

Programme soutenu par la
Fondation MAIF :
(2008-2010)

***« Les risques climatiques liés aux
changements en cours dans la dynamique des
masses d'air sur l'Europe Occidentale »***

Responsable : Olivier PLANCHON

COSTEL – LETG UMR 6554 CNRS
UNIVERSITE RENNES-2

Bilan final des activités

RENNES, le 19 MARS 2011

LISTE DES PARTICIPANTS AU PROGRAMME

Noms	Position*	Etablissement
Abdelkrim BENZAÏD	Ingénieur, UCBN	GEOPHEN, Univ. Caen
Valérie BONNARDOT	Post-Doc, Fondation MAIF	COSTEL, Univ. Rennes-2
Cyril BONNEFOY	Doctorant, UHB	COSTEL, Univ. Rennes-2
Olivier CANTAT	Maître de Conférences, UCBN	GEOPHEN, Univ. Caen
Daniel DELAHAYE	Professeur, UCBN	GEOPHEN, Univ. Caen
Johnny DOUVINET	Doctorant, UCBN	GEOPHEN, Univ. Caen
Vincent DUBREUIL	Professeur, UHB	COSTEL, Univ. Rennes-2
Nadia DUPONT	Maître de Conférences, UHB	COSTEL, Univ. Rennes-2
Denis LAMARRE	Professeur Retraité, UB	Dijon
Chloë LAMY	Doctorante, UHB	COSTEL, Univ. Rennes-2
Rémi LECERF	Doctorant, UHB	COSTEL, Univ. Rennes-2
Patrick LEGOUÉE	Maître de Conférences, UCBN	GEOPHEN, Univ. Caen
Olivier PLANCHON	Chercheur, CNRS	COSTEL, Univ. Rennes-2
Hervé QUENOL	Chercheur, CNRS	COSTEL, Univ. Rennes-2
Edwige SAVOURET	Post-Doc, Paris-IV	UMR 8185 CNRS, Paris

***au moment de la participation au programme**

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction générale (p. 6)

1.1. Rappel de l'objet de la recherche (p. 6)

1.2. Méthodologie (p. 7)

1.2.1. La méthode « objective » de classification des types de circulations atmosphériques de Hess-Brezowsky (p. 7)

1.2.2. Application de la classification de Hess-Brezowsky à la problématique du projet (p. 8)

1.2.2.1. Crues / inondations (p. 9)

1.2.2.2. Gelées tardives (p. 9)

1.2.2.3. Sécheresses (p. 9)

1.3. Données (p. 10)

2. Validité de la méthode Hess-Brezowsky dans les régions de l'Ouest de la France (p. 11)

2.1. Hivers pluvieux et fortes précipitations de saison froide (p. 11)

2.1.1. Introduction (p. 11)

2.1.2. Résultats (p. 13)

2.1.2.1. Méthode subjective (p. 13)

2.1.2.2. Méthode objective : étude saisonnière en Bretagne occidentale et méridionale (p. 16)

2.1.2.3. Méthode objective : la saison froide exceptionnellement pluvieuse de 2000-2001 réexaminée par la version objective de la méthode Hess-Brezowsky (p. 19)

2.1.3. Conclusion (p. 20)

2.2. Crues et inondations (p. 21)

2.2.1. Introduction (p. 21)

2.2.2. Analyse des crues de printemps-été et des types de temps (p. 21)

2.2.2.1. Types de circulations et crues de printemps dans le bassin versant de la Vilaine (p. 21)

2.2.2.2. Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « crues rapides » dans le nord de la France (Bassin Parisien) (p. 24)

2.2.3. Analyse des circulations hivernales (p. 27)

2.2.4. Publications : précipitations, crues et inondations (p. 28)

2.3. Risque « Gel » : types de temps et gelées printanières dans les vignobles du nord de la France (p. 31)

2.3.1. Introduction (p. 31)

2.3.1.1. Rappel du texte de la proposition (p. 31)

2.3.1.2. Problématique viticole et plan de travail (p. 31)

2.3.2. Types de circulations atmosphériques en situations gélives (p. 31)

2.3.3. Répartition interannuelle et intra saisonnière des gelées et du risque de gelées entre 1960 et 2007 (p. 33)

2.3.4. Conclusion (p. 36)

2.3.5. Publications (p. 37)

2.4. Recherches sur les sécheresses (p. 38)

2.4.1. Introduction (p. 38)

2.4.1.1. Rappel du texte de la proposition (p. 38)

2.4.1.2. Plan de travail (p. 38)

2.4.2. Approche historique des sécheresses à partir de séries dendrochronologiques (p. 38)

2.4.3. Comparaison entre le bilan de l'eau à Rennes et la fréquence des situations météorologiques (p. 40)

2.4.3.1. Reconstitution historique du bilan de l'eau à Rennes (p. 40)

2.4.3.2. Analyse des types de circulation (p. 42)

2.4.3.3. Années sèches et années anticycloniques : une correspondance partielle (p. 43)

2.4.4. Impact des sécheresses en Bretagne sur le bilan hydrique : modélisation à partir du climat d'années passées (p. 44)

2.4.4.1. Introduction (p. 44)

2.4.4.2. Contexte et Méthodologie (p. 44)

2.4.4.3. Les résultats (p. 46)

2.4.4.4. Conclusion (p. 49)

2.4.5. Publications (p. 49)

3. Risques climatiques et impacts (p. 51)

3.1. Variabilité de la circulation atmosphérique sur l'Europe (1850-2009) (p. 51)

3.1.1. Introduction (p. 51)

3.1.2. Analyse statistique (p. 52)

3.1.3. Durée et enchaînements des circulations atmosphériques (p. 59)

3.1.4. Conclusion (p. 60)

3.2. Impacts thermiques et pluviométriques (p ; 61)

3.2.1. Introduction : rappel des tendances observées (p. 61)

3.2.2. Impacts des circulations de SUD en hiver (p. 62)

3.2.2.1. Les impacts thermiques (p. 62)

3.2.2.2. Les impacts pluviométriques (p. 64)

3.2.2.3. Impacts des circulations de SUD en hiver : synthèse et conclusion (p. 67)

3.2.3. Impacts des circulations d'OUEST de type « WW » en hiver (p. 69)

3.2.3.1. Les impacts thermiques (p. 71)

3.2.3.2. Impacts des circulations de type « WW » en hiver : synthèse et conclusion (p. 74)

3.2.4. Impacts des circulations de NORD-EST et EST de type « HNFZ » au printemps (p. 75)

3.2.4.1. Les impacts thermiques (p. 76)

3.2.4.2. Impacts des circulations de type « HNFZ » au printemps : synthèse et conclusion (p. 79)

3.2.5. Impacts des circulations de NORD-OUEST et NORD de type « NA » en été (p. 81)

3.2.5.1. Les impacts thermiques (p. 82)

3.2.5.2. Impacts des circulations de type « NA » au printemps : synthèse et conclusion (p. 85)

3.2.6. Conclusions (p. 87)

4. Le problème du passage aux échelles fines (p. 90)

4.1. Introduction (p. 90)

4.2. Spatialisation et suivi des sécheresses (p. 90)

4.2.1. Suivi de la sécheresse par images satellites à moyenne résolution (p. 90)

4.2.2. Vers la spatialisation des bilans hydriques aux échelles fines (p. 92)

4.2.2.1. Introduction (p. 92)

4.2.2.2. Application à l'identification des sécheresses en Bretagne (p. 93)

4.2.2.3. *Modélisation spatiale à fine résolution des bilans hydriques (p. 97)*

4.2.3. **Publications (p. 102)**

4.3. Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles (p. 105)

4.3.1. **Introduction et plan de travail méthodologique (p. 105)**

4.3.2. **Un réseau météorologique adapté à l'échelle du terroir viticole et tenant compte des échelles spatiales imbriquées : exemple du Val de Loire (p. 105)**

4.3.3. **Quelques résultats obtenus dans l'ensemble du Val de Loire (échelle régionale) (p. 106)**

4.3.4. **Résultats obtenus dans le secteur des *coteaux du Layon* (échelle locale) (p. 107)**

4.3.5. **Recherches en cours en région bordelaise (p. 110)**

4.3.5.1. *Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles : Projet d'étude sur le Domaine viticole de Château Dauzac (p. 110)*

4.3.5.2. *Approche de climatologie historique : un aperçu de l'enchaînement quotidien des masses d'air et des types de temps en Bordelais au début du XVIII^{ème} siècle (p. 114)*

4.3.6. **Publications (p. 115)**

4.4. Conception et réalisation d'un logiciel pour la détermination automatique des types de temps (p. 117)

4.4.1. **Détermination de la base de données météorologiques de référence (p. 117)**

4.4.2. **Le logiciel « TTSR » : une approche des Types de Temps Sensibles et à Risques (p. 118)**

4.4.3. **Exemples de résultats (p. 120)**

4.4.4. **Conclusion (p. 122)**

4.4.5. **Publications (p. 122)**

5. Conclusion générale (p. 124)

NOTE : Les résultats présentés dans les chapitres écrits en rouge doivent rester confidentiels (cf. 1.3. Données)

1. Introduction générale

1.1. Rappel de l'objet de la recherche

Les données fournies par les modèles globaux comportent encore beaucoup d'incertitudes lorsqu'il s'agit d'affiner les prévisions d'évolution du climat et conséquences sur l'Homme, aux échelles régionales et locales. Or, la réponse de la société aux changements globaux devra également se faire à l'échelle des collectivités territoriales notamment pour ce qui concerne les risques liés au climat. De même, les acteurs économiques, et notamment le secteur des assurances, ont besoin d'informations sur les risques liées au changement climatique attendu, aux échelles régionales et locales. Il s'agit donc, à travers ce projet, d'affiner le passage entre l'échelle des modèles globaux et la résultante risques aux échelles régionales et locales.

Ce projet sera mené à bien en utilisant des méthodes propres à la « climatologie dynamique » des climatologues-géographes, fondées sur les caractéristiques des masses d'air circulant sur l'Europe (caractères thermiques, hygrométriques, cinématiques), et non pas simplement sur les figures isobariques (anticyclones, dépressions). On sait que le climat est le résultat de la succession habituelle des masses d'air, au-dessus d'un lieu ou d'une région, sur une période assez longue (normalement, au moins 30 ans). L'étude approfondie de cette succession et de ses évolutions sur l'Europe occidentale depuis 1881 est possible grâce au fichier GWL (V. infra). Préciser des évolutions saisonnières (ou désaisonnalisées) est nécessaire pour une approche des changements climatiques au plus près des réalités météorologiques. Notre étude doit permettre, entre autres, de faire la part entre les évolutions graduelles (persistances, blocages des masses d'air) et les changements de rythmes dans les enchaînements. Une attention particulière sera portée à la fréquence et à la répétition de ces enchaînements. En effet ceux-ci sont responsables d'aléas spécifiques, tels la sécheresse, les inondations, le gel. Dans le contexte géographique de la partie non-méditerranéenne de la France, la démarche proposée ici vise à combiner une étude de ces aléas basée sur la fréquence des types de situations météorologiques, une étude sur la vulnérabilité des sociétés concernées, et une sectorisation géographique des espaces concernés. Il s'agit donc bien d'une étude d'ensemble des risques : physique (1), socio-économique (2) et géographique (3).

(1) L'étude proposée se place à l'échelle des masses d'air, dite synoptique, qui est la mieux adaptée à la dimension des régions en Europe. Cette échelle régionale est celle où les manifestations concrètes du changement climatique peuvent être observées. Or ce niveau régional, ainsi que les échelles fines, reste pour le moment hors de portée des modèles de simulation climatique qui décrivent l'évolution à l'échelle globale.

(2) Des éléments d'évaluation économique et sociale seront aussi pris en compte, tels que les dommages liés aux sécheresses, aux inondations « lentes » mais tenaces, aux gelées tardives. Cette étude cherchera à préciser la répétitivité et la fréquence des phénomènes porteurs de risque pour les sociétés. Etant donné que les risques étudiés touchent les assurances individuelles mais aussi les activités économiques, la vulnérabilité devra être abordée aussi bien au niveau des personnes et biens qu'à un niveau économique supérieur.

(3) A partir du contexte régional, niveau d'échelle où les acteurs sont à même d'intervenir, il s'agira d'utiliser les outils de la géomatique (SIG et télédétection), afin de poursuivre l'analyse jusqu'à l'échelle locale de manière à obtenir une spatialisation des risques utile pour les collectivités territoriales.

Les travaux menés dans le cadre du programme « *Dynamique des masses d'air et risques climatiques* » soutenu par la fondation MAIF sont aussi, parallèlement et au moins en partie, soutenus par les programmes TERVICLIM (ANR-JC07-194103) et CLIMASTER (*Changement climatique, systèmes agricoles, ressources naturelles et développement territorial*) : programme PSDR-GO co-financé par l'INRA et 4 régions de l'ouest de la France. Les réponses à ces appels d'offre ont été favorisées par les collaborations entretenues dans le cadre du GDR 2663 CNRS RICLIM sur les risques climatiques (2003-2006 puis 2007-2010).

1.2. Méthodologie

1.2.1. La méthode « objective » de classification des types de circulations atmosphériques de Hess-Brezowsky

La méthode de classification de Hess-Brezowsky a été utilisée afin d'étudier le lien entre la fréquence des types de circulations atmosphériques et des risques climatiques analysés dans le cadre du programme. La méthode de Hess et Brezowsky repose sur la distribution du champ de pression au niveau de la mer et le géopotential à 500 hPa au-dessus de l'Océan Atlantique Nord et de l'Europe, et identifie 29 types de circulations ou GWL (*Grosswetterlagen*), regroupés en trois classes principales (zonal, mixte et méridien) ou en cinq grands types (GWT ou *Grosswettertypen*, utilisés dans cet article). Cette méthode est fréquemment utilisée pour caractériser la circulation atmosphérique et sa variabilité sur l'Océan Atlantique Nord et l'Europe (Hess et Brezowsky, 1952 ; Gerstengarbe et Werner, 2005 ; Kysely et Huth, 2006). Le catalogue des GWL quotidiens a déjà été utilisé pour diverses études statistiques de fréquence, persistance et probabilité de transition entre les GWL (Bárdossy et Caspary, 1990 ; Klaus, 1993), mais a été développé essentiellement pour des études météo-climatologiques sur l'Allemagne et les pays voisins d'Europe centrale (notamment Suisse et République Tchèque).

L'objectif de ce programme a d'abord consisté à tester et vérifier la validité de la méthode Hess-Brezowsky sur des régions d'Europe de l'ouest, et surtout sur l'ouest de la France ou celle-ci n'a jamais été utilisée auparavant. L'application de cette méthode a été l'occasion de comparer les résultats obtenus avec sa version « *subjective* », développée par le PIK (Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung), et celle, « *objective* » et beaucoup plus récente, développée par P. James (2007) dans le cadre du programme COST-733 : <http://www.cost733.org/>). La version objective (automatique) de la méthode de Hess et Brezowsky présente notamment l'avantage d'être plus largement utilisable sur l'ensemble de l'Europe. Un catalogue quotidien, dont l'année de départ a été reculée de 1881 à 1850, était mis à jour en continu jusqu'en 2008 (<http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html>).

Le détail des types de circulations et de leurs abréviations utilisées dans ce rapport est donné dans le tableau 1 ci-dessous :

Types principaux (<i>Major Types</i> : GWT) et individuels (<i>Subtypes</i> : GWL)	GWL
Westerly circulations	
Anticyclonic Westerly	WA
Cyclonic Westerly	WZ
South-Shifted Westerly	WS
Maritime Westerly (Block E. Europe)	WW
Southerly circulations	
Anticyclonic South-Westerly	SWA
Cyclonic South-Westerly	SWZ
Anticyclonic Southerly	SA
Cyclonic Southerly	SZ
Low over the British Isles	TB
Trough over Western Europe	TRW
Anticyclonic South-Easterly	SEA
Cyclonic South-Easterly	SEZ
Northwesterly and northerly circulations	
Anticyclonic North-Westerly	NWA
Cyclonic North-Westerly	NWZ
Anticyclonic Northerly	NA
Cyclonic Northerly	NZ
Icelandic high, Ridge over Central Europe	HNA
Icelandic high, Trough over Central Europe	HNZ
High over the British Isles	HB
Trough over Central Europe	TRM
Northeasterly and easterly circulations	
Anticyclonic North-Easterly	NEA
Cyclonic North-Easterly	NEZ
Scandinavian High, Ridge over Central Europe	HFA
Scandinavian High, Trough over Central Europe	HFZ
High over Scandinavia-Iceland, Ridge over Central Europe	HNFA
High over Scandinavia-Iceland, Trough over Central Europe	HNFZ
Main high / low pressure area over Central Europe	
High over Central Europe	HM
Zonal Ridge across Central Europe	BM
Low (Cut-Off) over Central Europe	TM

Tableau 1.1. Liste des types de circulations principaux (GWT) et individuels (GWL) de la classification de Hess-Brezowsky (Fallot, 2000; Gerstengarbe et Werner, 2005; James, 2007).

1.2.2. Application de la classification de Hess-Brezowsky à la problématique du projet

La validation de la méthode Hess-Brezowsky a été effectuée par l'analyse statistique des types de circulations et leurs effets, en termes de fréquence et d'intensité, sur les éléments climatiques sélectionnés et à des échelles spatiales régionales et locales, mais sur des périodes récentes. Les liens complexes entre les types de circulations, les précipitations et les crues / inondations, les situations à gelées tardives et les sécheresses ont ainsi été examinés dans la France non méditerranéenne, plus spécialement dans un grand quart nord-ouest englobant le massif Armoricaïn et une partie du bassin Parisien.

Grâce à la longue série des GWL, la méthode de Hess-Brezowsky permet d'analyser dans le long terme les impacts climatiques et leur variabilité sur les espaces de climat océanique. Cette longue durée permet par exemple de comparer les impacts climatiques de types de circulations individuels (GWL) ou principaux (GWT) sur des stations pour lesquelles des longues séries de données sont disponibles depuis la fin du XIX^e siècle ou le début du XX^e siècle, marquant le début du réchauffement contemporain.

1.2.2.1. Crues / inondations

Le lien entre les événements météorologiques et hydrologiques seront aussi analysés à l'aide de longues séries de données coïncidant avec la chronique disponible dans le catalogue des GWL. L'analyse permettra d'identifier les événements hydroclimatiques passés, leur fréquence et leur variabilité spatiale pour plusieurs cours d'eau de l'Ouest sur cette longue période. Des analyses statistiques seront effectuées en utilisant les hydrogrammes de crues, les séries de données pluviométriques, afin d'identifier la stationnarité ou la non-stationnarité des événements hydrologiques, et afin d'identifier les changements dans les régimes pluviométriques ou de la fonction de transfert pluie-débit.

1.2.2.2. Gelées tardives

L'identification et l'analyse fréquentielle des types de circulations générant les types de temps à gel tardif sur les espaces viticoles et arboricoles de l'Ouest et du bassin parisien (ex : Val de Loire) devra s'accompagner de mesures (climatiques et agronomiques) précises sur les terrains d'étude. Les résultats obtenus seront confrontés aux résultats des simulations proposés pour la fin du XXI^{ème} siècle, afin de tenter d'adapter les scénarios de changement climatique aux échelles fines. L'objectif est de mettre en évidence les caractéristiques de la variabilité interannuelle des situations météorologiques à gel tardif à l'échelle des terroirs et des parcelles et d'en rechercher les éventuelles tendances dans le contexte du changement climatique global.

1.2.2.3. Sécheresses

Les sécheresses du nord-ouest de la France sont liées à la persistance de hautes pressions de surface sur l'Europe occidentale et/ou centrale. Les variations de l'intensité et de l'extension spatiale des sécheresses sont liées aux différents types de circulations qui génèrent les conditions de sécheresse. La plupart des sécheresses estivales intenses sont associées à des hautes pressions sur l'Europe centrale. Les sécheresses de longue durée (pluri-saisonnières : par exemple 1976) sont associées à des successions complexes de différents types de circulations incluant des situations anticycloniques fréquentes et variées. L'objectif sera dans ce cas d'identifier les liens entre la fréquence des types de circulations concernées et la variabilité spatio-temporelle des anomalies pluviométriques calculées pour les stations dont les données sont disponibles depuis 1881.

