A2a (a-b) et B2a (c-d).

3.3.2. Scénarios climatiques désagrégés

Entre la normale climatique 1961-1990 et la normale climatique 2041-2070, les deux scénarios d'émission retenus aboutissent après désagrégation spatiale, à des évolutions similaires (Fig. 23 a-d). Les précipitations moyennes mensuelles sont supposées s'élever de janvier à mars dans des proportions somme toute limitées (autour de 5 à 10 %) puis s'abaisser dans une gamme de pourcentages qui oscillent entre -5 et -20 % (Fig. 23 a et 23 b). Le scénario d'émission SRES B2a génère une rémission plus forte des abats pluvieux en période estivale, tandis qu'il pronostique un automne plus arrosé que le scénario SRES A2a. La désagrégation d'échelle tend à minorer les évolutions anticipées par les extrants bruts du modèle HadCM3. La hausse de température prévue en moyenne annuelle par la plupart des MCG, et qui se vérifie pour les deux scénarios d'émission considérés, se distribue variablement selon la saison (Fig. 23 c et 23 d). L'absence de fonctions de transfert pour les mois estivaux (dont on peut s'accommoder) et la

tendance sans doute persistante des fonctions de désagrégation hivernales à sous-estimer l'ampleur du réchauffement climatique, est en partie responsable de ce contraste saisonnier. Pour les mois désagrégés, les écarts thermiques entre la normale 2041-2070 sont minimes, tandis qu'ils peuvent atteindre 2 à 3°C en été.

L'application des taux de variation commentés précédemment, nous a permis d'établir les moyennes mensuelles des totaux pluviométriques des postes de Koerich et Kehmen, de la température de l'air à Findel-aéroport et de l'ETP thermique de Hamon sous les conditions climatiques futures guidées par les deux scénarios d'émission (Tab. 5 et 6).

A l'échelle annuelle, les totaux pluviométriques varient peu, et tendent plutôt à diminuer, le scénario d'émission SRES B2a conduisant au déficit pluviométrique le plus important. La température de l'air moyenne annuelle s'élève de 1°C. Les variations les plus significatives de l'ETP, qui progresse de 10 % en total annuel (Tab. 6), se situent en été, corrélativement aux variations de température, le mois de juillet étant le plus affecté (+ 20 mm).

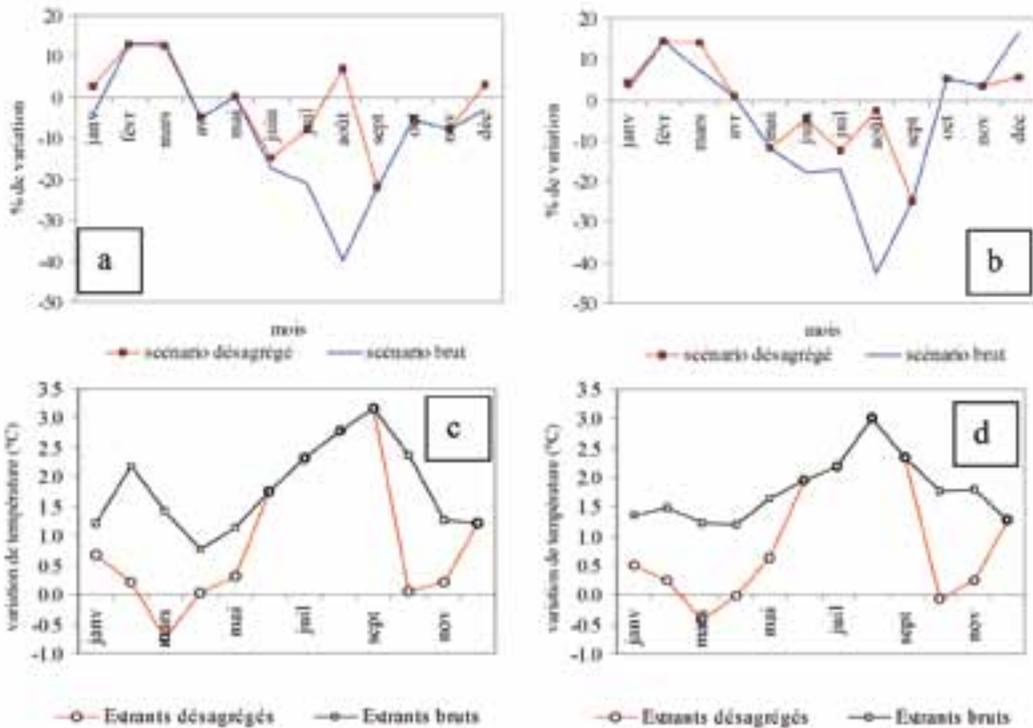


Fig. 23. Amplitude de variation des précipitations et des températures moyennes mensuelles entre la normale 2041-2070 et la normale 1961-1990 selon les scénarios d'émission SRES A2a (a-c) et SRES B2a (b-d).

3.3.3. Impact des scénarios climatiques sur les variables hydrologiques

Comme stipulé sur la Fig. 14, les moyennes mensuelles de précipitation et de température de l'air estimées par le générateur LARS-WG sur la période historique (Tab. 5) ont été modifiées à l'aune des taux de variation mensuels de la Fig. 23 pour générer de nouvelles chroniques millénales de pluie et de température, sans modifier la variabilité temporelle des deux variables climatiques. Les variables hydrologiques indiquées sur la Fig. 14 ont été déterminées pour le climat présent et les conditions climatiques futures, en découpant les séries millénales de débits journaliers simulées à l'aide du modèle MHR aux deux exutoires de bassins versants, en 33 sous-séries de 30 ans. Les résultats relatifs aux quantiles de la courbe des débits classés (CDC) témoignent d'un creusement du contraste saisonnier entre les saisons hydrologiques extrêmes (Tab. 7 a et b). Les pourcentages de variation sont plus accusés sur les quantiles de

hautes eaux du cours d'eau de la Wark à Ettelbruck (Tab. 7 b) que sur l'Eisch à Hagen (Tab. 7 a), tendance qui s'inverse sur les quantiles de basses eaux, traduisant un meilleur soutien d'étiage en été sur ce bassin versant. La pluviosité moins abondante à l'automne telle que le prévoit le scénario A2a se traduit par une quasi stationnarité des quantiles de hautes eaux pour l'Eisch à Hagen et une augmentation de 5 à 7 % pour la Wark, moitié moins élevée que celle induite par le scénario B2a. L'amplitude de variation la plus forte affecte le percentile Q95 conformément au déficit hydrique prononcé qu'annoncent pour cette période de l'année les extrants désagrégés du modèle climatique HadCM3.