Dans le contexte géographique d'un grand Ouest français, cette étude propose donc une approche des risques climatiques fondée sur l'évolution des enchaînements des masses d'air depuis la fin du XIX^{ème} siècle, analysée au moyen de la classification des types de circulations de Hess-Brezowsky. L'étude des types de circulations (identification, fréquence, évolution) générant les situations à risques a été menée en vue d'obtenir une régionalisation de ces risques. Cette démarche est fondée aussi sur l'idée selon laquelle l'évolution des types de circulations, surtout dans la dernière période plus chaude et plus agitée, entraîne de nouvelles vulnérabilités économiques.

Références citées : voir 3.

1.3. Données

- **Météo-France** : *Climathèque*

→ Données mensuelles & quotidiennes ;

- **Ficher GHCN** (*The Global Historical Climatology Network*), NOAA-NCDC (USA) :

<ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/ghcn/v2/>

→ Données mensuelles ;

- **European Climate Assessment & Dataset (ECA&D)** :

<http://eca.knmi.nl/>

→ Données quotidiennes ;

- **Sorties de modèle ARPEGE (Météo-France), régionalisées statistiquement** :

→ Modèle ARPEGE (Météo-France) sur des mailles de 50 km, sur lesquelles a été appliquée une méthode de correction (dite méthode de désagrégation quantile/quantile conditionnelle) permettant de reconstituer des séries plus cohérentes localement pour une station donnée. Source : Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.

- **Installation de capteurs** :

→ Terrains expérimentaux du réseau du programme ANR-JC07-194103 *TERVICLIM* : Val de Loire, puis Château Dauzac en Bordelais.

- **Catalogue quotidien des types de circulations (GWL)** :

→ Version « objective » de la méthode Hess-Brezowsky développée par P. JAMES (2007) dans le cadre du programme COST-733 : <http://www.cost733.org/> ; catalogue (depuis 1850) mis à jour en continu jusqu'en 2008 (<http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html>) ; **ces données ne sont plus accessibles sur le site**. Une partie du catalogue (1948-2009) a été fournie gracieusement par P. James (alors chercheur au MET-OFFICE, Roy. Uni, et actuellement au DEUTSCHER WETTERDIENST à Offenbach).

Le Met-Office a supprimé l'accès aux données du catalogue quotidien de GWL développé par P. James et l'utilisation, diffusion et publication de ces données n'est plus autorisée, en dehors du Met-Office, depuis le départ de P. James pour le Deutscher Wetterdienst en octobre 2009.

2. Validité de la méthode Hess-Brezowsky dans les régions de l'Ouest et du Nord de la France

2.1. Hivers pluvieux et fortes précipitations de saison froide

2.1.1. Introduction

Dans les régions d'agriculture intensive telle la Bretagne, les changements à court terme d'utilisation et d'occupation du sol représentent un enjeu clé pour les processus de transfert hydrologique (Cheverry, 1998). En effet, la présence de parcelles de sol nu ou peu végétalisé durant les hivers pluvieux favorise l'intensification des flux de polluants (nitrates, pesticides, etc...) dans les cours d'eau, mais influencent ainsi la vitesse de montée des eaux en cas d'épisodes de crues (Moussa *et al.*, 2001 ; Carluer and De Marsily, 2004). Sur le bassin-versant du Scorff, fleuve côtier de Bretagne occidentale, les responsables locaux pour l'aménagement du territoire ont concentré leur attention sur l'utilisation et l'occupation du sol hivernale car il s'agit d'une période de transition dans le cycle cultural de la région, et sensible du point de vue climatique. L'ensemble de la Bretagne et des régions voisines de l'ouest de la France est soumis à un régime pluviométrique de type tempéré océanique à maximum pluviométrique de saison froide. L'augmentation des précipitations hivernales constatée en Europe de l'Ouest depuis les dernières décennies du XX^e siècle constituent donc un enjeu environnemental important, si cette tendance se confirme au XXI^e siècle dans le contexte du changement climatique. Le poids des contraintes climatiques sur le bassin versant du Scorff a été abordé par l'analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations durant les quatre hivers de la période 2000-2004, représentatifs de différentes structures et dynamiques spatiales d'utilisation et d'occupation du sol dans la région, et replacé régionalement (Bretagne occidentale et méridionale) dans la deuxième moitié du XX^e siècle (période 1958-2005). Ce travail a consisté d'une part à identifier précisément les types de circulations atmosphériques générant des précipitations abondantes et d'autre part de caractériser les hivers pluvieux en fonction de la fréquence d'apparition des types de circulations. Les analyses ont été effectuées pour chaque GWT et GWL avec la méthode subjective pour les stations de Lorient, Plouay et Plouray, puis avec la méthode objective pour ces mêmes stations, en y ajoutant 11 autres stations réparties sur l'ensemble de la Bretagne occidentale et méridionale (Fig. 2.1.1.).

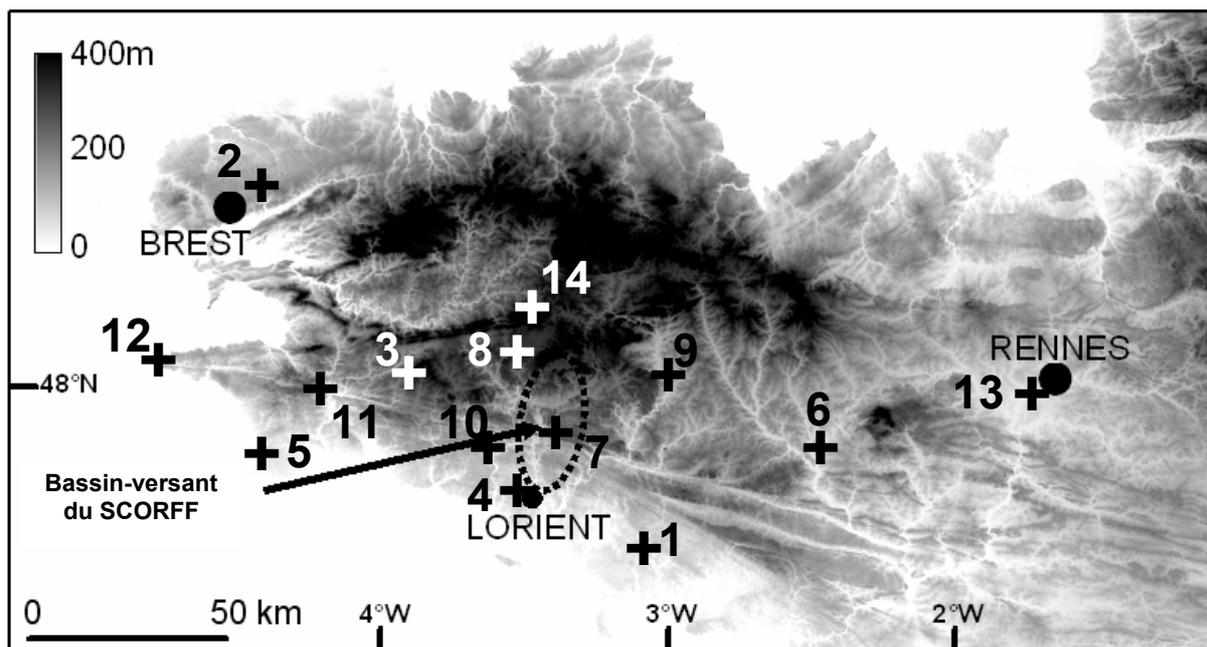


Figure 2.1.1. Situation du bassin-versant du Scorff et localisation des stations météorologiques de référence en Bretagne occidentale et méridionale (Planchon *et al.*, 2009b). Les noms des stations associés aux numéros sont donnés dans le tableau 2.1.1.

NI	Station	Latitude (N)	Longitude (W)	Altitude (m)	Distance/côte (km)*
1	AURAY	47°40'	02°58'	26	9
2	BREST	48°27'	04°25'	94	8
3	CORAY	48°03'	03°50'	231	20
4	LORIENT	47°46'	03°27'	42	5
5	PENMARCH	47°48'	04°22'	3	0
6	PLOERMEL	47°57'	02°24'	65	46
7	PLOUAY	47°54'	03°20'	74	22
8	PLOURAY	48°07'	03°26'	205	44
9	PONTIVY	48°04'	02°57'	83	48
10	QUIMPERLE	47°52'	03°33'	25	11
11	QUIMPER	47°58'	04°10'	90	12
12	Pointe du RAZ	48°02'	04°44'	67	0
13	RENNES	48°04'	01°44'	36	84
14	ROSTRENEN	48°14'	03°18'	262	54

Tableau 2.1.1. Coordonnées géographiques des stations météorologiques de référence utilisées dans les travaux ci-joints (Planchon *et al.*, 2009b). NI : numéro d'identification (cf. Fig. 2.1). *Distance à la côte ouest ou sud de la Bretagne .

Les précipitations dites “abondantes” correspondent dans cette étude à des valeurs quotidiennes ≥ 20 mm. Dans le cadre du plan d’alertes de crues mis en place par le *Service de Prévision de Crues* en Bretagne, le seuil d’alerte est fixé, en période hivernale, à des précipitations supérieures à 20 mm/jour. Nous avons donc retenu ce seuil pour l’analyse des précipitations hivernales. Une étude détaillée des événements pluvieux a été menée sur la saison froide exceptionnelle de 2000-2001. Les données climatiques ont été obtenues par la *climathèque* (base de données de Météo-France) et, pour les données de la station de Rennes-Saint-Jacques, par le fichier ECA&D (*European Climate Assessment & Dataset* :

<http://eca.knmi.nl>). Les fichiers quotidiens de types de circulations sont issus des catalogues constitués et diffusés par le PIK (<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports>) et sur le site du programme COST-733 (<http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html>).

2.1.2. Résultats

2.1.2.1. Méthode subjective

Durant la période 2000-2004, environ trois quarts des précipitations quotidiennes à Lorient ont été associées à des circulations de sud et d'ouest (Fig. 2.1.2a), incluant ainsi les types de circulations les plus pluvigènes en saison froide sur l'Europe de l'Ouest. Ces deux GWT ont généré des cumuls mensuels de précipitations d'environ 100 mm en octobre, novembre et janvier (Fig. 2.1.2b).

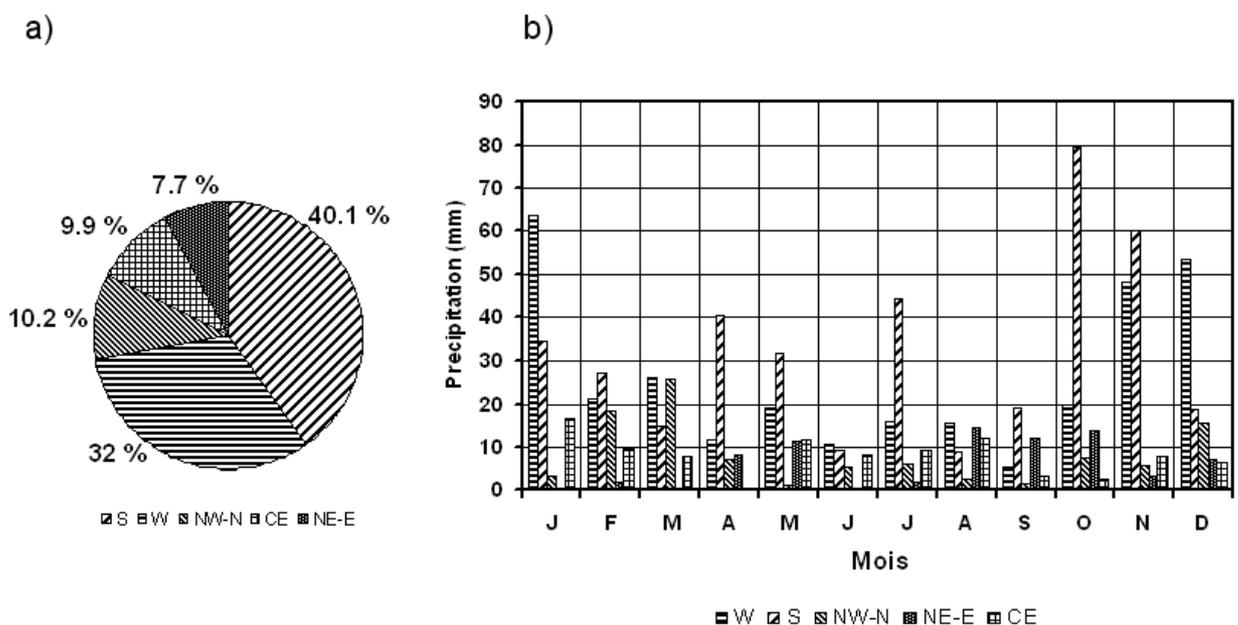


Figure 2.1.2. Proportion (a) et quantités (b) de précipitations à Lorient par GWT (période 2000-2004). W : circulations d'ouest, S : circulations de sud, NW-N : circulations de nord-ouest et de nord, NE-E : circulations de nord-est et d'est, CE : centre d'action sur l'Europe centrale (Planchon *et al.*, 2009a).

Des différences ont été observées d'un hiver à l'autre, malgré la courte période de référence. Alors que les précipitations des mois les plus arrosés de la saison froide 2002-2003 (novembre, décembre et janvier) ont été largement associées à des types de circulation d'ouest, celles de la saison froide remarquablement arrosée 2000-2001 ont été essentiellement liées à des types de circulation de sud et d'ouest. Ainsi 63,2 % des précipitations étaient associées à des circulations de sud durant l'hiver 2000-2001 alors que 62,2 % étaient associées à des circulations d'ouest durant l'hiver 2002-2003. (Fig. 2.1.3.)

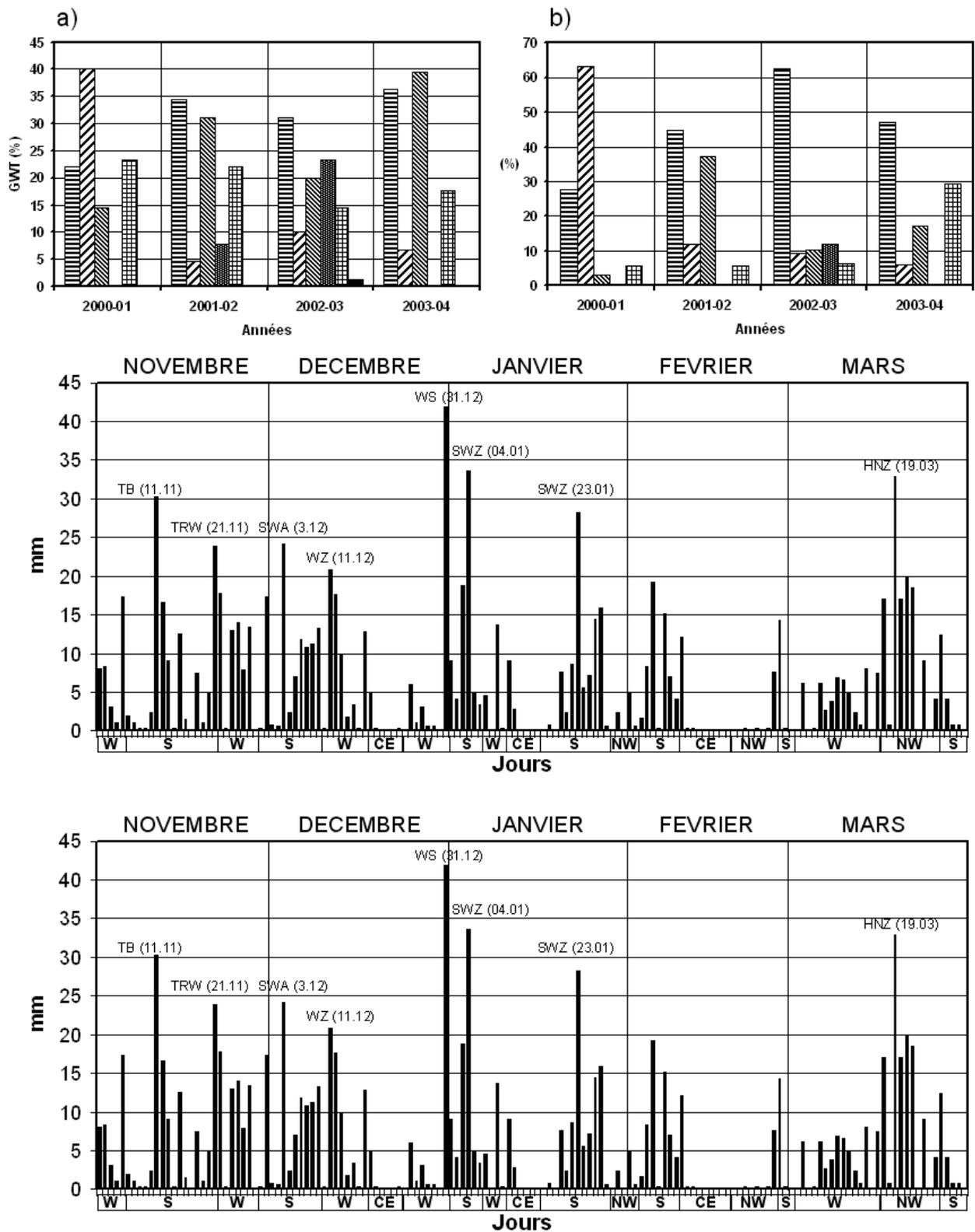


Figure 2.1.4. Précipitations quotidiennes à Lorient (histogramme) et GWT (barre horizontale) durant la saison froide 2000-2001. Pour les précipitations quotidiennes supérieures ou égales à 20 mm : GWT (date). W : circulations d'ouest, S : circulations de sud, NW-N : circulations de nord-ouest et de nord, NE-E : circulations de nord-est et d'est, CE : centre d'action sur l'Europe centrale (Planchon *et al.*, 2009a).

Durant la saison froide 2000-2001, la plupart des événements fortement pluvieux (au moins 20 mm) enregistrés à Lorient ont été liés à des types de circulations de sud (TB, TRW,

SWZ, SWA) ou d'ouest (WZ, WS), un centre de basses pressions étant situé au-dessus (ou à proximité) des Îles Britanniques dans le cas des circulations de sud, plus éloigné sur l'océan Atlantique dans le cas des circulations d'ouest. La série très arrosée de 16 jours consécutifs de circulation de sud en novembre 2000 (total : 113,6 mm ; maximum quotidien : 30,2 mm le 11 novembre) a par exemple été caractérisée par la persistance d'une dépression de surface au-dessus des Îles Britanniques, situation particulièrement pluvieuse en Europe de l'Ouest (Moron, 1990).

L'effet de la topographie et de la rugosité sur les collines de l'intérieur augmente les effets pluvieux de certains types de circulations en fonction de l'exposition. L'exposition de l'ensemble du bassin favorise le renforcement des précipitations liées aux circulations de sud et (moins fréquemment) d'ouest sur les collines de l'intérieur (Fig. 2.1.5.).

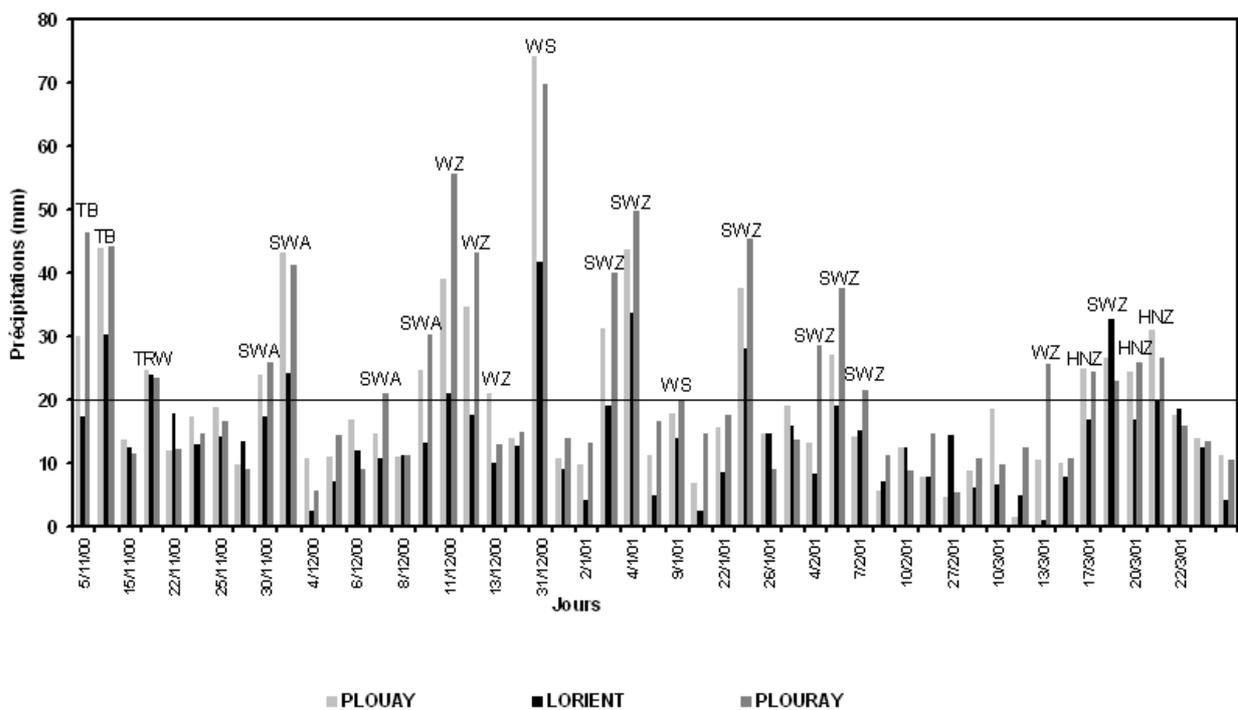


Figure 2.1.5. Précipitations quotidiennes à Plouay, Lorient et Plouray durant la saison froide 2000-2001 et types de circulations correspondants aux valeurs supérieures ou égales à 20 mm (Planchon *et al.*, 2009a).

La différence entre Lorient et les stations intérieures a été particulièrement marquée lors des journées ayant reçu au moins 20 mm, par exemple le 31 décembre 2000 (41,8 mm à Lorient, mais 74,1 mm à Plouay). La rugosité et l'effet orographique liés aux collines de l'amont du bassin accentuent ainsi fortement le caractère pluvieux des circulations de sud à ouest auxquelles l'ensemble du bassin est exposé. La comparaison des deux hivers très arrosés 2000-2001 et 2002-2003 a montré une différence plus importante en 2000-2003 entre les totaux pluviométriques mensuels à Lorient et aux stations intérieures. Compte tenu de l'exposition de l'ensemble du bassin au sud / sud-ouest, l'abondance des précipitations a été renforcée sur les stations intérieures durant l'hiver 2000-2001 (précipitations majoritairement liées à des circulations de sud) alors que la différenciation spatiale a été atténuée durant l'hiver 2002-2003 (précipitations majoritairement liées à des circulations d'ouest).

La méthode de classification de Hess-Brezowsky a permis de dresser une typologie des types de circulations pluvio-gènes hivernales sur le bassin-versant du Scorff en Bretagne occidentale. La part importante des précipitations liées aux circulations de sud à ouest est confirmée par la prise en compte des seules précipitations quotidiennes supérieures ou égales à 20 mm. La courte période de référence (2000-2004), regroupant des saisons froides aux caractéristiques différentes, permet de montrer aussi comment les contrastes pluviométriques spatiaux (côte-intérieur notamment) sont accentués lors des épisodes à circulations de sud ou sud-ouest. Ces résultats demandent toutefois à être confirmés

- par des séries de données plus longues ;
- par un réseau de stations plus nombreuses et couvrant un espace plus étendu ;
- par l'utilisation de la méthode objective de Hess-Brezowsky développée par James (2007).

2.1.2.2. Méthode objective : étude saisonnière en Bretagne occidentale et méridionale

La proportion de précipitations par GWT (méthode objective, période 1958-2005) calculée pour les stations de Bretagne occidentale et méridionale (Fig. 2.1.6.) confirme que les précipitations sont largement associées aux circulations d'ouest et de sud-ouest durant les mois de saison froide.

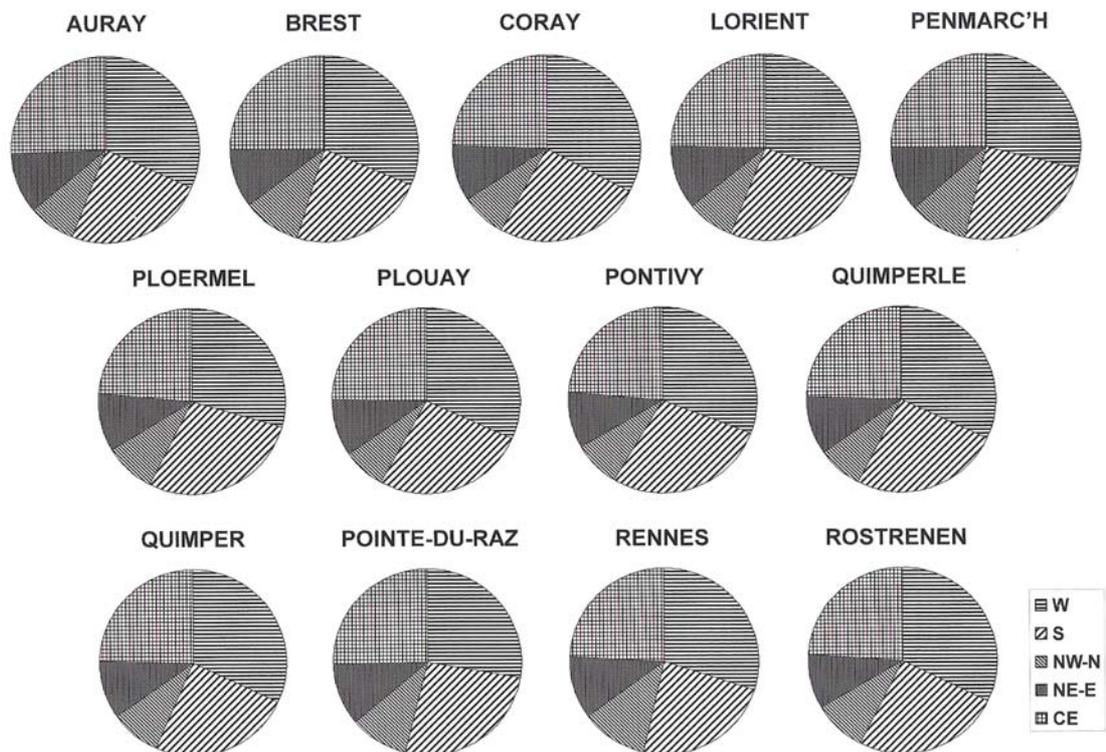


Figure 2.1.6. Proportion de précipitations calculée pour chaque GWT (novembre à mars 1958-2005), pour les stations de référence de Bretagne occidentale et méridionale. W: circulations d'ouest, S: circulations de sud, NW-N: circulations de nord-ouest et de nord, NE-E: circulations de nord-est et d'est, CE: situations à centre d'action sur l'Europe centrale (Planchon *et al.*, 2009b).

La proportion de précipitations associée aux circulations d'ouest et de sud, pour l'ensemble des stations de référence en Bretagne, était comprise entre 53.7 % à Penmarc'h et 58.6 % à Pontivy in 1958-2005. L'effet pluviogène généralisé de ces types de circulations sur l'ensemble de la Bretagne explique ces faibles variations d'une stations à l'autre, sans distribution spatiale organisée.

La proportion de précipitations quotidiennes ≥ 20 mm par GWT pour les mêmes stations (Fig. 2.1.7.) confirme l'importance pluviogène des circulations d'ouest et de sud durant la saison froide sur l'espace étudié. Cependant, les résultats font apparaître davantage de différences entre les stations, selon leur localisation et leur exposition aux systèmes perturbés.

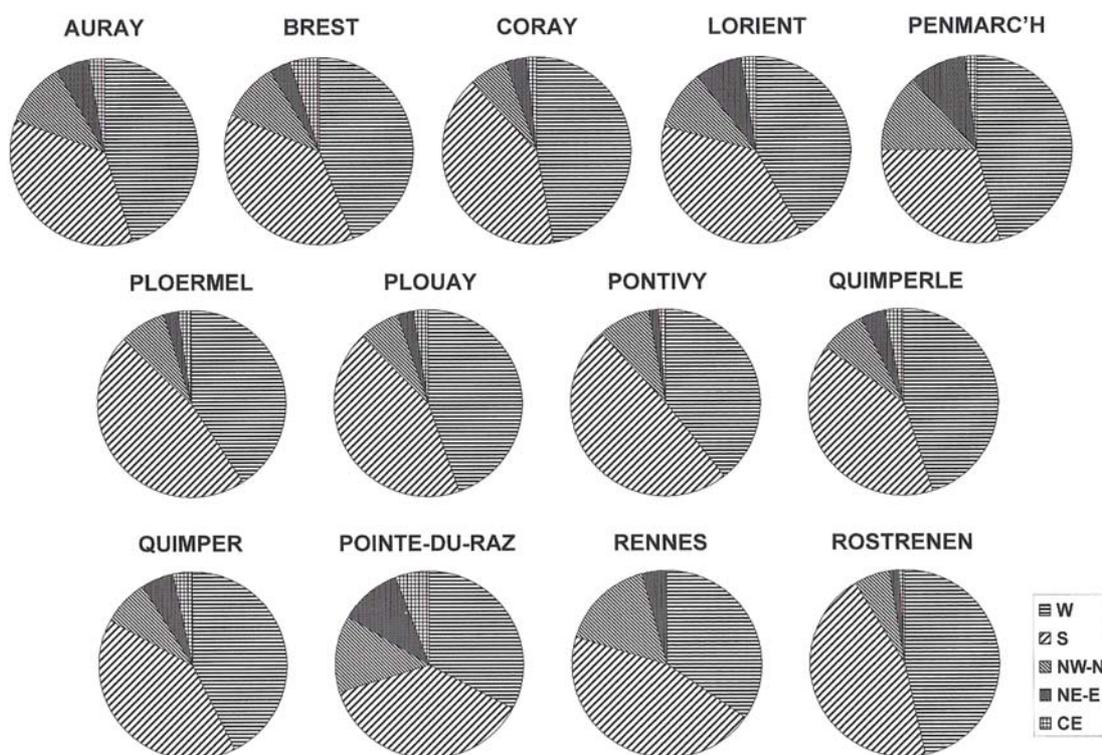


Figure 2.1.7. Proportion de précipitations ≥ 20 mm calculée pour chaque GWT (novembre à mars 1958-2005), pour les stations de référence de Bretagne occidentale et méridionale. W: circulations d'ouest, S: circulations de sud, NW-N: circulations de nord-ouest et de nord, NE-E: circulations de nord-est et d'est, CE: situations à centre d'action sur l'Europe centrale (Planchon *et al.*, 2009b).

La plupart des stations de référence ont enregistré entre 80 et 91 % de leurs précipitations abondantes en relation avec des types de circulations d'ouest et de sud, à l'exception des stations nettement moins arrosées, côtières (Lorient : 79.2 %, Penmarc'h : 75 %, Pointe-du-Raz: 70.1 %), de l'intérieur ou abritées (Rennes : 79.6 %). Les stations situées dans les régions de collines exposées à l'ouest ou au sud ont enregistré les proportions les plus élevées de précipitations abondantes par circulations d'ouest et de sud, notamment autour des Montagnes Noires et sur leur avant-pays à topographie ondulée, à l'ouest et au sud-ouest

(Rostrenen : 91.3 %, Coray : 88 %). Les stations côtières et celles situées dans les régions de collines, donc les plus exposées aux systèmes perturbés, ont enregistré les proportions les plus élevées de précipitations abondantes par circulations d'ouest (au moins 44 %), davantage que celles associées aux circulations de sud. En revanche, les précipitations abondantes étaient associées en priorité aux circulations de sud dans les vallées et les bassins relativement abrités des flux d'ouest, par exemple à Pontivy, Ploërmel et Rennes.

Une analyse similaire sur les précipitations abondantes (≥ 20 mm) a été effectuée pour chacun des 29 GWL et sur la période 1958-2005, afin d'identifier plus précisément les types de circulations fortement pluvieuses (Fig. 2.1.8).

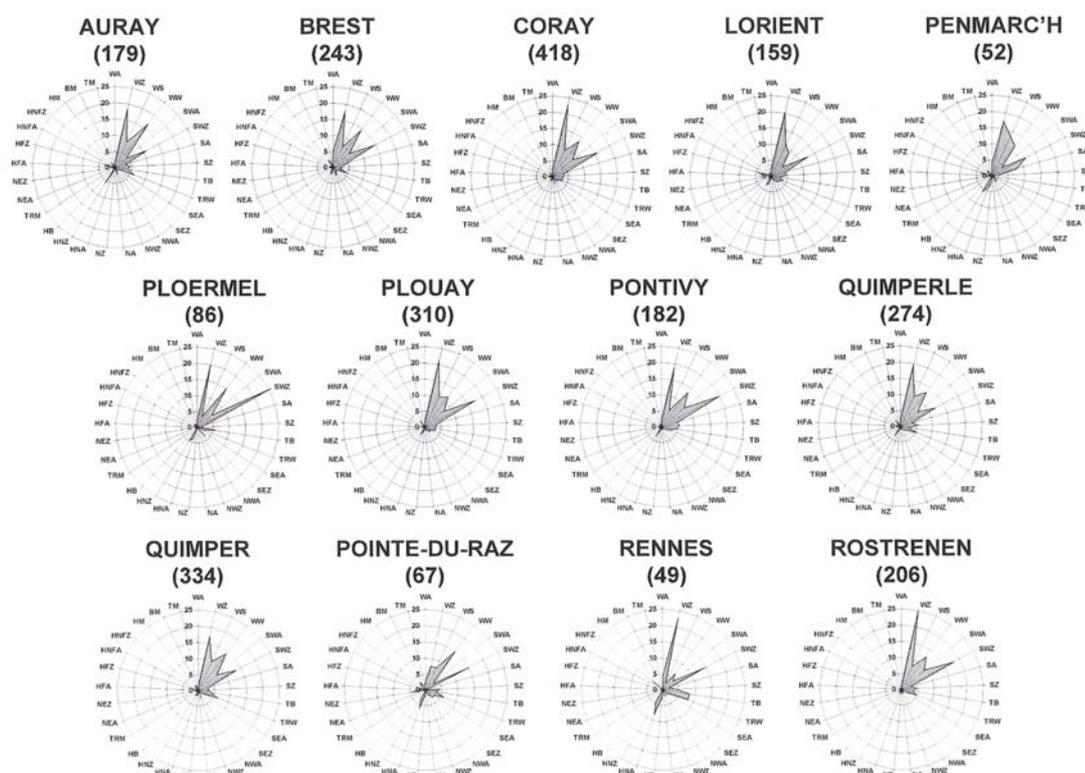


Figure 2.1.8. Proportion de précipitations ≥ 20 mm calculée pour chaque GWL (novembre à mars 1958-2005), pour les stations de référence de Bretagne occidentale et méridionale. W: circulations d'ouest, S: circulations de sud, NW-N: circulations de nord-ouest et de nord, NE-E: circulations de nord-est et d'est, CE: situations à centre d'action sur l'Europe centrale. (avec nombre total de jours avec précipitations ≥ 20 mm sur toute la période) (Planchon *et al.*, 2009b).

Pour toutes les stations de référence, la proportion la plus élevée de précipitations abondantes était associée aux circulations d'ouest perturbées (WZ, WW et WS) et secondairement aux circulations méridiennes de sud perturbées (SZ, TB and TRW). Ces résultats doivent toutefois prendre en compte la forte disparité entre les stations, concernant le nombre total de jours avec précipitations ≥ 20 mm. Les stations les moins arrosées, situées sur les caps exposés aux vents dominants (Penmarc'h, and Pointe-du-Raz) et dans les bassins abrités de l'intérieur (Rennes and Ploërmel) ont enregistré le plus faible nombre de jours de précipitations abondantes (moins de 100 jours), tandis que les stations situées au sud et au

sud-ouest des montagnes Noires (Coray, Plouay, Quimper) ont enregistré plus de 300 jours avec précipitations abondantes.

2.1.2.3. Méthode objective : la saison froide exceptionnellement pluvieuse de 2000-2001 réexaminée par la version objective de la méthode Hess-Brezowsky

Les résultats obtenus en utilisant le catalogue de la version objective de la classification de Hess-Brezowsky confirment les résultats obtenus avec la version subjective. La saison froide 2000-2001 a été marquée par une forte proportion de circulations d'ouest et de sud (69.5 % : Fig. 2.1.9a), les circulations de sud ayant été plus fréquentes (51 % de l'ensemble de tous les types de circulations) que celles d'ouest (18.5 %). La forte proportion de circulations de sud était liée à la fréquence élevée des circulations de type SWZ et TB (63.6 % des circulations de sud : Fig. 2.1.9b) et a fortement affecté l'importance relative des précipitations quotidiennes (Fig. 2.1.9c et 2.1.9d).

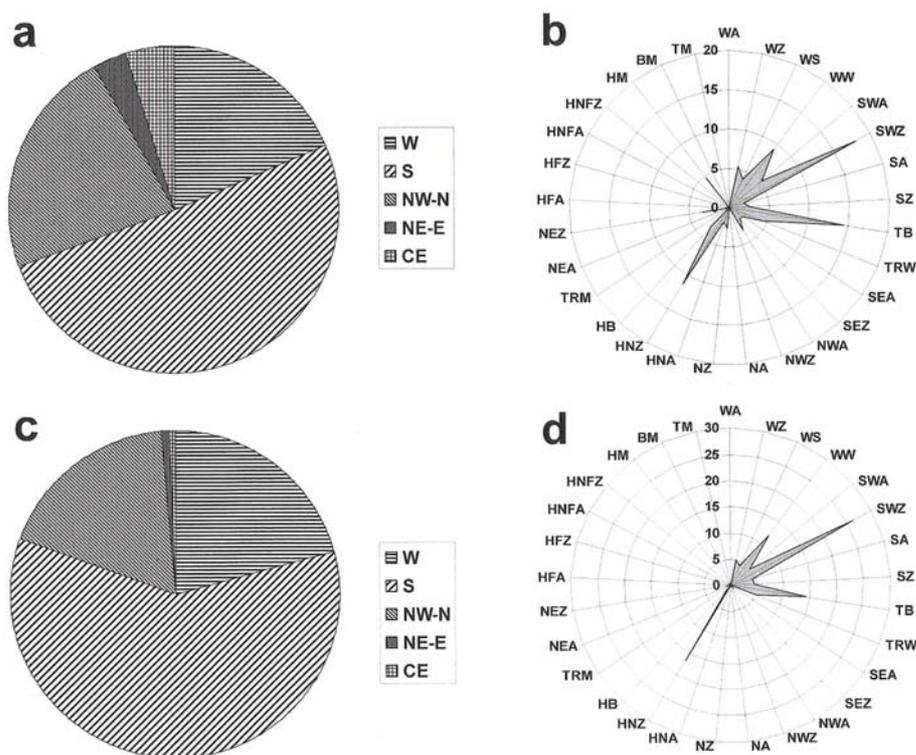


Figure 2.1.9. Proportion de GWT (a) et de GWL (b), et proportion de précipitations par GWT (c) et par GWL (d) pour la station météorologique de Lorient (Novembre 2000 à Mars 2001) (Planchon *et al.*, 2009b).

Légende des figures 2.9a et 2.9c (liste des GWT) : W: circulations d'ouest, S: circulations de sud, NW-N: circulations de nord-ouest et de nord, NE-E: circulations de nord-est et d'est, CE: situations à centre d'action sur l'Europe centrale.

Légende des figures 2.9b et 2.9d (liste of GWL) : voir tableau 1.1.