Pour s'assurer de la significativité statistique des tendances observées, les 33 valeurs des quantiles de la CDC afférentes à la normale 1961-1990 et à la normale 2041-2070 ont été assujetties au test T de Student des moyennes appariées en supposant une variance différente des deux échantillons de débits. La plupart des taux de variation sont

Tab. 5. Précipitations et températures moyennes mensuelles observées (Obs.), estimées (Est.) par le générateur de climat LARS-WG sur la période 1961-1990 et « perturbées » en fonction des taux de variation induits par les scénarios d'émission SRES A2a et B2a.

	Poste de Koerich				Poste de Kehmen				Findel-aéroport			
	Obs. mm	Est. mm	A2a mm	B2a mm	Obs. mm	Est. mm	A2a mm	B2a mm	Obs. °C	Est. °C	A2a °C	B2a °C
Janvier	85	85	87	88	86	88	91	92	0.1	0.5	0.7	0.5
Février	70	67	75	76	68	66	75	76	1.4	1.4	1.3	1.3
Mars	76	75	84	85	75	73	82	83	4.4	4.2	3.3	3.6
Avril	61	63	60	64	61	63	60	64	7.7	7.8	7.5	7.5
Mai	71	66	67	59	71	74	74	65	11.9	11.7	12.1	12.4
Juin	72	74	63	71	68	68	58	65	15.1	14.9	17.3	17.5
Juillet	64	64	59	56	66	69	63	60	17.0	17.0	19.6	19.4
Août	60	62	66	60	63	63	67	61	16.8	16.5	18.6	18.8
Septembre	64	63	49	47	65	64	50	48	13.8	13.9	16.4	15.6
Octobre	76	81	76	85	71	76	72	80	9.4	9.2	9.1	9.0
Novembre	89	85	78	87	89	87	80	90	3.9	4.3	4.0	4.0
Décembre	94	100	103	105	87	97	100	103	1.0	1.2	4.8	4.9
Année	881	883	867	884	869	888	872	886	8.5	8.5	9.6	9.5

Tab. 6. Evapotranspirations potentielles (en mm) moyennes mensuelles « observées », estimées par le générateur de climat sur la période 1961-1990 et « perturbées » en fonction des taux de variation de température induits par les scénarios d'émission SRES A2a et B2a.

ETP	Période	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Observée	1961-1990	11	15	27	43	73	96	106	87	54	31	15	10	565
Estimée	1961-1991	11	15	26	43	72	95	106	85	54	30	15	10	562
A2a	2041-2070	11	15	25	43	74	109	123	97	63	30	15	13	618
B2a	2041-2070	11	15	26	43	75	111	122	98	60	30	15	13	618

significatifs au seuil de 5 %. Un équivalent en nombre de jours égalés ou dépassés, est fourni pour chacun des quantiles remarquables dans les Tab. 8 a et b pour les deux normales climatiques étudiées. La différence en nombre de jours a été déterminée en pointant les valeurs moyennes de quantiles de la CDC obtenues pour la normale actuelle, sur la CDC moyenne déduite des simulations de débit faites pour chacun des scénarios d'émission. Les débits maxima annuels à période de retour donnée, subissent une légère translation en magnitude, inférieure à 10 % pour le bassin versant de l'Eisch à Hagen pour les deux scénarios d'émission, et atteignant 12 à 13 % pour le bassin versant de la Wark à Ettelbruck sous les conditions climatiques les plus défavorables générées par le scénario d'émission B2a (Tab. 9 a et b). L'écart entre les deux bassins versants, à période de retour équivalente, est de l'ordre de 2 à 3 %. Le taux d'accroissement est légèrement plus important vers les débits de fréquence rare. Les taux de variation obtenus sur les différents débits caractéristiques sont tous significatifs au sens du test T de Student.

L'augmentation de la magnitude des débits maxima annuels interroge sur l'évolution de leur période de retour. Celle-ci a été recalculée sous les conditions climatiques futures pour les valeurs de débit correspondant au climat actuel en estimant la variable réduite de Gumbel associée à ces derniers à travers l'équation de régression Q-u ajustée sur les valeurs de débit des scénarios A2a et B2a. La période de retour des débits maxima

annuels a ensuite été déterminée en prenant la double exponentielle de la variable réduite de Gumbel donnant la valeur de la fréquence de non dépassement.

L'examen des nouvelles périodes de retour des débits maxima caractéristiques actuels (Tab. 10 a et b), permet de conclure à un glissement important en fréquence, le débit cinquantennal devenant trentennal par exemple. La réduction de la période de retour est plus prononcée sur le bassin-versant de la Wark à Ettelbruck (Tab. 10 b) et sous les conditions climatiques dictées par le scénario d'émission B2a. L'impact des scénarios climatiques sur le régime hydrologique des deux cours d'eau se manifeste par une augmentation moyenne des lames d'eau écoulées de 10 à 15 % au cours du second semestre hivernal et un glissement des mois les plus abondants, et donc probablement du débit maximum annuel, vers la fin de l'hiver, le mois le plus affecté par les variations climatiques anticipées étant le mois de mars. L'évolution la plus marquante concerne les rendements hydrologiques estivaux qui diminuent dans des proportions drastiques, cette diminution s'amorçant dès le mois de mai pour les deux bassins versants pour atteindre une échéance variable selon le scénario d'émission. L'amplitude absolue des taux de variation est plus prononcée sur l'Eisch à Hagen que sur la Wark à Ettelbruck, en particulier en période estivale, la récession de ce dernier étant moins rapide à la faveur d'une valeur optimale du paramètre B du modèle MHR plus forte (129.2 mm contre 62.3 mm pour l'Eisch