Durant la saison froide 2000-2001, la proportion de précipitations associées aux circulations d'ouest et de sud a atteint 80.5 % de l'ensemble de tous les types de circulations. En référence à la fréquence des GWT (Fig. 2.1.9a), 59,6 % des précipitations étaient associées aux circulations de sud dominantes, tandis que seulement 20.9 % des précipitations étaient

associées aux circulations d'ouest (Fig. 2.1.9b). Les circulations de sud-ouest cycloniques (SWZ) ont nettement été les types de circulations les plus fréquents durant la saison froide 2000-2001 (43.7 % de l'ensemble des circulations du sud et 26 % de l'ensemble de tous les types de circulations : Fig 2.1.9d). Les circulations méridiennes associées à un centre de basses pressions de surface sur les Îles Britanniques (TB) constituaient le second GWL le plus pluvigène parmi les circulations de sud (14.2 % de l'ensemble de tous les GWL). L'essentiel des précipitations a été associé à de longues séquences de circulations de sud, de novembre à janvier.

2.1.3. Conclusion

Les résultats obtenus sur le lien entre les précipitations et les types de circulations définis par la version *subjective* de la méthode de classification de Hess-Brezowsky sont confirmés par l'utilisation de sa version *objective*. Ces derniers résultats montrent clairement que la classification de Hess-Brezowsky est pertinente et efficace pour identifier les types de circulations atmosphériques pluvigènes, et produisant des précipitations abondantes, sur l'ouest de la France, la Bretagne ayant ici fait l'objet d'espace « test ». Les résultats obtenus à l'aide des deux versions montrent que la proportion la plus élevée de précipitations est associée aux circulations d'ouest et de sud, et confirment donc des observations bien connues en Europe occidentale. Ces résultats permettent donc de justifier l'utilisation de la classification de Hess-Brezowsky en dehors de son aire initiale d'utilisation, l'Europe centrale ; l'Europe atlantique étant une aire d'application fiable et à développer. L'étude plus fine menée sur la saison froide 2000-2001 fait nettement ressortir individuellement les types de circulations atmosphériques les plus significativement pluvigènes, eux aussi déjà bien connus dans la littérature.

En permettant d'identifier les types de circulations pluvigènes sur l'ouest de la France, la classification de Hess-Brezowsky pourrait ainsi être une aide à la classification des événements pluvieux et fortement pluvieux, et aider à en proposer une typologie. La variabilité interannuelle de la fréquence des GWT et GWL et son impact sur la proportion des fortes précipitations depuis la fin du XIX^e siècle seront examinés à partir de la deuxième année de ce programme en cours. La longue durée du catalogue des GWL proposé par P. James dans le cadre du programme COST-733 a rendu possible une étude en connexion avec les préoccupations liées au changement climatique, mais l'étude de l'évolution des types de circulations pluvigènes dans le long terme nécessite un inventaire et un examen détaillé des séries de données pluviométriques existant dans les régions concernées depuis le XIX^e siècle. La typologie des événements pluvieux en relation avec les GWL et leurs effets sur la distribution spatiale des précipitations a été proposée en tenant compte des liens avec les événements hydrologiques (crues).

Publications communes précipitations, crues et inondations :

Voir pages 22 & 23

2.2. Crues et inondations

2.2.1. Introduction

Rappel du texte de la proposition :

Le lien entre les événements météorologiques et hydrologiques sera analysé à l'aide de longues séries de données coïncidant avec la chronique disponible dans le catalogue des GWL. L'analyse permettra d'identifier les événements hydroclimatiques passés, leur fréquence et leur variabilité spatiale pour plusieurs cours d'eau de l'Ouest sur cette longue période. Des analyses statistiques seront effectuées en utilisant les hydrogrammes de crues, les séries de données pluviométriques, afin d'identifier la stationnarité ou la non-stationnarité des événements hydrologiques, et afin d'identifier les changements dans les régimes pluviométriques ou de la fonction de transfert pluie-débit.

Les travaux effectués sur les crues et inondations ont consisté en premier lieu à tester les versions « subjective » et « objective » de la méthode Hess-Brezowsky des types de circulations dans le cadre de plusieurs événements hydro-climatiques. Ce test de la classification a été effectué sur la saison hivernale et printanière.

2.2.2. Analyse des crues de printemps-été et des types de temps

2.2.2.1. Types de circulations et crues de printemps dans le bassin versant de la Vilaine

D'un point de vue hydrologique, le bassin étudié est celui de la Vilaine qui correspond au plus important bassin hydrographique du Massif Armoricain (Fig. 2.2.1.). D'une superficie de 11400 km² son importance induit certainement une complexité spécifique des crues notamment dans la partie aval du bassin liée aux arrivées successives des affluents modifiants ainsi l'onde de crue qui se propage de l'amont vers l'aval. Cette horloge des crues sur un tel bassin est dépendant du type de circulations produisant les événements pluvieux et leur distribution spatiale sur le bassin versant. Par exemple, lors de pluies liées à des circulations de sud-ouest, la partie aval du bassin reçoit les fortes pluies, le bassin amont de la Vilaine au nord-est est arrosé plus tardivement. Les affluents de l'aval du bassin enregistrent donc une crue plus précocement que ceux de l'amont. Si les crues les plus importantes sont enregistrées en hiver, les crues de printemps sont également bien présentes dans les séries hydrologiques disponibles.



Figure 2.2.1. Positionnement du bassin d'étude en Bretagne (Planchon et Dupont, 2008).

L'intérêt de ce bassin réside dans la présence des seules longues séries de mesure disponibles au niveau du massif armoricain en dehors de celles effectuées au droit du barrage de Guerlédan en centre Bretagne. Or pour la seconde partie de ces recherches sur les longues séries il était important de choisir en premier lieu les stations hydrologiques possédant les plus longues séries de mesures. La station de Guipry présente au centre du bassin permet ainsi de travailler sur des données couvrant la période 1930-2002. De plus, la Vilaine étant canalisée pour la navigation une mesure quasi systématique des crues a été effectuée sur certaines écluses depuis le XIX^e siècle. Cette base de données n'est pas exhaustive. Pour le XIX^e siècle les données disponibles sont éparées mais nous disposons de mesures à partir de 1820 et 119 crues sont enregistrées, la fin du siècle étant particulièrement bien renseignée. Pour le XX^e siècle les deux périodes correspondant aux guerres mondiales sont souvent exemptes de données. Ces données mesurées aux écluses correspondent à des hauteurs d'eau mesurées à des pas de temps de deux heures et seulement pendant la crue, le début et la fin de l'événement n'est pas toujours bien visible, nous avons essentiellement la pointe de crue.

La période printanière n'est pas à proprement parler la saison qui comporte les plus fortes crues provoquant des inondations dommageables dans le massif armoricain. Cette saison a été choisie car elle présente, d'un point de vue climatique, un panel de circulations très différentes. Cette diversité de circulations pluvio-gènes susceptibles d'entraîner un événement hydrologique a permis d'étudier le lien entre un type de circulation et un comportement hydrologique de la rivière en période de crue.

Les crues sélectionnées se sont produites entre avril et juin, la période d'analyse correspond à 1958-2002. Les crues ont été sélectionnées à partir de la base de données "écluses". Pour chaque crue de printemps identifiée, les types de circulation sur les 3 jours de pluies consécutifs précédant la pointe de crue ont été qualifiés à partir des deux méthodes de classification. Dans un deuxième temps chaque crue a été classée en fonction du type de circulation pluvio-gène. Pour chaque hydrogramme de crue un profil de montée a été effectué. A noter que dans un bassin de cette taille et dans le cas de ces rivières à régime océanique, de nombreuses crues possèdent plusieurs pointes de crues consécutives. Nous avons sélectionné des hydrogrammes à une seule pointe bien identifiée pour faciliter le lien entre événement pluvieux "déclencheur" et pointe de crue.

Avec la classification de Hess-Brezowsky les crues de printemps sont déclenchées par quatre grandes familles de circulations (Fig. 2.2.2.) :

- Sud ;
- Ouest ;
- Nord-Ouest et Nord ;
- Nord-Est.

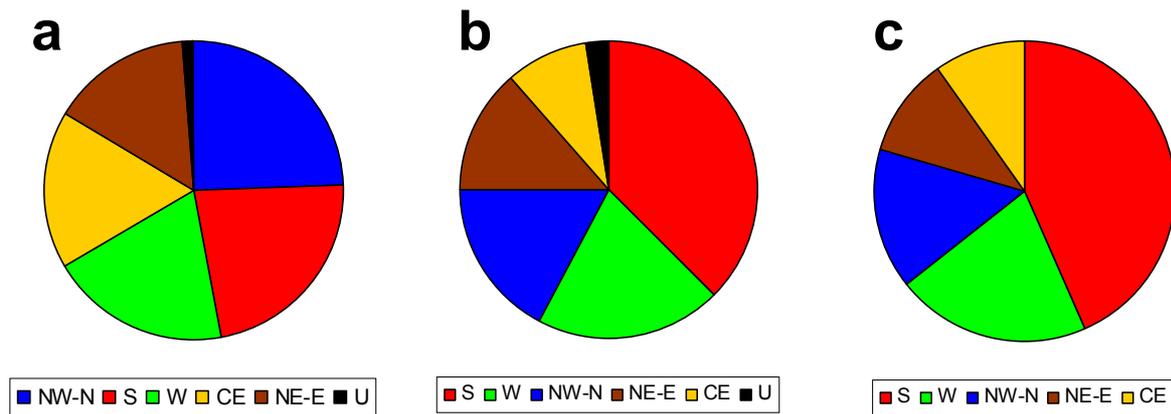


Figure 2.2.2. Lien entre les types de circulations principaux (Grosswettertypen : GWT), les précipitations et les crues de printemps (Avril-Mai-Juin, période 1958-2002) (Planchon et Dupont, 2008) :

a) proportion de GWT ; b) proportion de précipitations à Rennes-Saint-Jacques pour chaque GWT ; c) proportion de GWT pour les trois jours précédant chaque événement de crue.

W : circulations d'ouest, S : circulations de sud, NW-N : circulations de nord-ouest et de nord, NE-E : circulations de nord-est et d'est, CE : situations à centre d'action sur l'Europe centrale.

L'analyse des profils de crues lors des périodes de montée (Fig. 2.2.3.) indique que les circulations de sud provoquent des crues de montée lente et progressive avec un débit de pointe élevé. Les circulations d'ouest engendrent des crues à profil très variable fortement dépendant de l'état de saturation du bassin avant l'événement pluvieux analysé ici. Contrairement aux circulations de sud, l'analyse des 3 jours consécutifs avant la crue ne semble pas suffisante pour caractériser l'événement hydrologique. Pour les circulations de nord-est, la faiblesse du nombre de cas ne permet pas de dégager un lien entre profil et circulation. Enfin, dans le cas des pluies liées à la présence d'un centre d'action sur l'Europe centrale, les crues déclenchées montrent des vitesses de montée rapides expliquées par les fortes intensités.

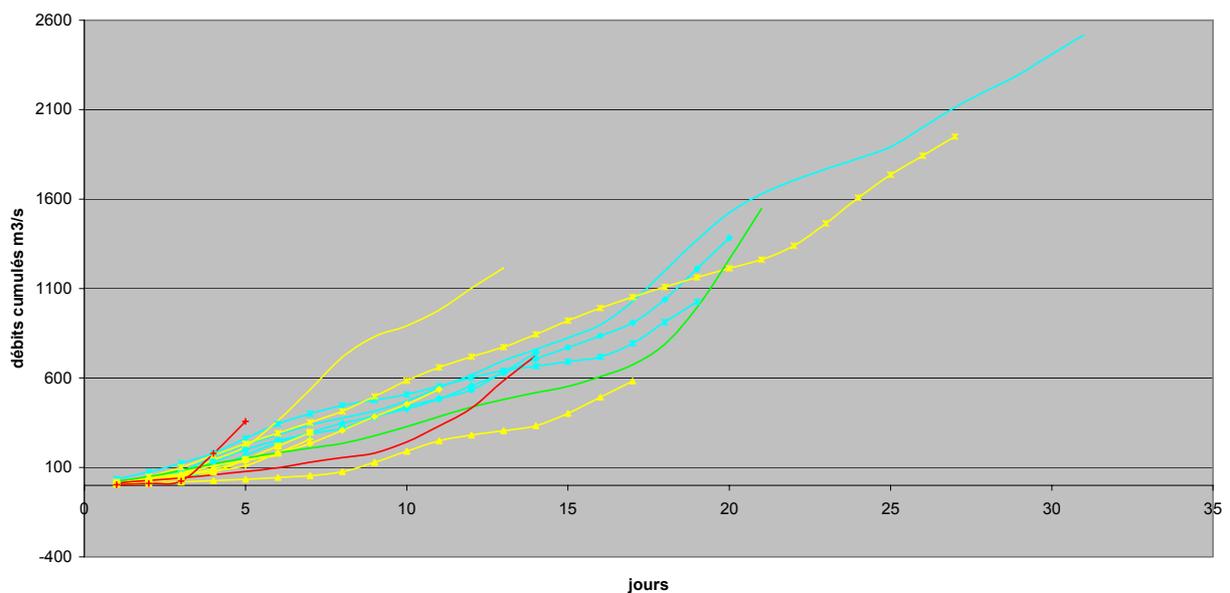


Figure 2.2.3. Profils de vitesse de montée dans le cas de la classification Hess-Brezowsky, en bleu circulation de sud, en jaune circulation d'ouest et en rouge centre d'action sur l'Europe centrale (Planchon et Dupont, 2008).

Dans le cas de la classification de James, trois familles de circulations ont été étudiées :

- Circulation d'Ouest ;
- Circulation de Sud ;
- Circulation de Nord.

Si les circulations de nord induisent des crues à profil semblables avec des montées rapides et des crues de courtes durées il n'en est pas de même pour les deux autres types. La présence de nombreuses crues polygéniques rend l'analyse complexe. L'analyse des circulations doit donc être effectués sur un pas de temps avant la pointe de crue plus long.

2.2.2.2. *Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « crues rapides » dans le nord de la France (Bassin Parisien)*

Des « crues rapides » caractérisées par des écoulements torrentiels fortement chargés en matériaux issus de l'érosion des sols, sont fréquemment observées en période printanière et estivale dans les régions de grande culture du nord de la France (Bassin Parisien). Ce sont des événements hydrologiques à la fois rapides et violents qui se manifestent sur des petits bassins versants ruraux (< 40 km²) dont l'une des particularités est de ne pas toujours présenter des écoulements pérennes (Delahaye, 2002). Pour mieux cerner ces événements, une précédente étude (Douvinet, 2006) a été réalisée sur huit départements (Calvados, Eure, Seine-Maritime, Somme, Oise, Nord, Pas-de-Calais et Aisne) : 83 épisodes pluvieux ont provoqué, entre mai et août inclus, 277 phénomènes de « crues rapides » sur 191 bassins versants (1983-2005 : Fig. 2.2.4.).

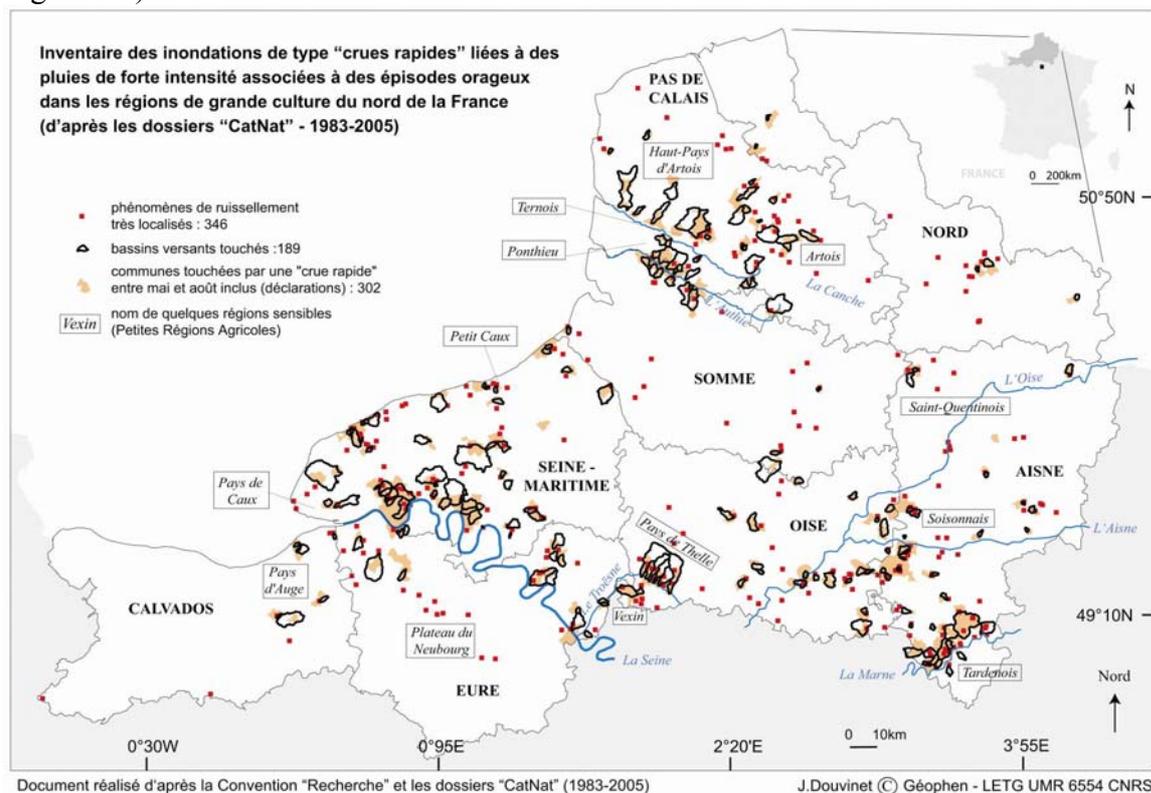


Figure 2.2.4. Inventaire des inondations de type « crues rapides » liées à des pluies de forte intensité associées à des épisodes orageux dans les régions de grande culture du nord de la France (Douvinet *et al.*, 2009, d'après les dossiers « CatNat », 1983-2005).

A l'origine de ces crises hydrologiques sont associés différents types d'épisodes pluvieux. Les cumuls de pluies, élevés pour ces régions (> 50 mm), tombent sur une durée relativement

courte (< 1 h) mais peuvent aussi s'étaler sur un pas de temps plus long (jusqu'à 6 h). La dynamique de ces abats pluviométriques générant des « *crues rapides* » n'a jamais fait l'objet d'une étude à échelles spatiales et temporelles fines dans cet espace géographique. La démarche retenue repose sur une analyse à deux niveaux : i) une approche descriptive de la distribution des pluies de fortes intensités sur un réseau de 85 stations en utilisant une méthode d'échantillonnage dite « *sup-seuil* », puis ii) une analyse explicative des types de circulations qui en sont à l'origine suivant la méthode de Hess-Brezowsky.

L'analyse des types de circulations montre une grande variabilité dans le temps et dans l'espace des « *précipitations à risques* » mais permettent aussi d'identifier les caractéristiques des situations météorologiques qui en sont à l'origine (Fig. 2.2.5). En référence aux trois classes principales (zonal, mixte, méridien), et pour l'ensemble des mois étudiés (mai à août), près des deux tiers des épisodes sont liés à des circulations méridiennes (carton 2.1.a) alors qu'habituellement ce GWL représente 42% des cas sur cette période de l'année (carton 2.1b). Cette sur-représentation traduit le caractère très pluviogène des circulations méridiennes. Le classement en cinq GWT fait lui ressortir, à parts presque égales, trois configurations principales : 27,8 % des épisodes pluvieux sont associés aux circulations de nord-ouest et nord, 26,4 % aux circulations de sud et 23,6 % aux circulations de nord-est et est.

Les 83 épisodes pluvieux sont associés pour l'essentiel (70,8 %) à des situations à centre dépressionnaire situé au large de l'Europe occidentale, en premier lieu à proximité des îles Britanniques, et secondairement à proximité du Portugal. Simultanément, un centre de hautes pressions de surface se situe sur l'Europe du Nord et/ou centrale. Mois par mois, les épisodes fortement pluvieux associés aux circulations méridiennes représentent plus de la moitié du total des événements, avec un maximum en mai (86,4 %, carton 2.1.b).

Ces circulations méridiennes de printemps sont liées au développement de situations à *talweg d'altitude* (bas géopotentiels) aux latitudes moyennes. Ces situations météorologiques ont une forte influence sur la cyclogenèse et les précipitations printanières sur l'Europe occidentale ; les espaces touchés par les fortes précipitations dépendant de la position en longitude de l'axe du talweg (Moron, 1990 ; Planchon, 2005). En été, le courant perturbé redevient plus fréquemment zonal, même s'il est lent et relativement haut en latitude. De fortes précipitations orageuses, sous la forme soit de cellules isolées, soit de fronts actifs, peuvent se produire sur l'espace étudié en fonction du type de circulation et de la trajectoire des perturbations (Doswell *et al.*, 1996 ; Delahaye, 2003). Les systèmes frontaux déclenchent des phénomènes orageux sur une plus grande extension spatiale. La proportion d'événements fortement pluvieux pour chaque GWT, calculée mois par mois, permet non seulement de faire ressortir plus en détail les types de circulations générateurs de fortes pluies sur l'espace étudié, mais aussi d'en examiner l'évolution saisonnière.

Au printemps, les circulations perturbées de sud, marquées en particulier par une position préférentielle des talwegs d'altitude à l'ouest du méridien-origine et des basses pressions de surface positionnées à proximité des îles Britanniques, caractérise les situations à anomalies pluviométriques positives sur l'ouest de la France, par exemple en mai 1981 (Planchon, 2005). De mai à juillet, l'augmentation de la proportion des fortes pluies associées aux circulations de nord-ouest à nord et d'ouest au détriment de celles de sud est à relier à l'évolution saisonnière habituelle de la circulation d'échelle synoptique décrite plus haut (réactivation de la circulation d'ouest en été). Par exemple, les événements pluvio-orageux du 16 juin 1997 en Normandie, liés à une circulation zonale perturbée d'ouest (WZ) ont été suivis par une succession de systèmes perturbés sur l'Europe moyenne qui ont provoqué, début juillet, des événements hydroclimatiques extrêmes sur le bassin de l'Oder.

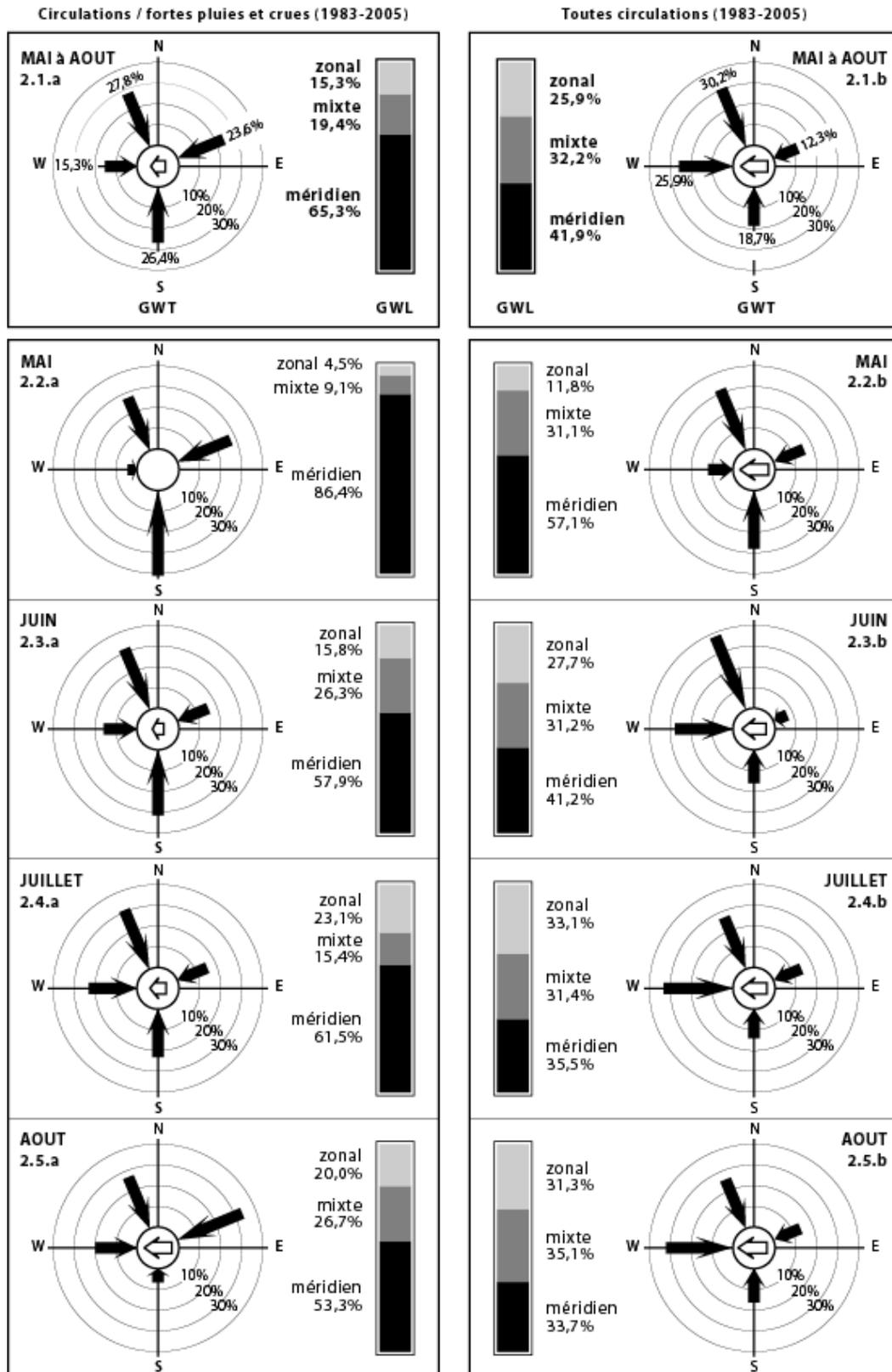


Figure 2.2.5. Proportion d'événements fortement pluvieux ayant généré des « crues rapides » dans le nord du Bassin Parisien (1983-2005), pour chaque classe principale de GWL et pour chaque GWT (colonne de gauche) ; puis comparaison avec l'ensemble des circulations atmosphériques sur la même période (colonne de droite). Représentation des 5 classes de GWT sous forme de flèches noires orientées (W ; NW et N ; NE et E) et d'une flèche blanche au centre de la rose des vents pour les situations à centre d'action sur l'Europe Centrale (EC) (Douvinet *et al.*, 2009).

L'importance prise par les circulations de nord-est et d'est en août (33,3 % contre 13,2 % en moyenne, cartons 2.5a et b) illustre le cas des situations à hautes pressions de surface centrées sur l'Europe du Nord s'opposant à la progression vers le nord-est des systèmes perturbés liés à un centre de basses pressions généralement situé sur le proche Atlantique. Le contact entre les deux masses d'air générateur d'orages se produit dans ce cas sur le nord de la France (Cantat, 2005). Ainsi les pluies violentes, plus fréquentes en début d'été (juin/juillet) sur la partie sud-ouest de la zone d'étude, tendent à se décaler vers le nord au mois d'août.

2.2.3. Analyse des circulations hivernales

La plupart des épisodes de crues et d'inondations dans l'ouest de la France se produisent durant la période de hautes eaux de saison froide, de septembre à mars. Les événements météorologiques pluviogènes provoquant les crues et inondations dans l'ouest de la France en saison froide sont relativement homogènes et de large extension spatiale. Cependant, les petits bassins versants bretons (tel celui du Scorff déjà évoqué par exemple) peuvent être soumis à des temps de réponse hydrologiques courts. Les bassins versants aux reliefs les plus élevés et aux pentes les plus fortes dans leur partie amont, sont habituellement soumis à un temps de réponse d'environ 10 heures, avec une durée de retour supérieure à la décade (par exemple la bassin versant de l'Odet, à l'ouest de celui du scorff : Dupont *et al.*, 2008). Ces bassins versants à pentes relativement fortes répondent rapidement aux épisodes de précipitations abondantes, surtout dans les collines de leur partie amont, exposées sud à ouest et imposant une intensification des précipitations par effet orographique, tel que cela a pu être montré sur le bassin du Scorff (Planchon *et al.*, 2009a-b). Les analyses effectuées à partir du classement des GWT et GWL ont montré clairement que l'essentiel des précipitations hivernales est lié aux circulations d'ouest et de sud, l'application du seuil minimal de 20 mm/jour confirmant ces résultats.

Les régions de l'ouest de la France, comme plusieurs autres régions d'Europe occidentale et centro-occidentale (Berlamont, 1995 ; Drogue *et al.*, 2006), ont subi de sérieuses crises hydrologiques hivernales associées à des épisodes durablement et intensément pluvieux depuis la dernière décennie du XX^e siècle : en 1993, 1995, 1997, 2003 et, plus particulièrement, durant la saison froide 2000-2001. Plusieurs auteurs ont fait ressortir une augmentation des précipitations hivernales en Europe de l'ouest, liées à une fréquence plus élevée des types de circulations d'ouest (Bárdossy and Caspary, 1990) et une augmentation du nombre de dépressions extra-tropicales sur l'Europe du nord-ouest (Bartholy et al., 2006) durant la deuxième moitié du XX^e siècle. L'augmentation concomitante de l'intensité des précipitations observée en Grande Bretagne (Osborn and Hulme, 2002 ; Maraun et al., 2008) est un phénomène beaucoup plus complexe à étudier aux échelles régionales et locales, mais qui pose évidemment question quant à la poursuite des travaux sur ce sujet.

La saison froide 2000-2001, plus particulièrement étudiée, correspond, au niveau hydrologique, à une saison particulièrement remarquable : entre 4 et 5 crues exceptionnelles ont été enregistrées sur l'ensemble des cours d'eau bretons. Ces événements correspondent, pour certains bassins, au maximum enregistré sur les stations depuis les années soixante. Les hydrogrammes de crues enregistrés lors de la saison froide 2000-2001 indiquent des comportements plus rapides que dans le cas des événements précédents (par rapport aux événements de 1995 notamment : Dupont *et al.*, 2008). Cependant, le lien observé entre circulations de sud et comportements hydrologiques doit être précisé dans la suite des travaux. D'un point de vue hydrologique, la fin du XIX^e siècle a été marquée par plusieurs événements

remarquables qui pour certains indiquent des niveaux d'eau depuis jamais atteint. Cette succession d'événements pourrait être comparée à la période 1990-2001

Cependant, si les résultats sur l'analyse des précipitations hivernales ont confirmé la robustesse de la classification de Hess-Brezowsky, le lien avec les événements hydrologique est d'autant plus difficile à établir que l'on est confronté à des crues lentes de saison froide, pour des raisons de temps de réponse des cours d'eau aux épisodes pluvieux (et ce d'autant plus que les bassins versants concernés sont étendus : par ex. le bassin de la Vilaine).

2.2.4. Publications : précipitations, crues et inondations

Douvinet, J., Planchon, O., Cantat, O. et Delahaye, D., 2008 : Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « crues rapides » dans le nord de la France (Bassin Parisien). *Actes du 21^e colloque de l'AIC*, Montpellier, 207-213.

Dupont, N., Planchon, O., Cador, J.M., Delahaye, D. et Douvinet, J., 2008 : Types de circulations atmosphériques et de crises hydrologiques dans le nord-ouest de la France : approches croisées de risques liés au climat, In Lamarre, D.: *Climat et Risques : changements d'approches*, Collection SRD (Lavoisier Ed., Paris), chap. 5, 63-92, 2008.

Planchon, O. et Dupont, N., 2008 : Identification of spring weather patterns causing floods in the East of Brittany (France), *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-09846, 3 pp. Poster Programme NH1.2 – Extreme events induced by weather and climate change : evaluation, forecasting and proactive planning. EGU General Assembly 2008, Vienna (Wien), 13-18 avril 2008.

Quénol, H., Planchon, O., et Corgne, S., 2008 : Interest of the Hess-Brezowsky classification of circulation patterns in the analysis of rainy winters in Brittany (France), *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-01279, 2 pp. Poster Programme NH1.2 – Extreme events induced by weather and climate change : evaluation, forecasting and proactive planning. EGU General Assembly 2008, Vienna (Wien), 13-18 avril 2008.

Planchon, O., Quénol, H., et Corgne, S., 2008 : Apport de la classification de Hess-Brezowsky pour la typologie des types de circulations pluvio-gènes hivernales en Bretagne occidentale, *Actes du XXI^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Montpellier (France), 527-532, 2008.

Douvinet, J., Planchon, O., Cantat, O., Delahaye, D., Cador, J.-M., 2009 : Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des "crues rapides" dans le Bassin Parisien (France). *Climatologie*, 6, 47-72.

Planchon, O., Quénol, H. et Corgne, S., 2009a : Assessing precipitation and large-scale weather situations in Brittany : the usefulness of the Hess-Brezowsky classification. *Die Erde*, 140 (2), 1-27.

Planchon, O., Quénol, H., Dupont, N. et Corgne, S., 2009b : Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1161-1173. Accès en ligne sur <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1161/2009/nhess-9-1161-2009.html>

Autres références citées

Bárdossy, A. et Caspary, H.J., 1990 : Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 155-167.

Bartholy, J., Pongrácz, R. et Pattanyús-Ábrahám, M., 2006 : European cyclone track analysis based on ECMWF ERA-40 data sets. *International Journal of Climatology*, 26, 1517-1527.

Osborn, T. et Hulme, M., 2002 : Evidence for trends in heavy rainfall events over the UK. *Philosophical Transactions*, 360 (1796), 1313-1325.

Berlamont, J.E., 1995 : Extreme floods in “the heart of Europe”: the case of the 1995 Meuse flood. *U.S. - Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts, and Management of Extreme Floods*, Perugia (Italy), 6 p.

Cantat, O., 2005 : Normandie : terre de contrastes. Conséquences hydrologiques et environnementales d'un climat tempéré mais pas sans contrastes... *Journées 2005. Hydrosystèmes normands*, Comité National Français de Géographie, Commission « Hydrosystèmes continentaux », 22-42.

Carluer, N. and De Marsily, G., 2004 : Assessment and modelling of the influence of man-made networks on the hydrology of a small watershed: implications for fast flow components, water quality and landscape management. *Journal of Hydrology*, 285, 76-95.

Cheverry, C., 1998 : *Agriculture intensive et qualité des eaux*. INRA Ed., Versailles, 298 p.

Delahaye D., 2002 : *Apport de l'analyse spatiale en géomorphologie - modélisation et approche multiscalaire des risques*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, 2 tomes, Laboratoire Modélisation et Traitements Graphiques (MTG) Université de Rouen, 250 p.

Delahaye, D., 2003 : Du ruissellement érosif à la crue turbide en domaine de grande culture. Analyse spatiale d'un phénomène complexe. *BAGF*, 3, 287-301.

Doswell, C.A., Brooks H.E. et Maddox, R.A., 1996 : Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 11 (4), 560-581.

Droque, G., Wagner, C. et Pfister, L., 2006 : Quantification spatiale du changement de régime pluviométrique hivernal dans le bassin Rhin-Meuse. *Actes du XIX^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Epernay (France), 202-207.

Douvinet, J., 2006 : Intérêts et limites des données « CatNat » pour un inventaire des inondations. L'exemple des « crues rapides » liées à de violents orages (Bassin Parisien, Nord de la France). *Norvois*, 201, pp. 17-30.

Maraun, D., Osborn, T.J. et Gillett, N.P., 2008 : United Kingdom daily precipitation intensity: improve early data, error estimates and an update from 2000 to 2006. *International Journal of Climatology*, 28 (6), 833-842.

Moron, V., 1990 : *Contribution à l'étude de la variabilité climatique mensuelle en Europe*. Mémoire de D.E.A. (non publié), Université de Bourgogne, Dijon 75 p.

Moussa, R., Voltz, M. et Andrieux, P., 2001 : Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16, 393-412.

Planchon, O., 2005 : Les printemps pluvieux des années 1980: retour sur une particularité météorologique et climatique de la fin du vingtième siècle en Europe occidentale. *Actes du 18^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Gênes (Italie), 349-352.

2.3. Risque « Gel » : types de temps et gelées printanières dans les vignobles du nord de la France

2.3.1. Introduction

2.3.1.1. Rappel du texte de la proposition

L'identification et l'analyse fréquentielle des types de circulations générant les types de temps à gel tardif sur les espaces viticoles et arboricoles de l'Ouest et du bassin parisien (ex : Val de Loire) devra s'accompagner de mesures (climatiques et agronomiques) précises sur les terrains d'étude. Les résultats obtenus seront confrontés aux résultats des simulations proposés pour la fin du XXI^e siècle, afin de tenter d'adapter les scénarios de changement climatique aux échelles fines. L'objectif est de mettre en évidence les caractéristiques de la variabilité interannuelle des situations météorologiques à gel tardif à l'échelle des terroirs et des parcelles et d'en rechercher les éventuelles tendances dans le contexte du changement climatique global.

2.3.1.2. Problématique viticole et plan de travail

Au printemps, la reprise de l'activité végétative de la vigne (débourrement) engendre une sensibilité croissante du végétal aux faibles températures. L'influence du type de circulation atmosphérique et de la dynamique des masses d'air, de la topographie, des caractéristiques environnementales et les différents degrés de vulnérabilité de la vigne font que les dommages liés au gel printanier sont très variables sur des espaces relativement restreints (Cellier, 1989 ; Quénot, 2002). Même si les analyses statistiques des températures de ces dernières décennies montrent une tendance à la diminution des situations printanières froides, le risque gélif n'en est pas moins amoindri. En effet, les températures plus douces engendrent une précocité de la reprise végétative et par conséquent une plus grande vulnérabilité de la vigne.

Ainsi, l'analyse des types de circulations atmosphériques en situations gélives et la répartition interannuelle et intra-saisonnière des températures minimales permet d'améliorer les connaissances sur la variabilité du risque gélif dans les vignobles de la moitié nord de la France en relation avec les types de circulations atmosphériques.

La fréquence des types de circulations atmosphériques (classification de Hess-Brezowsky, méthode objective) associées aux épisodes gélifs pour les mois de printemps (mars, avril, mai) entre 1960 et 2007 a permis de déterminer le contexte synoptique d'occurrence des types de temps favorables aux gelées printanières. L'étude a été réalisée pour quatre vignobles de la moitié nord de la France : Val de Loire (Saumur, Angers), Champagne (Reims), Bourgogne (Dijon) et Alsace (Colmar). Les types de temps à risque gélif ont ensuite été analysés à l'aide d'une procédure automatique de traitement des paramètres météo-climatiques, prenant en compte leur durée, intensité et fréquence, et testée en premier lieu sur les stations d'Angers et Dijon, situées à peu près à la même latitude et dont la comparaison permet de faire ressortir les effets de la continentalité.

2.3.2. Types de circulations atmosphériques en situations gélives

L'analyse des cas où toutes les stations ont une température minimale inférieure à 0°C montre que plus de 40% d'entre eux sont associés à des circulations atmosphériques de Nord et de Nord-Ouest, 27% à des circulations de Nord-Est et Est et 16% à des situations à centre d'action sur l'Europe Centrale. Ces situations apportent des conditions anticycloniques calmes

favorables au refroidissement de type radiatif ou des masses d'air froid provenant de l'Europe du Nord ou de l'Est (Fig. 2.3.1).

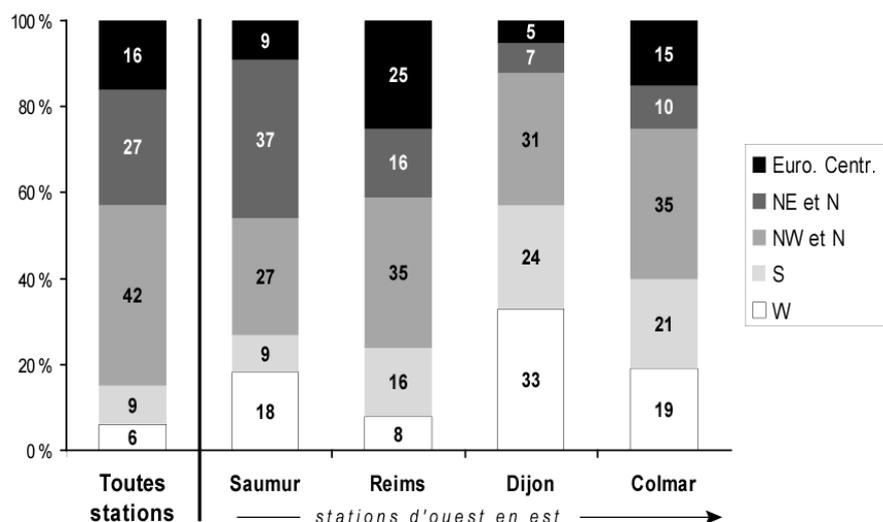


Figure 2.3.1. Fréquence de types de circulations avec $T_n < 0^\circ\text{C}$ pour toutes les stations confondues et pour chaque station (suivant la classification de Hess-Brezowsky) (Planchon *et al.*, 2009).