Tab. 7. Moyennes, écart-types et taux de variation des quantiles simulés de la courbe des débits classés pour la normale climatique 1961-1990 et les scénarios climatiques SRES A2a et B2a à l'horizon 2041-2070. a) Eisch à Hagen, b) Wark à Ettelbruck.

a)	1961-1990 (m ³ /s)	A2a (m ³ /s)	% de variation	B2a (m ³ /s)	% de variation
Q1	4.7 ± 0.73	4.8 ± 0.80	+ 2	5.0 ± 0.72	+ 7*
Q5	2.26 ± 0.24	2.28 ± 0.20	+ 1	2.37 ± 0.25	+ 4*
Q50	0.16 ± 0.03	0.14 ± 0.03	- 12*	0.14 ± 0.02	- 13*
Q95	0.03 ± 0.008	0.02 ± 0.010	- 22*	0.02 ± 0.006	- 28*
Qmoy.	0.52 ± 0.06	0.51 ± 0.07	- 4*	0.52 ± 0.05	- 1

b)	1961-1990 (m ³ /s)	A2a (m ³ /s)	% de variation	B2a (m ³ /s)	% de variation
Q1	4.7 ± 0.73	4.8 ± 0.80	+ 2	5.0 ± 0.72	+ 7*
Q5	2.26 ± 0.24	2.28 ± 0.20	+ 1	2.37 ± 0.25	+ 4*
Q50	0.16 ± 0.03	0.14 ± 0.03	- 12*	0.14 ± 0.02	- 13*
Q95	0.03 ± 0.008	0.02 ± 0.010	- 22*	0.02 ± 0.006	- 28*
Qmoy.	0.52 ± 0.06	0.51 ± 0.07	- 4*	0.52 ± 0.05	- 1

* Taux de variation significatif au seuil de 5 %

Tab. 8. Evolution du nombre de jours pour lequel un niveau de débit est égalé ou dépassé entre la normale climatique 1961-1990 et les scénarios climatiques SRES A2a et B2a à l'horizon 2041-2070. a) Eisch à Hagen, b) Wark à Ettelbruck.

a)	1961-1990 (jours par an)	A2a (jours par an)	Différence (en jours par an)	B2a (jours par an)	Différence (en jours par an)
Q1	3.7	3.9	-	4.3	+1
Q5	18.3	18.4	-	19.7	+1
Q50	182.5	168.1	-14	167.2	-15
Q95	346.8	333.5	-13	328.9	-18
Qmoy.	93.2	87.5	-6	83.8	-4

b)	1961-1990 (jours par an)	A2a (jours par an)	Différence (en jours par an)	B2a (jours par an)	Différence (en jours par an)
Q1	3.7	4.5	+1	5	+2
Q5	18.3	20.1	+2	23	+4
Q50	182.5	170.9	-12	175	-7
Q95	346.8	331.9	-15	332	-15
Qmoy.	93.8	94.1	-	94.4	+1

Tab. 9. Moyennes, écart-types, taux de variation et nouvelles périodes de retour des débits maxima annuels simulés pour la normale climatique 1961-1990 et les scénarios climatiques SRES A2a et B2a à l'horizon 2041-2070. a) Eisch à Hagen, b) Wark à Ettelbruck.

a)	1961-1990 (m ³ /s)	A2a (m ³ /s)	% de variation	Nouvelles PT (en années)	B2a (m ³ /s)	Nouvelles PT (en années)	% de variation
Q2.33	7.8 ± 1.6	8.1 ± 1.7	+4*	2.1	8.3 ± 1.5	1.9	+8*
Q5	9.6 ± 2.0	10.0 ± 2.3	+5*	4.1	10.3 ± 2.0	3.6	+8*
Q10	11.0 ± 2.4	11.6 ± 2.8	+6*	7.6	11.9 ± 2.5	6.6	+8*
Q20	12.4 ± 2.9	13.1 ± 3.4	+6*	14.1	13.5 ± 3.0	12.3	+9*
Q30	13.2 ± 3.1	14.0 ± 3.7	+6*	20.4	14.3 ± 3.3	17.6	+9*

b)	1961-1990 (m ³ /s)	A2a (m ³ /s)	% de variation	Nouvelles PT (en années)	B2a (m ³ /s)	Nouvelles PT (en années)	% de variation
Q2.33	8.2 ± 1.8	8.7 ± 2.1	+6*	2.0	9.1 ± 2.2	1.8	+11*
Q5	10.6 ± 2.6	11.3 ± 3.2	+7*	3.9	11.8 ± 3.2	3.4	+12*
Q10	12.5 ± 3.5	13.4 ± 4.2	+8*	7.3	13.9 ± 4.2	6.2	+12*
Q20	14.3 ± 4.4	15.4 ± 5.3	+8*	13.5	16.0 ± 5.3	11.2	+12*
Q30	15.3 ± 4.9	16.5 ± 5.9	+8*	19.4	17.1 ± 5.9	16.0	+12*

* Taux de variation significatif au seuil de 5 %; PT: période de retour

à Hagen). La variabilité interannuelle du débit moyen mensuel reste notable en toute saison. A l'échelle annuelle, les variations non significatives du débit moyen des cours d'eau indiquent une

stationnarité de ce dernier par rapport à la situation actuelle, avec une abondance de 340 à 350 mm pour l'Eisch à Hagen, et de 275 à 295 mm pour la Wark à Ettelbruck.