Les vignobles de l'est de la France, de part leur position plus à l'intérieur des terres et leurs caractéristiques topographiques (fossés d'effondrement) sont soumis à des gelées nocturnes même avec une circulation de secteur Ouest et Sud. En revanche, les possibilités de gelées à Saumur et Angers, du fait de leur position géographique dans l'ouest de la France, nécessitent davantage l'intervention de masses d'air froid capables de provoquer des gelées généralisées sur l'ensemble de la moitié nord de la France (circulations de Nord-Est à Est). La forte proportion de circulation d'ouest et de sud pour Colmar et Dijon est liée à l'effet combiné de la continentalité et des caractéristiques topographiques de ces stations. Dans les fossés d'effondrement de l'est du pays, après le passage à une circulation d'ouest ou de sud, l'air doux glisse au-dessus de la pellicule d'air froid qui s'est formée dans les très basses couches, permettant la persistance de gelées en plaine. Situées dans des régions mieux ventilées, Reims et Saumur réagissent rapidement aux redoux. Cette particularité, visible en prenant en compte les journées de gel par situations anticycloniques (Fig. 2.3.2.) l'est davantage encore en ne retenant que les journées à températures minimales inférieures à -5°C (Fig. 2.3.3.).

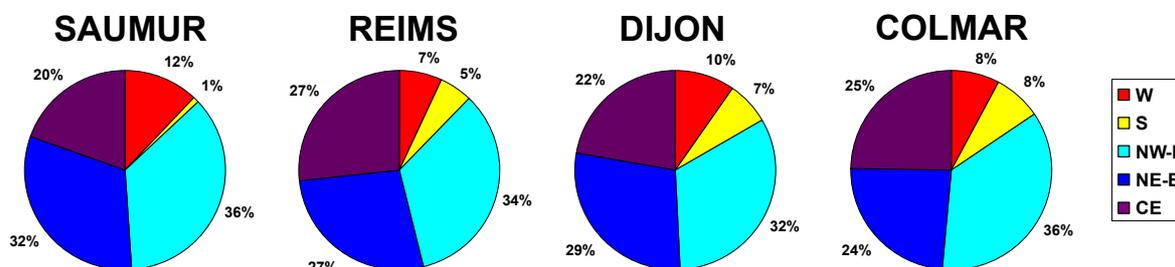


Figure 2.3.2. Fréquence des types de circulations anticycloniques associés aux jours avec $T^\circ\text{C min} < 0^\circ\text{C}$ (mars-avril-mai, période 1960-2007) (Planchon *et al.*, 2009 ; QuénoI *et al.*, 2009a).

L'analyse des situations où au moins une des stations a enregistré une température minimale inférieure à -5°C montre que les circulations de Nord et d'Est sont fortement

majoritaires (74%). Le rôle de ces types de circulations sur les basses températures minimales par la méthode HB est confirmé en prenant en compte les journées à températures minimales inférieures à -5°C , puisque 70 à 85 % d'entre elles sont associées aux circulations de NW-N et NE-E (Fig. 2.3.3.).

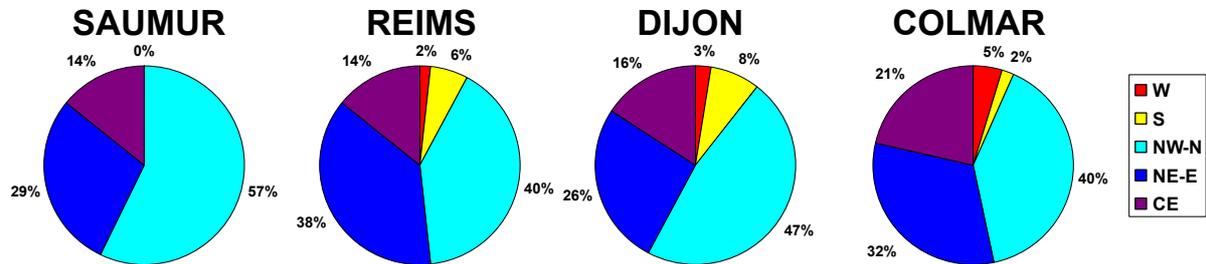


Figure 2.3.3. Fréquence des types de circulations anticycloniques associées aux jours avec $T^{\circ}\text{C min} < -5^{\circ}\text{C}$ (mars-avril-mai, période 1960-2007) (Planchon *et al.*, 2009 ; Quénoel *et al.*, 2009a).

Confirmant les observations se rapportant aux journées avec une température minimale inférieure à 0°C , Saumur et Angers ne connaissent pas de types de circulations d'ouest ou de sud associés aux journées avec une température minimale inférieure à -5°C . Situées dans des régions mieux ventilées, les stations de Reims et surtout de Saumur réagissent rapidement aux redoux. L'épisode de gel observé en mars 1984 illustre bien ce phénomène (Fig. 2.3.4.).

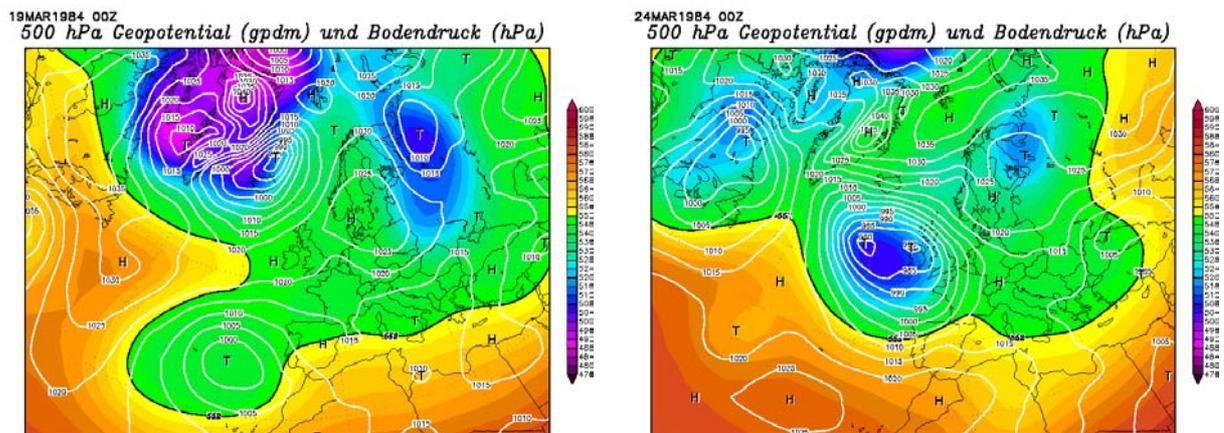


Figure 2.3.4. Exemple des gelées de mars 1984 : champ de pression au niveau de la mer (hPa) et du géopotential à 500 hPa (dam) sur l'océan Atlantique Nord et l'Europe. Source : réanalyses NCEP (<http://www.wetterzentrale.de>) (Planchon *et al.*, 2009).

Sous l'influence d'une circulation de type HFA et d'une faible nébulosité, des gelées ont été enregistrées sur les quatre stations du 19 au 22 mars. La circulation de sud qui a suivi cet épisode (TB) s'est accompagnée d'une persistance des gelées les 23 et 24 mars à Dijon ($-2,1^{\circ}\text{C}$ le 24) et à Colmar ($-3,1^{\circ}\text{C}$), tandis que la température minimale a rapidement et fortement augmenté à Reims ($3,2^{\circ}\text{C}$) et surtout à Saumur (6°C).

2.3.3. Répartition interannuelle et intra saisonnière des gelées et du risque de gelées entre 1960 et 2007

Conformément à l'avancement de la saison dans le calendrier, l'accroissement continu de la durée du jour et de la hauteur du soleil se traduit par la disparition progressive des gelées et du risque de gelées entre le début mars et la fin mai. A Angers-Beaucouzé, la fréquence

moyenne des gelées passe ainsi de 20,0% en mars (5,2 jours) à 4,0% en avril et devient quasi nulle en mai (1 cas en 48 ans, en 1967). Au seuil de +3°C, on observe logiquement un allongement significatif de la période à risques : 41,3% en mars (12,8 jours), 23,7% en avril (7,1 jours) et encore 2,9% en mai (0,9 jour).

La variabilité interannuelle est l'autre composante essentielle de ce risque. Sur les 48 années de la période étudiée, le nombre de jours avec des températures minimales printanières négatives oscille entre 0 (1989 et 1999) et 21 (1973). La chronique de 1960 à 2007 présente une distribution opposant principalement des « blocs » d'années froides (1968 à 1971 ; 1973 à 1976 ; 1984 à 1987 ; 2004 à 2006) à des « blocs » souvent plus durables d'années douces (1977 à 1983 ; 1988 à 1995 ; 1997 à 2003) (Fig. 2.3.5.). Ces constats sont à mettre en relation avec la diversité d'une année à l'autre des situations synoptiques qui placent nos latitudes moyennes à la merci de masses d'air particulièrement contrastées en fonction des types de circulation atmosphérique (prolongement possible du caractère hivernal avec la stagnation de bas géopotentiels et/ou la persistance de coulées polaires ou, au contraire, atmosphère très douce avec la remontée précoce des hauts géopotentiels subtropicaux et/ou la présence répétée d'advections chaudes).

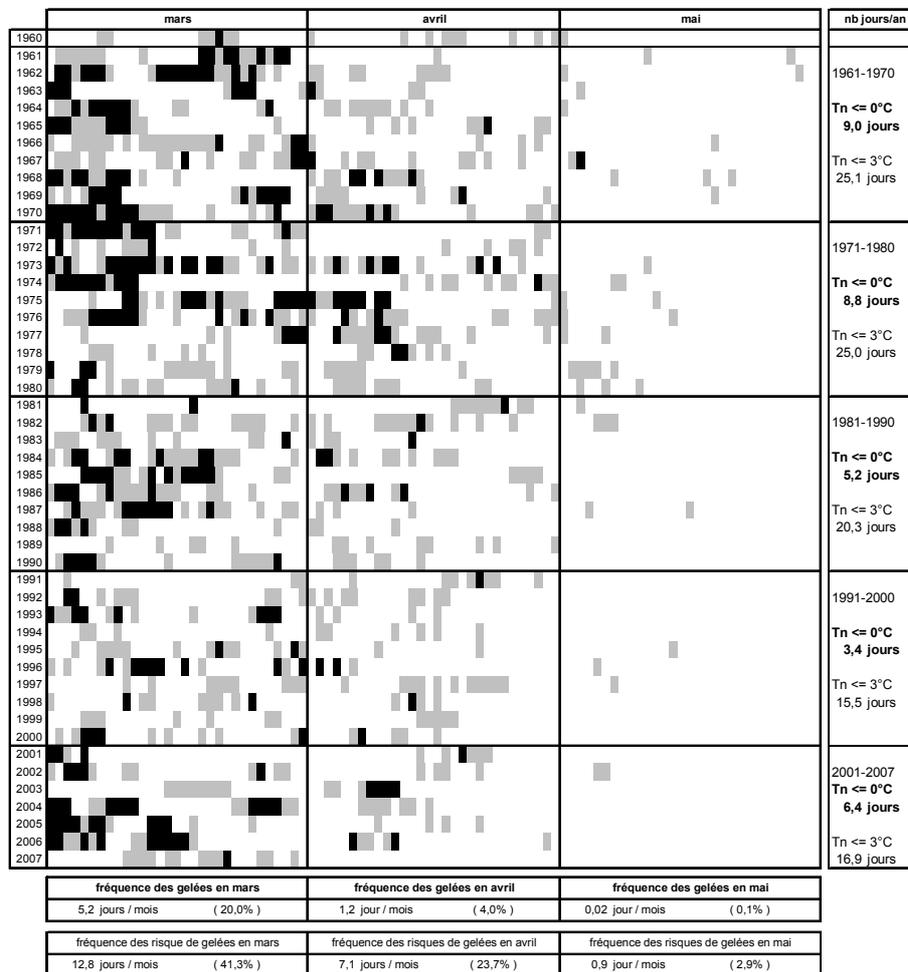


Figure 2.3.5. Répartition interannuelle et intra saisonnière des jours avec gelées sous abri ($T_n \leq 0^\circ\text{C}$; noir) et avec risque de gelées ($0,1 < T_n \leq 3^\circ\text{C}$; gris) à Angers-Beaucouzé, au printemps, entre 1960 et 2007 (graphique établi d'après données Météo-France) (Planchon *et al.*, 2009).

Dernier élément, et non des moindres d'un point de vue végétal, la date d'occurrence des épisodes froids. Il est intéressant de constater que certaines années très gélives se terminent tôt, donc occasionnent peu de risques pour la vigne (exemple de 1962 avec 15 minima négatifs mais une dernière gelée sous abri le 25 mars) alors que d'autres années, a priori plus anodines, peuvent s'avérer potentiellement très dangereuses en raison d'une dernière gelée très tardive (exemple de 1967 avec seulement 5 gelées sous abri mais la dernière le 3 mai...). Les mois d'avril les plus froids peuvent compter jusqu'à 7 jours de gelées, comme en 1975 où, après un hiver peu rigoureux occasionnant un démarrage précoce de la végétation, les plantes étaient particulièrement vulnérables à ces gels tardifs... Plus récemment, l'année 2003 fut elle également remarquable avec la présence de 4 jours consécutifs avec des gelées marquées sous abri en avril (jusqu'à -3°C entre le 8 et le 11 du mois...).

Par delà cette variabilité thermique interannuelle, on observe aussi une nette tendance à la diminution des gelées entre les premières décennies de la période d'analyse (9,0 jours pour 1961-1970 et 8,8 jours pour 1971-1980) et les dernières décennies (5,2 jours pour 1981-1990 et 3,4 jours pour 1991-2000). Pour le début de la décennie en cours (2001-2007), la tendance négative semble stoppée (6,4 jours) grâce notamment aux années 2004, 2005 et 2006 avec plus de 10 gelées sous abri chacune.

Dans l'est de la France (Fig. 2.3.6.), l'éloignement de la mer et la proximité des grandes masses continentales fortement refroidies en fin d'hiver se traduisent naturellement au printemps par une fréquence accrue des gelées (11,2 jours de $T_n \leq 0^\circ\text{C}$ contre 6,5 jours à Angers) et du risque de gelées (28,0 jours de $T_n \leq 3^\circ\text{C}$ contre 20,7 jours à Angers).

	mars	avril	mai	nb jours/an
1960				
1961				
1962				
1963				
1964				
1965				
1966				
1967				
1968				
1969				
1970				
1971				
1972				
1973				
1974				
1975				
1976				
1977				
1978				
1979				
1980				
1981				
1982				
1983				
1984				
1985				
1986				
1987				
1988				
1989				
1990				
1991				
1992				
1993				
1994				
1995				
1996				
1997				
1998				
1999				
2000				
2001				
2002				
2003				
2004				
2005				
2006				
2007				
	1961-1970			$T_n \leq 0^\circ\text{C}$ 12,9 jours
				$T_n \leq 3^\circ\text{C}$ 28,0 jours
	1971-1980			$T_n \leq 0^\circ\text{C}$ 9,7 jours
				$T_n \leq 3^\circ\text{C}$ 27,3 jours
	1981-1990			$T_n \leq 0^\circ\text{C}$ 12,9 jours
				$T_n \leq 3^\circ\text{C}$ 30,3 jours
	1991-2000			$T_n \leq 0^\circ\text{C}$ 9,7 jours
				$T_n \leq 3^\circ\text{C}$ 28,3 jours
	2001-2007			$T_n \leq 0^\circ\text{C}$ 11,4 jours
				$T_n \leq 3^\circ\text{C}$ 26,1 jours
	fréquence des gelées en mars	fréquence des gelées en avril	fréquence des gelées en mai	
	9,1 jours / mois (30,0%)	2 jour / mois (6,7%)	0,08 jour / mois (0,3%)	
	fréquence des risque de gelées en mars	fréquence des risques de gelées en avril	fréquence des risques de gelées en mai	
	17,4 jours / mois (56,1%)	9,5 jours / mois (31,7%)	1,2 jour / mois (3,9%)	

Figure 2.3.6. Répartition interannuelle et intra saisonnière des jours avec gelées sous abri ($T_n \leq 0^\circ\text{C}$; noir) et avec risque de gelées ($0,1 < T_n \leq 3^\circ\text{C}$; gris) à Dijon-Longvic, au printemps, entre 1960 et 2007 (graphique établi d'après données Météo-France) (Planchon *et al.*, 2009).

En mars, le pourcentage de valeurs négatives passe ainsi de 20,0% à Angers à 30,0% à Dijon, et pour le mois d'avril de 4,0 à 6,7%. Concernant les risques de gelées, en Bourgogne le mois de mars est touché plus d'un jour sur deux (56,1% contre 41,3% en Anjou) et encore près d'un jour sur trois en avril (31,7%, contre 23,7% en Anjou). Pour le mois de mai, les gelées sous abri sont certes très rares mais possibles : 4 cas en 48 ans (le dernier ayant eu lieu il y a plus de vingt ans, avec $-0,8^\circ\text{C}$ le 14 mai 1987).

Comme à Angers la variabilité interannuelle est marquée : quelques printemps sont quasi dépourvus de températures négatives (1 jour en 1981, 3 jours en 1980 et 1994), d'autres sont au contraire affectés par des prolongements hivernaux prononcés et relativement récurrents (plus de 20 jours avec gelées sous abri en 1962, 1970, 1973, 1984 et 1986, ou même plus récemment 19 jours lors du froid printemps 2006...).

Par delà ce découpage en « blocs » contrastés d'années, la Bourgogne ne présente pas comme en Anjou de diminution vraiment significative du nombre de jours des gelées printanières au cours des quatre dernières décennies. Les valeurs oscillent entre 9,7 jours (1971-1980 et 1991-2000) et 12,9 jours (1961-1970 et 1981-1990), avec en complément la valeur intermédiaire de 11,4 jours pour la période actuelle 2001-2007. Il en va de même pour le nombre de températures minimales inférieures à 3°C (oscillation entre 26 et 30 jours par printemps)

2.3.4. Conclusion

La période de référence (1960-2007), regroupant les températures minimales journalières inférieures à 0°C des mois de mars, avril et mai, a permis de montrer les contrastes thermiques spatiaux lors des situations gélives. De par leur position géographique et leurs caractéristiques topographiques, les vignobles de l'est de la France subissent des gelées printanières même en circulations de secteurs Ouest et Sud mais elles sont alors généralement peu intenses. Par contre, les gelées observées en Val de Loire sont majoritairement liées à des masses d'air froid provenant du Nord ou de l'Est de l'Europe. La part importante des fortes gelées liées aux circulations de Nord et d'Est a été confirmée par la prise en compte des températures minimales inférieures à -5°C .

La répartition interannuelle et intra saisonnière des jours avec gelées sous abri à Angers-Beaucouzé et à Dijon a montré une forte variabilité : successions d'années froides et d'années plus douces. La tendance climatique actuelle vers un réchauffement n'implique pas une diminution du risque gélif. En effet, la reprise végétative plus précoce accentue la sensibilité de la vigne aux basses températures. Par exemple, les vignobles des Coteaux du Layon (Val de Loire) disposés en fond de vallée, ont subi des dommages importants après les gelées du 8 avril 2008 et du 30 mars 2009. Cette problématique, appliquée et développée à l'échelle des terroirs viticoles, fait l'objet de la préparation d'une thèse de doctorat dans le cadre du programme TERVICLIM, par Cyril BONNEFOY (Financement Ministériel) et intitulée :

« Observation et modélisation spatiale du climat dans les terroirs viticoles du Val de Loire dans le contexte du changement climatique ».