Tab. 10. Moyennes, écart-types et taux de variation des débits moyens mensuels simulés pour la normale climatique 1961-1990 et les scénarios climatiques SRES A2a et B2a à l'horizon 2041-2070. a) Eisch à Hagen, b) Wark à Ettelbruck.

a)	1961-1990 (mm)	A2a (mm)	% de variation	B2a (mm)	% de variation
Janvier	58 ± 29	59 ± 30	+ 3	61 ± 30	+ 5*
Février	46 ± 29	53 ± 32	+ 15*	54 ± 33	+ 17*
Mars	47 ± 26	54 ± 31	+ 17*	56 ± 32	+ 21*
Avril	29 ± 18	27 ± 19	- 4	29 ± 20	+ 2
Mai	18 ± 14	18 ± 14	- 3	15 ± 11	- 19*
Juin	13 ± 12	9 ± 8.0	- 30*	9 ± 9	- 28*
Juillet	8 ± 8	5 ± 6	- 33*	5 ± 5	- 40*
Août	6 ± 7	5 ± 6	- 20*	4 ± 4	- 36*
Septembre	8 ± 12	4 ± 4	- 47*	3 ± 3	- 58*
Octobre	21 ± 25	14 ± 17	- 34*	16 ± 20	- 25*
Novembre	39 ± 30	30 ± 25	- 23*	36 ± 29	- 7*
Décembre	62 ± 33	61 ± 35	- 2	64 ± 36	+ 3
Année	353	340	- 4	351	- 0.5

b)	1961-1990 (mm)	A2a (mm)	% de variation	B2a (mm)	% de variation
Janvier	50 ± 28	51 ± 28	+ 1	53 ± 29	+ 5*
Février	42 ± 27	48 ± 31	+ 16*	49 ± 32	+ 19*
Mars	39 ± 23	47 ± 27	+ 21*	48 ± 28	+ 25*
Avril	27 ± 17	27 ± 17	-1	29 ± 19	+ 9*
Mai	19 ± 15	19 ± 15	-2	16 ± 12	- 15*
Juin	11 ± 9	9 ± 6	- 20*	9 ± 7	- 17*
Juillet	7 ± 5	5 ± 3	- 28*	5 ± 3	- 25*
Août	5 ± 4	4 ± 3	- 22*	4 ± 2	- 28*
Septembre	6 ± 6	4 ± 3	- 39*	3 ± 2	- 45*
Octobre	12 ± 12	7 ± 7	- 44*	8 ± 9	- 31*
Novembre	26 ± 23	17 ± 18	- 33*	24 ± 23	- 9*
Décembre	43 ± 27	39 ± 17	- 9*	44 ± 28	+ 2
Année	287	276	- 4	293	+ 2

* Taux de variation significatif au seuil de 5 %

4. Conclusion

À l'horizon 2050, le panel de scénarios climatiques *possibles*, à défaut d'être *garantis*, dont nous avons tenté de quantifier l'impact sur le cycle hydrologique des bassins versants de deux cours d'eau affluents de l'Alzette, tend à accroître les ressources en eau au cours du semestre hivernal et à favoriser un stress hydrique parfois sévère au cœur de l'été et à l'automne, tout en maintenant, en général, un débit moyen interannuel au niveau actuel. Les débits de temps de retour compris actuellement entre 2.33 et 30 ans seront plus fréquents, ce qui suggère une augmentation de

leur magnitude et implique un risque d'inondation accru dans les plaines alluviales. La comparaison des taux de variation des quantiles de la courbe des débits classés issus des simulations pluie-débit contraintes avec deux scénarios climatiques appliqués aux bassins-tests de l'Eisch à Hagen et de la Wark à Ettelbruck montre que la réduction du débit de base (Q95) est importante sous un scénario climatique partiellement désagréé, conditionné par les scénarios d'émission A2a et B2a appliqués au modèle numérique de circulation générale HadCM3. L'évolution prévisible du débit moyen mensuel se traduit par l'apparition de deux hyper-saisons hydrologiques à l'horizon 2050, la dissymétrie du régime opposant le

début et la fin de l'année civile pour les scénarios climatiques désagrégés dérivés des intégrations HadCM3 A2a et B2a. On notera également que le facteur d'impact est non linéaire entre les taux de variation climatiques et les taux de variation des grandeurs hydrologiques. Ainsi, il n'est pas rare de trouver un facteur d'amplification de 2 ou 3 entre le changement pluviométrique annoncé et le changement hydrologique correspondant. Les taux de variation obtenus sur le débit moyen mensuel sont proches de ceux cités dans la littérature, par exemple Gellens & Roulin (1998) pour une région limitrophe du Luxembourg, qui exploitent des extrants de MCG non désagrégés.

Plusieurs axes de recherche mériteraient d'être suivis pour améliorer la méthodologie développée dans cet article:

- La génération des pluies et des températures devrait intégrer directement les sorties de MCG et non une perturbation faite a posteriori des propriétés statistiques (moyenne, écart-type) du générateur de climat. Une prise en compte des changements affectant la variabilité temporelle des précipitations et de la température de l'air est également indispensable.
- La méthodologie et les présupposés sur la fiabilité relative des simulations pluie-débit appliqués aux événements de crue extrêmes, appréhendés à travers le débit maximum annuel, mériteraient d'être revus à l'aune des données hydrologiques disponibles dans les années à venir. L'absence de longues séries de débit ne permet pas au stade actuel des investigations de valider une génération couplée de longues chroniques de pluie et de quantiles de débit de fréquence rare, à l'instar des travaux menés par Arnaud & Lavabre (2002) par exemple.

- Il conviendrait de traiter plus systématiquement la chaîne des incertitudes dans la modélisation de la relation pluie-débit (incertitudes liées à la courbe de tarage, aux paramètres du modèle hydrologique, etc.).
- Outre les modifications affectant la structure pluviométrique et le régime thermique au cours des décennies futures, l'effet des mutations attendues dans l'usage des sols, notamment de la péri-urbanisation et des pratiques culturelles au Luxembourg, mériterait d'être intégré dans les simulations pluie-débit.

Remerciements

MM R. Aberfeld et E. Kirpach du Service Météorologique de l'Aéroport de Luxembourg, R. Kipgen de l'Administration de la Gestion de l'Eau du Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire du Luxembourg, D. Buchel, R. Schoder et C. Wiltgen de l'Administration des Services Techniques de l'Agriculture du Luxembourg, et D. Viner de l'Unité de Recherche Climatique de l'Université East Anglia de Norwich ont assuré la fourniture d'une grande partie des données météorologiques ou hydrométriques exploitées dans le cadre de cette étude. Qu'ils soient vivement remerciés de leur collaboration. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet « CLIMAT » (Changements climatiques et d'occupation des sols au Grand-Duché de Luxembourg: défis pour l'aménagement du territoire en zones inondables) du programme « Vivre demain au Luxembourg » financé par le Fonds National de la Recherche du Luxembourg.

Bibliographie

- Arnaud P. 1997. - Modèle de prédétermination des crues basé sur la simulation: extension de sa zone de validité, paramétrisation horaire par l'information journalière et couplage des deux pas de temps. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, 286 p.
- Arnaud P. & Lavabre J. 2002. - Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation. *Water Resources Research* 38: 11-1-11-11.
- Arnell N. W., Reynard N. S., King R. S., Prudhomme C. & Branson J. 1997. - Effects of climate change on river flows and groundwater recharge: guidelines for resource assessment. Report to UKWIR/Environment Agency, 55 p.
- Bardossy A. & Van Mierlo J. M. C. 2000. - Regional precipitation and temperature scenarios for climate change. *Hydrological Sciences Journal* 45: 559-575.
- Beltrando G. & Chémery L. 1995. - Dictionnaire du Climat. Larousse, Poitiers, 344 p.
- Beniston M. & Tol R. 1998. - Expected climate change impacts in Europe. *Energy and Environment* 9: 365-381.
- Beven K. 2001. - Rainfall-Runoff Modelling. The Primer. John Wiley and Sons Chichester, Londres, 353 p.
- Boorman D. B. & Sefton C. E. M. 1997. - Recognising the uncertainty in the quantification of the effects of climate change on hydrological response. *Climatic Change* 35: 415-434.
- Bourque A. 1999. - Modélisation climatique: pour une utilisation judicieuse des données générées par les modèles. Document d'information de la Division des sciences atmosphériques et enjeux environnementaux. Environnement Canada, Région du Québec, 22 p.
- Brandsma T. & Buishand T. A. 1997. - Rainfall generator for the Rhine basin. Single-site generation of weather variables by nearest-neighbour resampling. KNMI, publication 186-I, De Bilt, 47 p.
- Bronstert A., Niehoff D. & Bürger G. 2002. - Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: present knowledge and modelling capabilities. *Hydrological Processes* 16: 509-529.
- Burlando P. & Rosso R. 2002. - Effects of transient climate change on basin hydrology. 1. Precipitation scenarios for the Arno River Central Italy. *Hydrological Processes* 16: 1151-1175.
- Cassou C. 2004. - Du changement climatique aux régimes de temps: l'oscillation nord-atlantique. *La Météorologie* 45: 21-32.
- Christensen O. & Christensen J. 1998. - Climate simulations with the HIRHAM limited area regional climate model over Scandinavia: 10-19, in: Proceedings of the Second International Conference on Climate and Water. Espoo, Finland.
- Drogue G. 2003. - Apports de l'information historique et des outils de modélisation à l'étude de l'évolution passée et future de la relation pluie-débit et du climat au Grand-Duché de Luxembourg. Thèse de 3^e cycle, Université Louis Pasteur de Strasbourg, 364 p. + annexes.
- Drogue G., Leviandier T., Pfister L., El Idrissi A., Iffly J. F., Guex F., Hingray B., Hoffmann L. & Humbert J. 2002. - The applicability of a parsimonious model for local and regional prediction of runoff. *Hydrological Sciences Journal* 47: 905-920.
- Drogue G., Matgen P., Hoffmann L. & Pfister L. 2004a. - Approche probabiliste de l'évolution future d'un climat à dégradation continentale: 27-30, in Cantat O. & Gires J.-O. (éds), Actes du XVII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie «Climat: mémoire du temps», Caen, 8-10 septembre 2004.
- Drogue G., Pfister L., Leviandier T., El Idrissi A., Iffly J. F., Matgen P., Humbert J. & Hoffmann L. 2004b. - Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin. *Journal of Hydrology* 293: 255-269.
- Edijatno N., Nascimento N. O., Yang X., Maklhouf Z. & Michel C. 1999. - GR3: a daily watershed model with three free parameters. *Hydrological Sciences Journal* 44: 263-277.
- Evans J. & Schreider S. 2002. - Hydrological impacts of climate change on inflows to Perth Australia. *Climatic Change* 55: 361-393.
- Gellens D. & Roulin E. 1998. - Streamflow response of Belgian catchments to IPCC climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 210: 242-258.
- Gordon C., Cooper C., Senior C. A., Banks H., Gregory J. M., Johns T. C., Mitchell J. F. B. & Wood R. A. 2000. - The simulation of SST sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* 16: 147-168.
- Groupeement Intergouvernemental d'Experts sur le Climat (GIÉC) (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) 2001. - Climate change 2001. The scientific basis, in McCarthy J. J., Canziani O. F., Leary N. A., Dokken D. J.