Directeurs : Hervé QUÉNOL (COSTEL-LETG UMR 6554 CNRS) et Malika MADELIN (PRODIG, Paris 7).

2.3.5. Publications

Planchon, O., Quénot, H., Wahl, L., Cantat, O., Bonnefoy, C., 2009 : Types de circulations atmosphériques et types de temps en situations gélives dans les régions viticoles de la moitié nord de la France. Poster + article dans *Geographia Technica*, Numéro Spécial (22^e colloque de l'AIC, Cluj, 1-5 septembre 2009), Cluj University Press, 371-376.

Quénot, H., Planchon, O., Wahl, L., 2009a : Identification and frequency of atmospheric circulation patterns causing spring frost in the northern French vineyards using the objective version of the Hess-Brezowsky classification. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-76. Poster Programme NH1.4 – Extreme events induced by weather and climate change : evaluation, forecasting and proactive planning. EGU General Assembly 2009, Vienna (Wien), 19-24 avril 2009.

Quénot, H., Planchon, O., Wahl, L., 2009b : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Autres références citées

Cellier, P., 1989 : Mécanismes du refroidissement nocturne : application à la prévision des gelées de printemps. In : *Le gel en agriculture*, INRA, 145-164.

Quénot, H., 2002 : *Climatologie appliquée aux échelles spatiales fines : influence des haies brise-vent et d'un remblai ferroviaire sur le gel printanier et l'écoulement du mistral*. Thèse de Doctorat USTL, 283 p.

2.4. Recherches sur les sécheresses

2.4.1. Introduction

2.4.1.1. Rappel du texte de la proposition

Dans le contexte géographique de la partie non-méditerranéenne de la France, la démarche proposée visait à combiner une étude de ces aléas basée sur la fréquence des types de situations météorologiques, une étude sur la vulnérabilité des sociétés concernées, et une sectorisation géographique des espaces concernés.

Les sécheresses du nord-ouest de la France sont liées à la persistance de hautes pressions de surface sur l'Europe occidentale et/ou centrale. Les variations de l'intensité et de l'extension spatiale des sécheresses sont liées aux différents types de circulations qui génèrent les conditions de sécheresse. La plupart des sécheresses estivales intenses sont associées à des hautes pressions sur l'Europe centrale. Les sécheresses de longue durée (pluri-saisonnières : par exemple 1976) sont associées à des successions complexes de différents types de circulations incluant des situations anticycloniques fréquentes et variées.

L'objectif est donc d'identifier les liens entre la fréquence des types de circulations concernées et la variabilité spatio-temporelle des anomalies pluviométriques calculées pour les stations dont les données sont disponibles depuis 1881.

2.4.1.2. Plan de travail

Les sécheresses dans les régions du nord et de l'ouest de la France ont été étudiées à l'aide de différentes méthodes, exposées comme suit :

- 1) Approche historique des sécheresses à partir de séries dendrochronologiques.
- 2) Comparaison entre le bilan de l'eau à Rennes et la fréquence des situations météorologiques.
- 3) Impact des sécheresses en Bretagne sur le bilan hydrique : modélisation à partir du climat d'années passées.

2.4.2. Approche historique des sécheresses à partir de séries dendrochronologiques

Afin de donner une profondeur historique à l'étude des sécheresses, une analyse dendrochronologique a été effectuée à partir de chênes du quart nord-ouest de la France et pour la période contemporaine (1880-1980). Cette analyse, menée en partenariat avec l'équipe d'archéologues du CREAAH, a pour objectif une interprétation climatique des variations de la distribution spatiale des indices de croissance végétale. Les données ont été collectées sur un grand quart nord-ouest de la France, soit un espace couvrant le Massif Armoricaïn et une grande partie du Bassin parisien. Afin de définir les conditions climatiques correspondant aux années caractéristiques, 20 stations météorologiques de référence ont été sélectionnées à proximité des sites de prélèvement. Pour les années retenues et étudiées, les anomalies pluviométriques ont été calculées par rapport à la normale 1880-1980 puis les données du bilan hydrique de Rennes calculé à partir des séries climatiques homogénéisées ont été utilisées.

Pendant cette période, 19 années caractéristiques négatives ont été identifiées (Fig. 2.4.1.)

et la confrontation avec les données climatiques ont montré que toutes ces années ont subi des sécheresses : 1885, 1887, 1891, 1896, 1898, 1900, 1905, 1911, 1915, 1919, 1921, 1928, 1933, 1934, 1949, 1952, 1959, 1972 et 1976. La sécheresse, telle qu'elle peut être définie par la combinaison d'un déficit pluviométrique et (le plus souvent, en saison chaude) de températures élevées, présente cependant plusieurs aspects selon sa durée, son intensité et la saison durant laquelle elle intervient. Ces caractéristiques ont, en effet, selon l'intensité du déficit hydrique, une influence sur la croissance des plantes et doivent donc être prises en considération, la gravité du déficit hydrique différant selon le cas. Quatre types d'années ont été différenciés en fonction du déroulement de la période de sécheresse :

- Type 1. Sécheresse continue et intense, marquant la période végétative dans sa totalité (printemps et été) : 1896, 1921, 1949, 1976 et, dans une moindre mesure (période de plus courte durée), 1900 et 1911.
- Type 2. Sécheresse d'été succédant à un printemps « normalement » arrosé : 1898, 1928, 1933, 1952, 1959 ; (sans échaudage) : 1885 et 1887 ; (discontinue en été) : 1919.
- Type 3. Sécheresse hivernale : 1891, 1905, 1934.
- Type 4. Années sans valeurs mensuelles de type $P < 2t$: 1915, 1972.

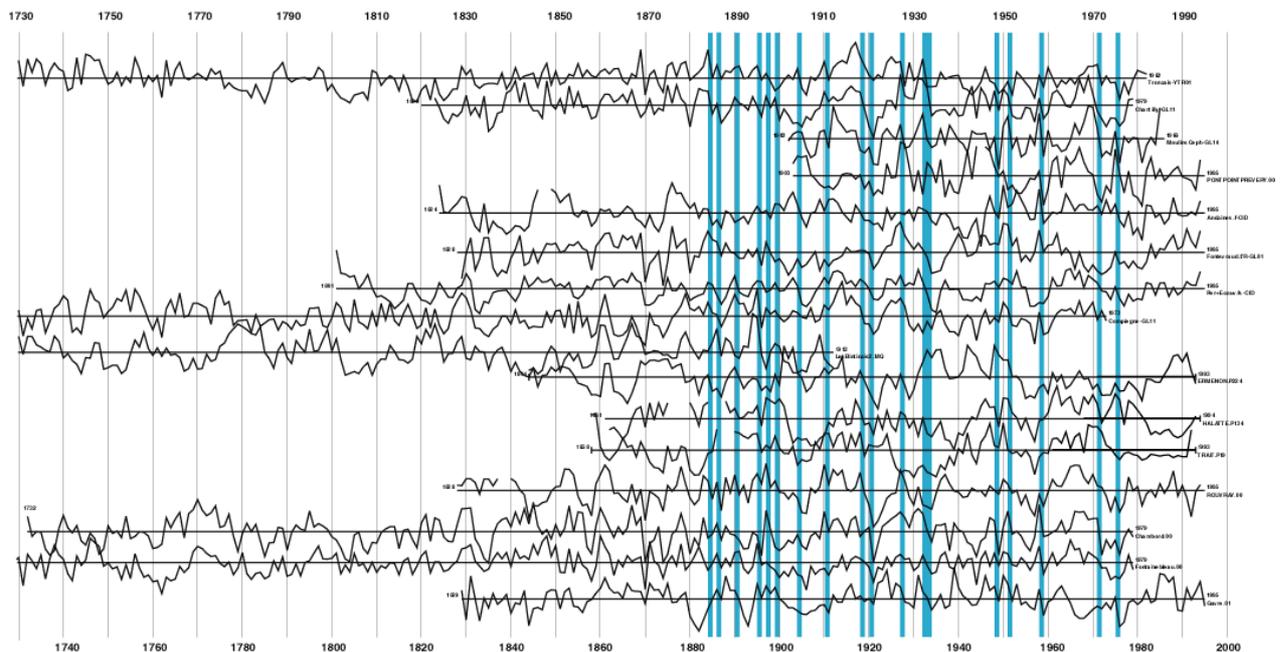


Figure 2.4.1. Synchronisation des référentiels de la période contemporaine : anomalies de croissance synchrones (années caractéristiques négatives : lignes verticales) pour la majorité d'entre eux (Planchon *et al.*, 2008).

La sécheresse est donc le phénomène climatique discriminant parmi les années caractéristiques, les années isolées du type 4 posant toutefois problème. La hiérarchie des différents types d'années caractéristiques négatives dépend essentiellement de la durée et de l'intensité des sécheresses en été et au printemps, alors que les sécheresses d'automne ne sont pas discriminantes. Cette classification a été confirmée et précisée par le calcul des écarts

pluviométriques mensuels et saisonniers à la moyenne décembre-août 1881-1980, pour les 20 stations de référence du réseau de Météo-France. Durant les années de la première catégorie du type 1 (1896, 1921, 1949 et 1976), la sécheresse de printemps-été a succédé à un déficit pluviométrique accentué en hiver. Ainsi, durant ces années et sur la plupart des stations, les trois saisons consécutives hiver-printemps-été ont subi de forts écarts pluviométriques négatifs. Durant les autres années du type 1, l'hiver n'a pas subi de déficit pluviométrique (1900) et/ou la période de déficit de printemps-été a été interrompue par quelques mois « normalement » arrosés ou excédentaires (juin 1911). Les sécheresses de plus courte durée des années de type 2 et 3 se sont traduites par des déficits pluviométriques plus atténués sur l'ensemble de la période décembre-août. Les années de type 3 (1891, 1905, 1934) étaient caractérisées par de forts déficits pluviométriques hivernaux, remarquables comparés aux autres saisons. Enfin, en 1915 et en 1972, des déficits ont été observés pour plusieurs mois non consécutifs, avec une distribution spatiale hétérogène.

La chronique du bilan hydrique à Rennes (construit à partir des séries homogénéisées) montre aussi une hiérarchie parmi les années ayant subi des épisodes de sécheresses. La méthode met bien en évidence les sécheresses estivales intenses de 1976 et de 1949. D'autres années à sécheresse d'été ou de printemps-été identifiées par l'analyse dendrochronologique apparaissent nettement : 1887, 1921, 1959, de même que les années à déficit hivernal (1891, 1905 et 1934). En revanche, des sécheresses d'été et de printemps, identifiées par l'analyse dendrochronologique, ne correspondent pas à de forts déficits hydriques (1898, 1919). Inversement, plusieurs années marquées par de forts déficits n'ont pas été identifiées comme *années caractéristiques* par l'analyse dendrochronologique en été (1892, 1893, 1906, 1943), au printemps (1893, 1938) ou en hiver (1901, 1909, 1954).

Malgré l'intérêt de l'analyse dendrochronologique pour appuyer les recherches sur les sécheresses du passé, ce type d'approche n'a pas été poursuivi pour des raisons de disponibilité des collègues spécialistes de la question.

2.4.3. Comparaison entre le bilan de l'eau à Rennes et la fréquence des situations météorologiques

La reconstitution de séries historiques homogénéisées de données climatiques permet d'envisager une meilleure approche de la variabilité interannuelle du bilan de l'eau. En outre, la confrontation entre ces données hydriques et les types de configurations atmosphériques devrait permettre de mieux comprendre le lien entre la fréquence des épisodes secs et les situations synoptiques dans le cadre des études sur les changements globaux. Cette étude vise à préciser la relation existant entre les données du bilan de l'eau à Rennes et les types de situations atmosphériques observées sur la région pour la période commune d'observation, soit 1881-2004.

2.4.3.1. Reconstitution historique du bilan de l'eau à Rennes

Nous avons donc utilisé les données homogénéisées de températures et précipitations disponibles pour la station de Rennes de 1881 à 2004 (Moisselin *et al.*, 2002). Pour l'insolation, la série homogénéisée ne débute qu'en 1923 et nous avons reconstruit la série 1881-1922 à partir de la formule suivante :

Durée mensuelle d'insolation (en heures) = $26.88 \cdot (T_x - T_n) - 963$

Avec T_n : moyenne mensuelle des températures minimales et T_x : moyenne mensuelle des températures maximales. Cette relation a été obtenue en comparant les données d'insolation mesurées pour la période 1961-1990 avec celles estimées, la corrélation entre les deux séries étant très élevée ($R^2 = 0.85$).

Le calcul du bilan de l'eau a ensuite été réalisé en prenant un modèle de réserve utile unique fixée à 125 mm et en appliquant une décroissance logarithmique classique de la réserve utile au cours de la période déficitaire. Le calcul de l'ETP Turc au pas de temps mensuel permet de montrer la variabilité interannuelle du bilan de l'eau ainsi que la fréquence et l'intensité des périodes de déficit hydrique (définies par la différence entre l'ETP et l'ETR). Cet indicateur de sécheresse permet de caractériser non seulement chacun des mois mais aussi les saisons et les années en cumulant les valeurs mensuelles.

La figure 2.4.2. montre la chronologie des déficits de 1881 à 2004. La moyenne du déficit annuel s'établit à 178 mm avec un maximum de 418 mm en 1989 et un minimum de 23 mm en 1882. La saison où le déficit est le plus intense est bien sur l'été avec un déficit moyen de 128 mm (de 8 mm en 1882 à 272 mm en 1949). Le printemps présente des valeurs légèrement plus faibles (moyenne de 20 mm avec un maximum de 105 mm en 1893) que l'automne (déficit moyen de 30 mm avec un record historique de 136 mm en 1921). Pendant cette période, 12 années ont connu un déficit supérieur à 300 mm et 4 un déficit estival supérieur à 250 mm. On peut différencier les années où le déficit a plutôt été un déficit précoce (printemps-été) comme 1893, 1943 ou 1976, de celles où la sécheresse a été plutôt tardive (été-automne) comme 1959 ou 1985. Certaines années se distinguent plutôt comme des années de sécheresse intense essentiellement estivale (1906, 1949 ou plus récemment 2003) alors que les années particulièrement remarquables comme 1921 ou 1989 sont marquées par une période de déficit à la fois intense et prolongée.

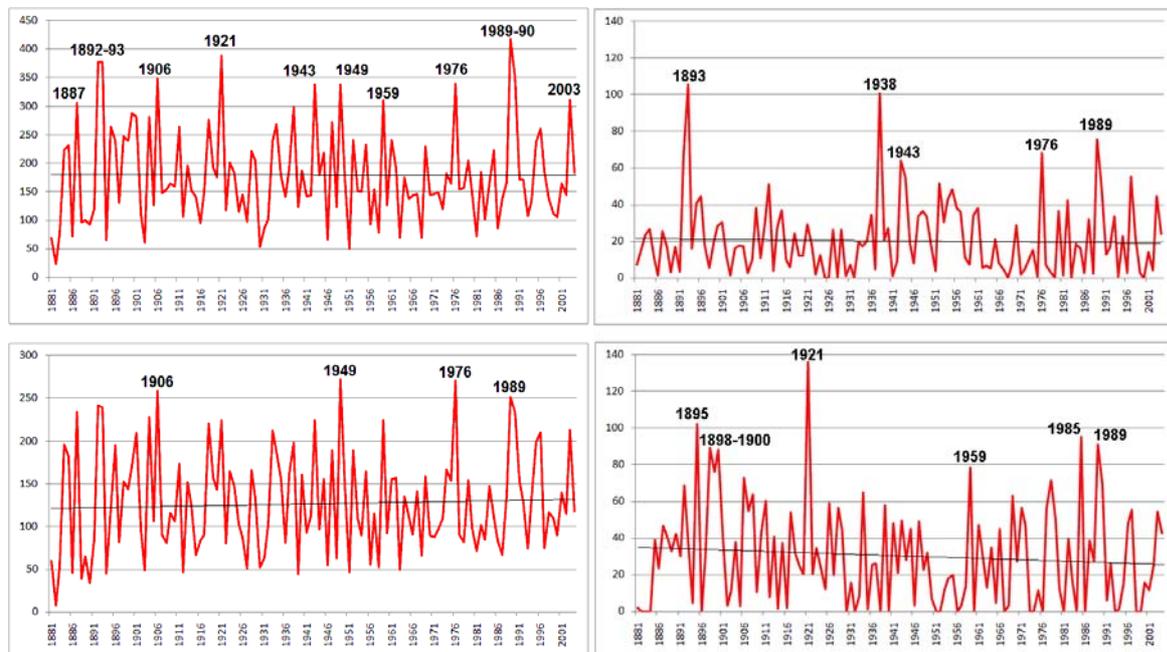


Figure 2.4.2. Déficit d'évaporation annuel et saisonnier ($DE = ETP - ETR$ en millimètres) à Rennes de 1881 à 2004 : cumul annuel en haut à gauche ; cumul printanier (mars, avril, mai) en haut à droite ; cumul estival (juin, juillet, août) en bas à gauche ; cumul automnal (septembre, octobre, novembre) en bas à droite (Dubreuil et Planchon, 2009).

2.4.3.2. Analyse des types de circulation

On associe généralement les sécheresses dans le nord-ouest de la France à la persistance de zones de haute pression de surface sur l'ouest et / ou l'Europe centrale. Dans ce type de configuration, les perturbations météorologiques sont déviées vers le nord et l'absence ou la rareté de passages pluvieux entraîne un déficit plus ou moins prolongé. Une première étude (Dubreuil, 2004) avait ainsi montré (pour la période 1951-1980) une coïncidence particulièrement nette (plus de trois cas sur quatre) entre conditions anticycloniques et décades sèches pour les mois de juin, septembre et octobre. Au contraire, la présence anticyclonique était proportionnellement moins forte en juillet et en août. Basée sur une définition subjective des types de temps et sur une période réduite, une autre approche a été retenue pour cette étude.

A cette échelle régionale, l'étude statistique de la succession des types de circulations atmosphériques et de son évolution depuis un siècle a été menée en utilisant la méthode de classification des types de circulations de Hess et Brezowsky. La figure 2.4.3. montre la fréquence annuelle des types de situations classées comme anticycloniques par la méthode Hess et Brezowsky. Précisément l'ensemble des situations WA, SWA, NWA, HM, BM, NA, HNA, HB, NEA, HFA, HNFA, SEA et SA ont été rassemblées dans un type « anticyclonique » pour construire cette figure. Ces types anticycloniques représentent en moyenne annuelle 47 % des situations météorologiques avec un record de 71% en 1921 et un total de 6 années où ce pourcentage a dépassé 60 %. En été les types anticycloniques représentent 49 % des situations en moyenne avec 10 années où la fréquence a dépassé 70 % dont l'année 2003, la seule où le seuil de 80 % a été (de peu) dépassé ! La fréquence des situations anticycloniques est légèrement plus faible au printemps (45 %) avec seulement 5 années où le seuil de 70 % est dépassé. Enfin, l'automne est marqué par la fréquence la plus élevée (près de 50 % en moyenne) avec 9 années où le taux de 70 % a été dépassé dont l'année 1908 où la fréquence a dépassé 82 % de situations anticycloniques.