- & White K. S. (eds), Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report (TAR) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 1000 p.
- Guyot G. 1997. - Climatologie de l'Environnement: de la Plante aux Ecosystèmes. Masson, Paris, 505 p.
- Hamon W. R. 1961. - Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Hydraulics Division ASCE* 87: 107-120.
- Hellström C., Chen D., Achberger C. & Räisänen J. 2001. - Comparison of climate change scenarios for Sweden based on statistical and dynamical downscaling of monthly precipitation. *Climate Research* 19: 45-55.
- Kaleris V., Papanastopoulos D. & Lagas G. 2001. - Case study on impact of atmospheric circulation changes on river basin hydrology: uncertainty analysis. *Journal of Hydrology* 245: 137-152.
- Kilsby C. G., Buishand T. A. & Jones P. D. 1997. - Production of precipitation scenarios for impact assessment of climate change in Europe (POPSICLE). Final Report, Water Resource Systems Research Laboratory. University of Newcastle upon Tyne, 113 p.
- Klemes V. 1986. - Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal* 31: 13-24.
- Leviandier T., Lavabre J. & Arnaud P. 2001. - Rainfall contrast enhancing clustering processes and flood analysis. *Journal of Hydrology* 240: 62-79.
- Leviandier T., Mantilla-Morales G. & Zermani A. 1994. - Etude comparative de la résolution spatiale des modèles hydrologiques sur le bassin de la Charente, in Symposium sur les Relations Continent-Zones Côtières, GIP Hydrosystèmes, La Rochelle.
- Lindström G., Johansson B., Persson M., Gardelin M. & Bergström S. 1997. - Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201: 272-288.
- Menzel L. & Bürger G. 2002. - Climate change scenarios and runoff response in the Muddel catchment (Southern Elbe Germany). *Journal of Hydrology* 267: 53-64.
- Michaels P. J., Knappenberger P. C., Frauenfeld O. W. & Davis R. E. 2002. - Revised 21st century temperature projections. *Climate Research* 23: 1-9.
- Middelkoop H., Daamen K., Gellens D., Grabs W., Kwadjik J. C. J., Lang H., Parmet A. H., Schädler B., Schulla J. & Wilke K. 2001. - Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. *Climatic Change* 49: 105-128.
- Nash J. E. & Sutcliffe J. V. 1970. - River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Norby R. J., Wullschlegel S. D. & Gunderson C. A. 1996. - Tree responses to elevated CO₂ and implications for forests: 1-20, in Koch G.W. & Money H.A. (eds), Carbon Dioxide and Terrestrial Ecosystems, Academic press, San Diego.
- Orlanski I. 1975. - A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin of the Meteorological Society* 56: 76-80.
- Pagney P. 1994. - Les Climats de la Terre. Masson, Paris, 163 p.
- Palmer T. N. & Raisanen J. 2002. - Quantifying the risk of extreme seasonal precipitation events in a changing climate. *Nature* 415: 512-514.
- Paul P. 1992. - Classification des situations météorologiques sur le Nord-Est de la France; période 1981-1990. Rapport interne CEREG/ULP, Strasbourg, 21 p.
- Perrin M. 2000. - Vers une amélioration d'un modèle global pluie débit au travers d'une approche comparative. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 530 p.
- Petit M. 2003. - Qu'est-ce que l'Effet de Serre ? Ses Conséquences sur l'Avenir du Climat. Vuibert, Paris, 124 p.
- Pfister L., Drogue G., El Idrissi A., Iffly J.-F., Poirier C. & Hoffmann L. 2004. - Spatial variability of trends in the rainfall-runoff relationship: a mesoscale study in the Mosel basin. *Climatic Change* 66: 67-87.
- Planton S. 2001. - Scénarios de changement climatique et impacts sur l'hydrologie: 127-134, in Colloque d'Hydrotechnique, 169^e session du Comité Scientifique et Technique « Variations climatiques et hydrologie », Publications SHF, Paris, 12-13 décembre.
- Pope V. D., Gallani M. L., Rowntree P. R. & Stratton R. A. 2000. - The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model - HadAM3. *Climate Dynamics* 16: 123-146.
- Prudhomme C., Reynard N. & Crooks S. 2002. - Downscaling of global climate models for flood frequency analysis: where are we now? *Hydrological Processes* 16: 1137-1150.
- Racsko P., Szeidl L. & Semenov M. 1991. - A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27-41.

- Rahmstorf S. 1995. - Bifurcations of the Atlantic thermohaline circulation in response to changes in the hydrological cycle. *Nature* 378: 145-149.
- Refsgaard J. C. & Knudsen J. 1996. - Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research* 32: 2189-2202.
- Reynard N. S., Prudhomme C. & Crooks S. M. 2001. - The flood characteristics of large U.K. rivers: potential effects of changing climate and landuse. *Climatic Change* 48: 343-359.
- Richardson C. W. 1981. - Stochastic simulation of daily precipitation temperature and solar radiation. *Water Resources Research* 17: 182-190.
- Rosenbrock K.H. 1960. - An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal* 3: 175-184.
- Sefton C. E. M. & Boorman D. B. 1997. - A regional investigation of climate change impacts on UK streamflows. *Journal of Hydrology* 195: 26-44.
- Semenov M. A. & Barrow E. M. 1997. - Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35: 397-414.
- Semenov M. A. & Barrow E. M. 2002. - LARS-WG: a stochastic weather generator for use in climate impact studies. User manual version 3.0, 27 p.
- Semenov M. A., Brooks R. J., Barrow E. M. & Richardson C. W. 1998. - Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10: 95-107.
- Wilby R. L., Hassan H. & Hanaki K. 1998. - Statistical downscaling of hydrometeorological variables using general circulation model output. *Journal of Hydrology* 205: 1-9.
- Wilcox B. P., Rawls W. J., Brakensiek D. L. & Wight J. R. 1990. - Predicting runoff from rangeland catchments: a comparison of two models. *Water Resources Research* 26: 2401-2410.
- Young P. C. 2002. - Data-based mechanistic and top-down modelling: 363-374, in Rizzoli A. & Jakeman A. (eds), *Proceedings of the 1st Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society*, Lugano, Switzerland.

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Please check our internet site <http://www.mnhn.lu> for the latest version of these instructions!

Scope

FERRANTIA is a series of monographic works (20-250 pages in final layout) dealing with life and earth sciences, preferably related in some way or other to the Grand-Duchy of Luxembourg.

It publishes original results of botanical, zoological, ecological, geological, mineralogical, paleontological, geophysical and astrophysical research and related fields.

A complete issue of FERRANTIA may be devoted to several papers on a single topic as the responsibility of an invited editor.

Copyright

The submission of a manuscript to FERRANTIA implies that the paper must not have been accepted for publication or be under consideration elsewhere.

Copyright of a published paper, including illustrations, becomes the property of the publisher. Requests to reproduce material from FERRANTIA should be addressed to the editor.

Reviewing

Articles submitted for publication are reviewed by the editorial board and by one or two referees. The final decision on acceptance or rejection of the manuscript is taken by the editorial board. Manuscripts not prepared according to the following instructions to authors will be returned for correction prior to review.

Nomenclature

Papers with a systematic content should strictly follow the International Codes of Nomenclature.

Specimens

We recommend that the authors should deposit at least a part of the type material in the MNHN collections.

Publication dates

FERRANTIA pays special attention to publication dates, which are always specified to the day of publication.

Manuscripts

Manuscripts, without limitation of the number of pages, must conform strictly to the instructions to authors, and should be sent to the Editor:

FERRANTIA

Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg

25, rue Munster

L-2160 Luxembourg

Format

Manuscripts must be submitted as paper copy in triplicate in A4 format, preferably double-spaced, with margins of at least 3 cm and all pages numbered.

If possible, an electronic version of the text may also be sent as unformatted Word document (PC or MAC) (font Times New Roman, 10 pt). Tables (Word, Excel) and figures (300 dpi in the page size of the journal) may also be sent electronically.

Structure

Papers are to be written in simple, correct and concise French, German or English. They should be organized as follows:

- a brief title (should not include the name of new taxa);
- a suggested running head (no more than 50 characters);
- name(s) and first name(s) of author(s), followed by their full address(es) and, if possible, e-mail or fax number;
- abstracts in English, French and German, each 200-800 words long; new taxa names should be included in the abstract; the abstract should be precise and descriptive, in order to be reproduced as such in data bases; avoid vague sentences such as "three new species are described" or "species are compared to species already known"; include precise differential characters;
- text of the article, in the following order: Introduction, Abbreviations used, Material and methods, Results and/or Observations, Discussion, Acknowledgements, References. The arrangement of the parts "Results/Observations" and "Discussion" may be modulated according to the length and subject of the article; very long papers may include a table of contents;
- for systematic descriptions, each description should follow the order: name of taxon with author and date, synonymy, type material, etymology, material examined, distribution, diagnosis and/or description, remarks.
- description of geological features should include type level, type horizon, type locality. This order may be

adapted according to the concerned groups: consult a recent issue of FERRANTIA;

- taxon names must be stated with author (and publication date, separated by a comma, where appropriate) at least once at the first mention. At subsequent mentions of the same taxon, or other taxa of the same genus, the genus name may be abbreviated (*Rosa canina* L. to *R. canina*).
- use n. sp., n. gen., n. fam., etc. for new taxa;
- use italicized words only for taxa of generic and sub-generic ranks;
- use lowercase characters for authority names
- references to illustrations and tables should be indicated as follows: (Fig. 1), (Fig. a, d), (Fig. 2a-d), (Figs 3; 6), (Figs 3-5; Tab. 2); (Tab. 1); for German texts use Abb. instead of Fig.
- footnotes should not be used.

Tables and figures

Copies of all figures and tables should be included with the manuscript. They can be either included in the text at the correct locations with their legends or referenced in the text and included as annexes.

The editorial board will pay special attention to the quality and relevance of illustrations. Colored illustrations are accepted where appropriate and necessary.

Line drawings must be in Indian ink or high quality laser printouts; high contrast Photographs are required,

Illustrations can be grouped into composite plates the elements of which are identified by letters (a, b, c...). Plates are not placed at the end of the article: they will be considered as figures and numbered as such. Arrange figures to fit in one (70 x 200 mm) or two columns (144 x 200 mm) or one half page (144 x 100 mm). Letters, numbers, etc., for each figure, are to be indicated on an accompanying overlay, not on the original figure. They will be inserted by the printer. A scale bar is required for each figure, when appropriate. No diagram or table is to exceed one page; longer tables should be divided.

References

In main text, references to authors, in lower case, should be presented without comma before year, as follows: Smith (2001), Smith (2001, 2002), (Smith 2001), (Smith 2001; Jones 2002), (Smith & Jones 2003, 2005), (Smith, Jones & Johnson 2003), Smith (2001: 1; 2003: 5), Smith (2001: fig. 2).

References should be presented as follows, in alphabetical order. Do not abbreviate journal names:

Høeg J. T. & Lützen J. 1985. - Comparative morphology and phylogeny of the family Thompsoniidae (Cirrropedia: Rhizocephala: Akentrogonida) with description of three new genera and seven new species. *Zoologica*

Scripta 22: 363-386.

Marshall C. R. 1987. - Lungfish: phylogeny and parsimony, in Bernis W. E., Burggren W. W. & Kemp N. E. (eds), *The Biology and Evolution of Lungfishes*, *Journal of Morphology* 1: 151-152.

Röckel D., Korn W. & Kohn A. J. 1995. - *Manual of the Living Conidae. Volume 1: Indo-Pacific Region*. Christa Hemmen, Wiesbaden, 517 p.

Schwaneer T. D. 1985. - Population structure of black tiger snakes, *Notechis ater niger*, on off-shore islands of South Australia: 35-46, in Grigg G., Shine R. & Ehmann H. (eds), *Biology of Australasian Frogs and Reptiles*. Surrey Beatty and Sons, Sydney.

Proofs and reprints

Proofs will be sent to the author (or the first author) for correction and must be returned within two weeks by priority air mail. Authors will receive twenty-five reprints free of charge; further reprints can be ordered at a charge indicated on a form supplied with the proofs.

Page layout of final publication

paper size	170 x 240 mm
page size	144 x 200 mm
number of columns	2
column width	70 mm
space between columns	4 mm
top margin	22 mm
bottom margin	18 mm
inside margin	15 mm
outside margin	11 mm

Fonts

Body text: Palatino linotype (serif), 9pt

Titles, legends, headers, footers: Trebuchet (sans-serif)

LISTE DES NUMÉROS PARUS À CETTE DATE:

Les volumes de la série «FERRANTIA» paraissent à intervalles non réguliers.

Travaux scientifiques du Musée national d'histoire naturelle (1981-1999)

- I Atlas provisoire des Insectes du Grand-Duché de Luxembourg. Lepidoptera. 1^{ère} partie (Rhopalocera, Hesperidae). Marc Meyer et Alphonse Pelles, 1981.
- II Nouvelles études paléontologiques et biostratigraphiques sur les Ammonites du Grand-Duché de Luxembourg, de la Province du Luxembourg et de la région Lorraine attenante. Pierre L. Maubeuge, 1984.
- III Revision of the recent Western Europe species of genus *Potamocypris* (Crustacea, Ostracoda). Part 1: Species with short swimming setae on the second antennae. Claude Meisch, 1984.
- IV Hétéroptères du Grand-Duché de Luxembourg
1. *Psallus (Hylopsallus) pseudoplatani* n. sp. (Miridae, Phylinae) et espèces apparentées. Léopold Reichling, 1984.
2. Quelques espèces peu connues, rares ou inattendues. Léopold Reichling, 1985.
- V La bryoflore du Grand-Duché de Luxembourg: taxons nouveaux, rares ou méconnus. Ph. De Zuttere, J. Werner et R. Schumacker, 1985.
- VI Revision of the recent Western Europe species of genus *Potamocypris* (Crustacea, Ostracoda). Part 2: Species with long swimming setae on the second antennae. Claude Meisch, 1985.
- VII Les Bryozoaires du Grand-Duché de Luxembourg et des régions limitrophes. Gaby Geimer et Jos. Massard, 1986.
- VIII Répartition et écologie des macrolichens épiphytiques dans le Grand-Duché de Luxembourg. Elisabeth Wagner-Schaber, 1987.
- IX La limite nord-orientale de l'aire de *Conopodium majus* (Gouan) Loret en Europe occidentale. Régine Fabri, 1987.
- X Epifaune et endofaune de *Liogryphaea arcuata* (Lamarck). Contribution à l'écologie des populations de *Liogryphaea arcuata* (Lamarck) dans le Sinémurien au NE du Bassin de Paris. Armand Hary, 1987.
- XI Liste rouge des Bryophytes du Grand-Duché de Luxembourg. Jean Werner, 1987.
- XII Relic stratified scress occurrences in the Oesling (Grand-Duchy of Luxembourg), approximate age and some fabric properties. Peter A. Riezebos, 1987.
- XIII Die Gastropodenfauna der «angulata-Zone» des Steinbruchs «Reckingerwald» bei Brouch. Hellmut Meier et Kurt Meiers, 1988.
- XIV Les lichens épiphytiques et leurs champignons lichénicoles (macrolichens exceptés) du Luxembourg. Paul Diederich, 1989.
- XV Liste annotée des Ostracodes actuels non-marins trouvés en France (Crustacea, Ostracoda). Claude Meisch, Karel Wouters et Koen Martens, 1989.
- XVI Atlas des lichens épiphytiques et de leurs champignons lichénicoles (macrolichens exceptés) du Luxembourg. Paul Diederich, 1990.
- XVII Beitrag zur Faunistik und Ökologie der Schmetterlinge im ehemaligen Erzabbaugebiet "Haardt" bei Düdelingen. Jos. Cungs, 1991.
- XVIII Moosflora und -Vegetation der Mesobrometen über Steinmergelkeuper im Luxemburger und im Bitburger Gutland. Jean Werner, 1992
- 19 Ostracoda. Nico W. Broodbakker, Koen Martens, Claude Meisch, Trajan K. Petkovski and Karel Wouters, 1993.
- 20 Les haies au Grand-Duché de Luxembourg. Konjev Desender, Didier Drugmand, Marc Moes, Claudio Walzberg, 1993.
- 21 Ecology and Vegetation of Mt Trikora, New Guinea (Irian Jaya / Indonesia). Jean-Marie Mangen, 1993.
- 22 A checklist of the recent non-marine ostracods (Crustacea, Ostracoda) from the inland waters of South America and adjacent islands. Koen Martens & Francis Behen, 1993.
- 23 Ostracoda. Claude Meisch, Roland Fuhrmann, Karel Wouters, Gabriele Beyer and Trajan Petrovski, 1996.
- 24 Die Moosflora des Luxemburger Oeslings. Jean Werner, 1996.
- 25 Atlas des ptéridophytes des régions lorraines et vosgiennes, avec les territoires adjacents, Georges Henri Parent, 1997.
- 26 Evaluation de la qualité des cours d'eau au Luxembourg en tant qu'habitat pour la loutre. Groupe Loutre Luxembourg, 1997.
- 27 Notes Paléontologiques et Biostratigraphiques sur le Grand Duché de Luxembourg et les régions voisines. Pierre Louis Maubeuge & Dominique Delsate, 1997.
- 28 Die Moosflora der Kleinen Luxemburger Schweiz (Müllertal). Florian Hans, 1998.

- 29 Etude sur les genres *Globorilusopsis* Maubeuge, 1994 et *Simoniceras* n. gen. du Lias Supérieur du Grand-Duché de Luxembourg (Calyptop-tomati-da). Pierre Louis Maubeuge, 1998.
- 30 L'Ichthyofaune du Toarcien luxembourgeois. Cadre général et catalogue statistique. Dominique Delsate, 1999.
- 31 Proceedings of the 3rd European Batdetector Workshop. 16-20 August 1996 Larochette (Lux.). Christine Harbusch & Jacques Pir (eds.), 1999.
- 32 Les collections paléontologiques du Musée national d'histoire naturelle de Luxembourg. Fossiles du Trias et du Jurassique. Dominique Delsate, Chris Duffin & Robi Weis, 1999.
- FERRANTIA (2002-)**
- 33 Die Fledermäuse Luxemburgs (Mammalia: Chiroptera). Christine Harbusch, Edmée Engel, Jacques Pir, 2002.
- 34 The Protura of Luxembourg. Andrzej Szeptycki, Norbert Stomp, Wanda M. Weiner, 2003.
- 35 Liste rouge des bryophytes du Luxembourg. Jean Werner, 2003.
- 36 Paléontologie au Luxembourg. Simone Guérin-Franiatte (éd.), 2003.
- 37 Verbreitungsatlas der Amphibien des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess (éd.), 2003.
- 38 Trois études sur la Zone Rouge de Verdun. I. Herpétofaune. II. La diversité floristique. III. Les sites d'intérêt botanique et zoologique. Georges H. Parent, 2004.
- 39 Verbreitungsatlas der Heuschrecken des Großherzogtums Luxemburg. Roland Proess, 2004.
- 40 Les macrolichens de Belgique, du Luxembourg et du nord de la France - Clés de détermination. E. Sérusiaux, P. Diederich & J. Lambinon, 2004.
- 41 Die Fauna der Quellen und des hyporheischen Interstitials in Luxemburg unter besonderer Berücksichtigung der Milben (Acari), Muschelkrebse (Ostracoda) und Ruderfusskrebse (Copepoda). Reinhard Gerecke, Fabio Stoch, Claude Meisch, Isabel Schrankel, 2005.
- 42 Red List of the Vascular Plants of Luxembourg. Guy Colling, 2005.
- 43 Contribution à la climatologie du Luxembourg. Analyses historiques, scénarios futurs. Christian Ries (éd.), 2005.

Envoyez votre commande aux adresses indiquées à la page 2 de la couverture.