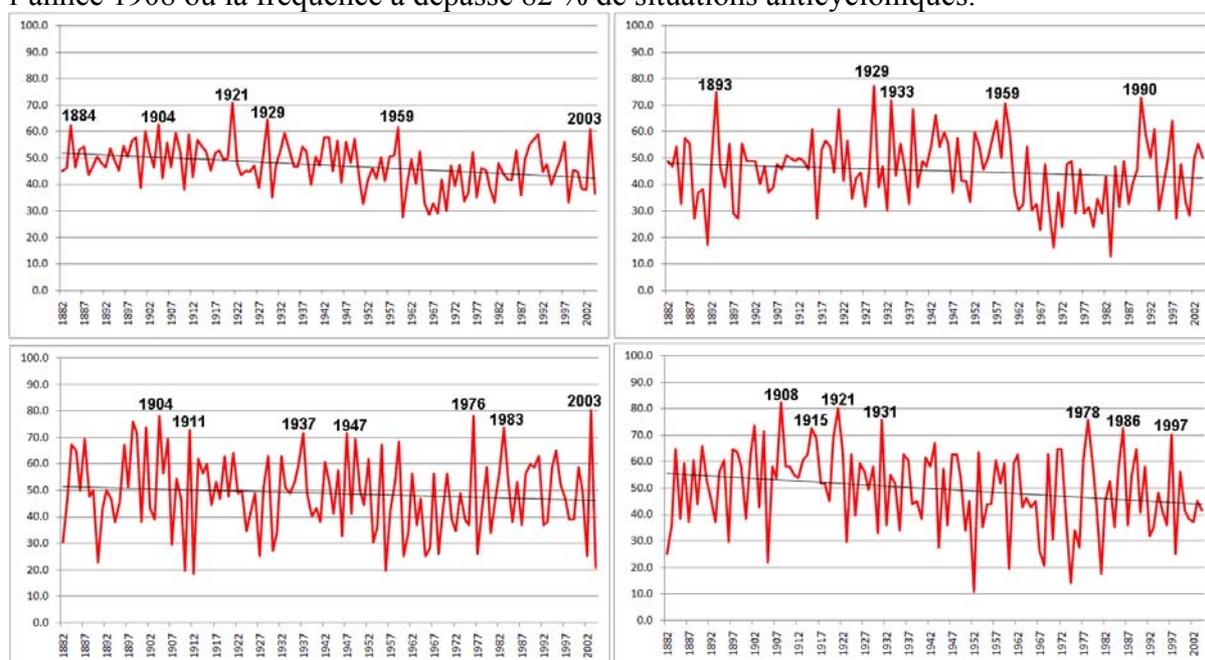


Figure 2.4.3. Fréquence des types de situations anticycloniques (méthode Hess et Brezowsky) de 1882 à 2004 : pourcentage annuel en haut à gauche ; printanier (mars, avril, mai) en haut à droite ; estival (juin, juillet, août) en bas à gauche ; automnal (septembre, octobre, novembre) en bas à droite (Dubreuil et Planchon, 2009).

2.4.3.3. *Années sèches et années anticycloniques : une correspondance partielle*

L'analyse individuelle des principales années sèches montre que, globalement, les déficits les plus forts ont coïncidé avec un pourcentage élevé de situations anticycloniques. C'est notamment le cas pour les années et automnes 1921 et 1959, les étés 1976 et 2003, les printemps 1893 ou 1989-1990. Les situations anticycloniques offrent des conditions dynamiques favorables aux temps ensoleillés avec des passages nuageux et des épisodes pluvieux modestes. Ceci est d'autant plus vrai que la localisation des centres d'action anticycloniques favorisent les flux de sud ou d'est sur la région, les faibles pluies s'accompagnant alors de temps chaud et sec favorable à un creusement du déficit hydrique. Il convient également de préciser que, les sécheresses pluri-saisonnières (1921, 1976, 1989) ont été associées à une grande diversité des configurations synoptiques et pas à un seul type de situation anticyclonique.

Cependant certains déficits record ne coïncident pas avec des fréquences très élevées de situations anticycloniques comme les étés 1906 ou 1949. A l'opposé, les étés 1911 ou 1983, fortement anticycloniques apparaissent peu déficitaires. C'est surtout au printemps et en automne que la situation est moins concordante : ainsi les fortes fréquences anticycloniques des printemps 1929 et 1933 ne sont associées qu'à des déficits moyens (moins de 30mm) ; la même remarque vaut pour les automnes 1915 et 1931. Au total les corrélations entre les déficits annuels et la fréquence des situations anticycloniques sont significatives mais modestes : elle atteint 0,51 pour l'année, 0,59 pour l'été, 0,46 pour le printemps et seulement 0,44 pour l'automne.

Bien sur le pas de temps saisonnier retenu ici (pertinent pour le bilan de l'eau) peut masquer une grande diversité de situations synoptiques journalières. Au cours des périodes sèches on note souvent une proportion non négligeable de types de temps perturbés d'ouest ou de sud-ouest : ces situations, même brèves, peuvent apporter des hauteurs d'eau suffisamment importantes pour combler ou masquer le déficit en eau. A l'inverse des périodes prolongées de situations cycloniques peuvent en fait cacher une proportion importante de phénomènes n'apportant qu'une quantité limitée d'eau : la présence de fronts et de traînes peu actifs ne suffisent pas alors à compenser un déficit hydrique préalable.

Les interprétations de ces divergences peuvent être multiples :

- Tout d'abord, le jeu de données de situations atmosphériques utilisé peut comporter des biais. Dans le cadre du programme COST-733, P. James (2007) a développé une version objective (automatique) de la méthode de Hess et Brezowsky, qui présente notamment l'avantage d'être plus largement utilisable sur l'ensemble de l'Europe et disponible au pas de temps quotidien depuis 1850. Cette dernière classification n'a pas encore pu être utilisée dans cette étude comparative avec les données du bilan de l'eau mais le sera prochainement.
- La méthode Hess-Brezowsky, mise au point en Allemagne et initialement prévue pour l'étude des conditions météorologiques, leur variabilité et leurs impacts sur ce même pays et les pays voisins d'Europe centrale (République Tchèque : Kyselý et Huth, 2006 ; Suisse : Fallot, 2000), est peut être ici aux marges de son domaine de validité. Cette étude sera reprise en utilisant la version objective de P. James, afin d'en vérifier la validité sur l'ouest de la France.
- Ensuite, nous l'avons vu, une situation anticyclonique n'est pas forcément synonyme de déficit hydrique important. Ce qui est vrai à l'échelle d'une année l'est vraisemblablement à l'échelle séculaire et permet de ne pas lier automatiquement les

deux phénomènes, surtout lorsque les tendances sont peu marquées. Développée au pas de temps quotidien, la méthode Hess-Brezowsky est efficace pour des études d'événements météorologiques observés et enregistrés au même pas de temps. L'application de la méthode objective de P. James devrait permettre de vérifier si la mauvaise adéquation des pas de temps est une des causes des corrélations faiblement significatives entre les situations anticycloniques et les déficits hydriques mesurés à Rennes.

- Durant la période récente, les sécheresses sont devenues plus fréquentes en été. Mais le lien entre fréquence des situations anticycloniques saisonnières et ampleur du déficit hydrique mesuré est loin d'être aussi simple et nécessite des études complémentaires sur d'autres stations.

2.4.4. Impact des sécheresses en Bretagne sur le bilan hydrique : modélisation à partir du climat d'années passées

2.4.4.1. Introduction

Dans un contexte où le climat futur est source d'inquiétude, il est nécessaire d'étudier le passé afin d'en tirer des enseignements sur l'évolution des sécheresses. Les sécheresses sont-elles un problème récurrent en Bretagne, ou sont-elles des phénomènes climatiques rares ? Quelle gamme d'intensité de sécheresse des sols peut-on trouver sur le long terme (ici la période 1880-2009) sur le territoire breton ? La sécheresse des sols définit la vidange complète du réservoir d'eau des sols, aussi appelée réserve utile. Le calcul du bilan hydrique (Dubreuil, 1994) servira de support à cette étude qui s'intègre dans le cadre du projet IPCC-SB (ImPact du Changement Climatique sur l'intensité des Sécheresses en Bretagne) financé par la Région Bretagne et se concrétise par la préparation de la thèse de doctorat de Chloé LAMY, dans le cadre du programme CLIMASTER et intitulée : ***impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne***. (directeurs : Vincent DUBREUIL [COSTEL-LETG UMR 6554 CNRS] et Hervé NICOLAS [UMR SAS – Agrocampus, Rennes]).

2.4.4.2. Contexte et Méthodologie

Ce travail porte sur la région Bretagne ainsi que sur les régions avoisinantes. On a ainsi compilé des données climatiques depuis les années 1880-90 pour six villes bretonnes et de Loire-Atlantique. Pour chacune de ces villes, un bilan hydrique a été réalisé afin de déterminer les périodes de sécheresse des sols, leur récurrence et leur importance.

- La région Bretagne, villes d'études :

Le climat apparaît comme très variable sur le territoire breton. En plus des différences entre l'Armor et l'Argoat, on note la présence d'un gradient ouest-est où l'on perd l'influence de l'océan atlantique au profit d'un climat océanique dégradé et une différence entre la côte nord et la côte sud. De ce fait, les villes étudiées se trouvent être réparties sur le territoire d'étude afin de montrer au mieux les différences climatiques du quart nord-ouest de la France : Brest et les îles de Batz et de Bréhat correspondent aux climats très humides de l'ouest et du nord de la Région ; Groix et Belle-Ile présentent une nuance « méridionale », tandis que Rennes et Nantes permettent d'avoir une vision du climat de l'intérieur.

- Conception du modèle de bilan hydrique :

Le modèle de bilan hydrique qui a été retenu pour cette étude se base sur le calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) obtenu à partir de la formule de Turc (1). Cette formule dépend du rayonnement global (R_g) et de la température moyenne (t).

$$ETP \text{ (mm)} = 0,40(R_g + 50) t/(t + 15) \quad (1)$$

Une fois l'ETP déterminée en tenant compte des conditions climatiques, on va pouvoir obtenir des informations sur la vidange et le remplissage des réserves utiles (en partant du principe que les réserves utiles peuvent contenir jusqu'à 125 mm d'eau maximum). Une réserve utile peu remplie, associée à de faibles précipitations, va pouvoir engendrer une déficience d'évaporation (D.E.), définie par une évapotranspiration réelle inférieure à l'évapotranspiration potentielle (formule 2).

$$D.E. = ETP - ETR \quad (2)$$

- Les longues séries climatiques : de la présence de lacunes...

Les longues séries climatiques étudiées ici proviennent de deux sources : la climathèque de Météo France et les bulletins mensuels de l'office national météorologique de France (Mestre, 2000). La climathèque contient toutes les stations climatiques existantes ou ayant existé sur le territoire français. Bien que certains sémaphores et certaines stations aient été en fonctionnement assez tôt au XIX^{ème} siècle, les données climatiques observées ne sont pas systématiquement référencées dans la base de données numérique. De ce fait, les séries climatiques provenant de la climathèque ont la plupart du temps été comblées manuellement grâce aux bulletins mensuels. Ce comblement des lacunes ne s'est pas toujours fait à partir des mêmes stations ; parfois, c'est le cas pour Groix notamment, il a fallu récupérer des paramètres sur une station voisine. Quand cette étape est nécessaire on a choisi la deuxième station de façon à ce que l'éloignement à la station étudiée soit le plus réduit possible. Le fait d'utiliser des données issues de plusieurs stations, même très proches, entraîne des écarts aux valeurs réellement observées mais non référencées. Afin de limiter au maximum ces écarts à la réalité une homogénéisation des données a été effectuée.

...à l'homogénéisation :

Tout écart à la réalité, comme cité dans le paragraphe précédent, ne peut être déterminé rigoureusement du fait de l'absence des données observées dans les bases de données. C'est à ce niveau que l'homogénéisation intervient. On l'utilise également quand des écarts de valeurs apparaissent dans le temps pour un paramètre donné. On pensera notamment aux valeurs d'insolation où pour certaines stations on note une rupture de la série dans les années 1980. Cette rupture s'explique par un changement de matériel, en effet les sondes électriques ont progressivement remplacé les héliographes Campbell dans ces années-là. Pour remédier à ces écarts une régression linéaire (Mestre, 2000) est effectuée sur une période de 30 ans où l'on estime que les données sont les plus rigoureuses. L'équation de la droite de régression est alors appliquée à toute la période étudiée à partir de l'écart entre les températures maximales et minimales depuis les années 1880 jusqu'à 2009 comme proposé par Dubreuil & Planchon (2009). De plus, certaines stations sont caractérisées par des écarts variables de leurs températures moyennes mensuelles maximales par rapport à la série de Rennes qui a été homogénéisée précédemment à cette étude (Moisselin *et al.*, 2002) et qui nous sert ici de référence. C'est notamment le cas de Belle-Ile où la moyenne mensuelle des températures maximales a été diminuée de 1°C pour correspondre au mieux aux variations climatiques rennaises.

2.4.4.3. Les résultats

Les résultats présentés ici concernent la déficience d'évaporation annuelle, ainsi que mensuelle sur la période estivale. Ces graphiques illustrent la période de la fin du XIX^{ème} siècle jusqu'à 2009. La déficience d'évaporation va donc nous permettre de voir l'évolution de l'intensité de la sécheresse des sols depuis la fin du XX^{ème} siècle, ainsi que sa variabilité interannuelle.

- La déficience d'évaporation annuelle

Les graphiques suivants (Fig. 2.4.4.) illustrent la déficience d'évaporation annuelle à Rennes, Plougonvelin (pointe St Mathieu), Belle-Ile et Bréhat. On y voit trois éléments représentés : le cumul annuel (histogramme), la moyenne mobile (courbe continue), calculée sur une période de 5 ans encadrant l'année déterminée, et une droite de tendance de l'évolution du cumul annuel (droite discontinue). A Rennes (Fig. 2.4.4a) la moyenne de la déficience d'évaporation annuelle varie autour de 200 mm, les valeurs sont plus souvent comprises entre 150 et 200 mm, qu'au-dessus de 200 mm. D'autres villes voient leur moyenne de déficience d'évaporation varier autour de 200 mm, c'est notamment le cas de Groix, Nantes et Plougonvelin. Cette dernière (Fig. 2.4.4b) présente la particularité d'avoir une moyenne qui oscille le plus souvent autour de 150 mm sur la période 1880-1935 et une moyenne variant le plus souvent entre 100 et 250 de 1935 à 2009. Les villes de Groix et Nantes (non présentées ici) ont des séries peu dispersées autour de 200 mm, excepté pour la fin du XX^{ème} siècle où il y a un pic à 300 mm à Groix, à Nantes on trouve deux pics à 250 mm en 1945 et 1990. A Bréhat (Fig.2.4.4c) la moyenne est plus basse et varie entre 150 et 200 mm. A l'inverse, la moyenne de la déficience d'évaporation varie autour de 250 mm à Belle-Ile (Fig. 2.4.4d). Ces résultats confirment la répartition des sécheresses en Bretagne qui sont plus intenses à l'est et au sud. On remarque également des années caractérisées par des déficiences d'évaporation nettement supérieures à la moyenne. Certaines années se retrouvent sur plusieurs villes comme 1921 où l'on a 430 mm à Groix, 400 mm à Nantes, 390 mm à Rennes, 280 mm à Plougonvelin et 444 mm à Belle-Ile. De même en 1976 on observe des déficiences de 410 mm à Groix, 390 mm à Nantes, 380 mm à Bréhat, 340 mm à Rennes, 260 à Plougonvelin et 390 à Belle-Ile. Il en va de même pour 1949 et 1989, même si en 1949 seules les villes côtières sont concernées. Du fait des lacunes liées aux deux guerres mondiales il est difficile de suivre des tendances depuis 1880 jusqu'à nos jours. Cela n'empêche pas de comparer les moyennes annuelles de la déficience d'évaporation sur 5 périodes : 1891-1910, 1921-1940, 1949-1968, 1969-1988 et 1989-2008 (Tab. 2.4.1.). A Rennes on note une diminution progressive de la déficience suivie par une légère augmentation de 1989 à 2008. Cette tendance se retrouve à Plougonvelin, mais l'augmentation sur la période récente est plus forte. A Nantes, Belle-Ile, Groix et Bréhat la déficience augmente et diminue plusieurs fois sur ces 5 périodes, mais la tendance générale est à une légère diminution.

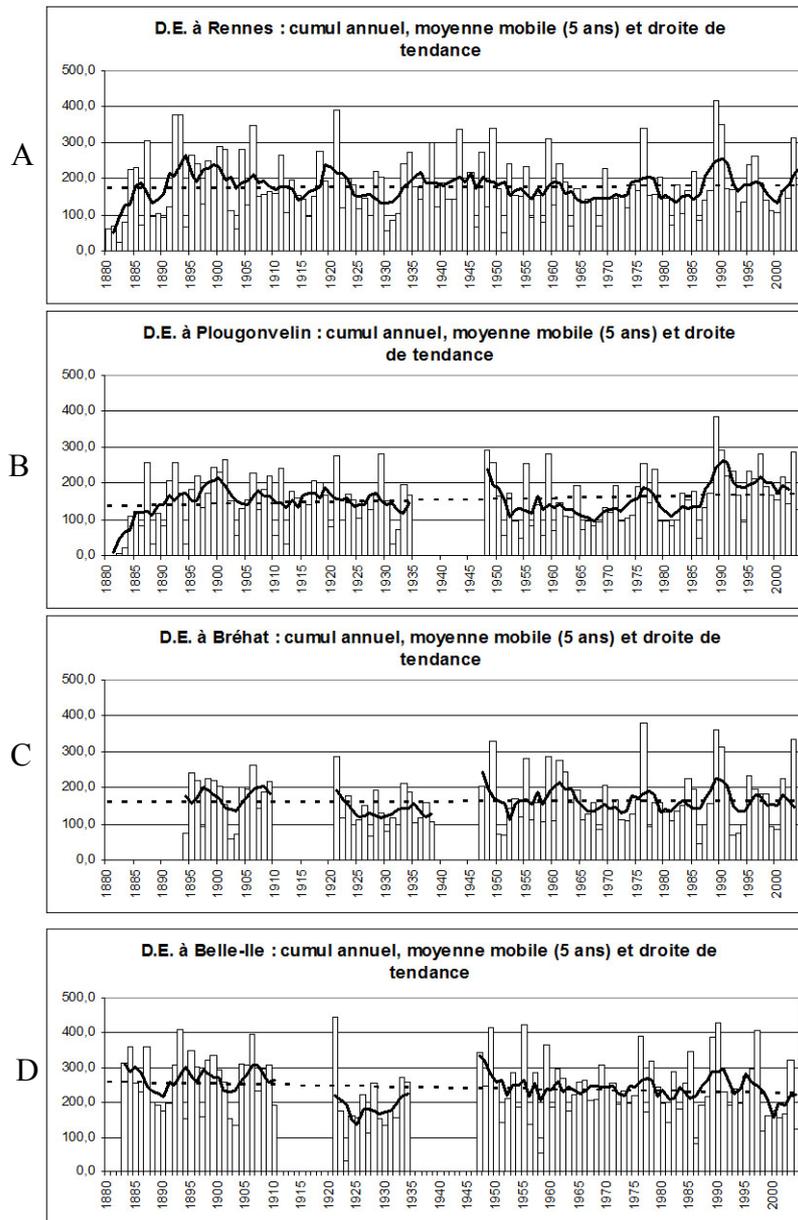


Figure 2.4.4. Graphiques de la déficience d'évaporation (D.E.) annuelle de deux villes bretonnes : Rennes, Plougonvelin (pointe St Mathieu), et des îles de Bréhat et Belle-Ile (histogramme : cumul annuel, courbe trait continu : moyenne mobile, droite traits discontinus : droite de tendance) (Lamy et Dubreuil, 2010).

	Plougonvelin	Rennes	Nantes	Belle-Ile	Groix	Bréhat
1891-1910	171	210	194	270	263	173
1921-1940	107	178	204	193	189	139
1949-1968	129	164	167	242	209	165
1969-1988	140	164	188	233	220	153
1989-2008	197	194	180	236	199	141

Tableau 2.4.1. Moyenne des déficiences annuelles pour les villes de Plougonvelin, Rennes, Nantes et les îles de Groix, Belle-Ile et Bréhat, pour cinq périodes (Lamy et Dubreuil, 2010).

- La déficience d'évaporation pendant l'été

La figure 2.4.5. illustre la déficience des mois d'été pour les villes vues précédemment, seuls les graphiques du mois d'août sont présentés ici, les mois de juin et juillet seront abordés

sans support visuel. La droite de tendance à Rennes (Fig. 2.4.5a) révèle une augmentation de la déficience avec le temps. Les graphiques de Plougonvelin (Fig. 2.4.5b) et Bréhat (Fig. 2.4.5c) montrent les mêmes tendances ; pour Belle-Ile (Fig. 2.4.5d) et Groix (non présentée) l'augmentation est également visible mais dans des proportions plus faibles. A Nantes (non présentée) il n'y a pas de tendance.

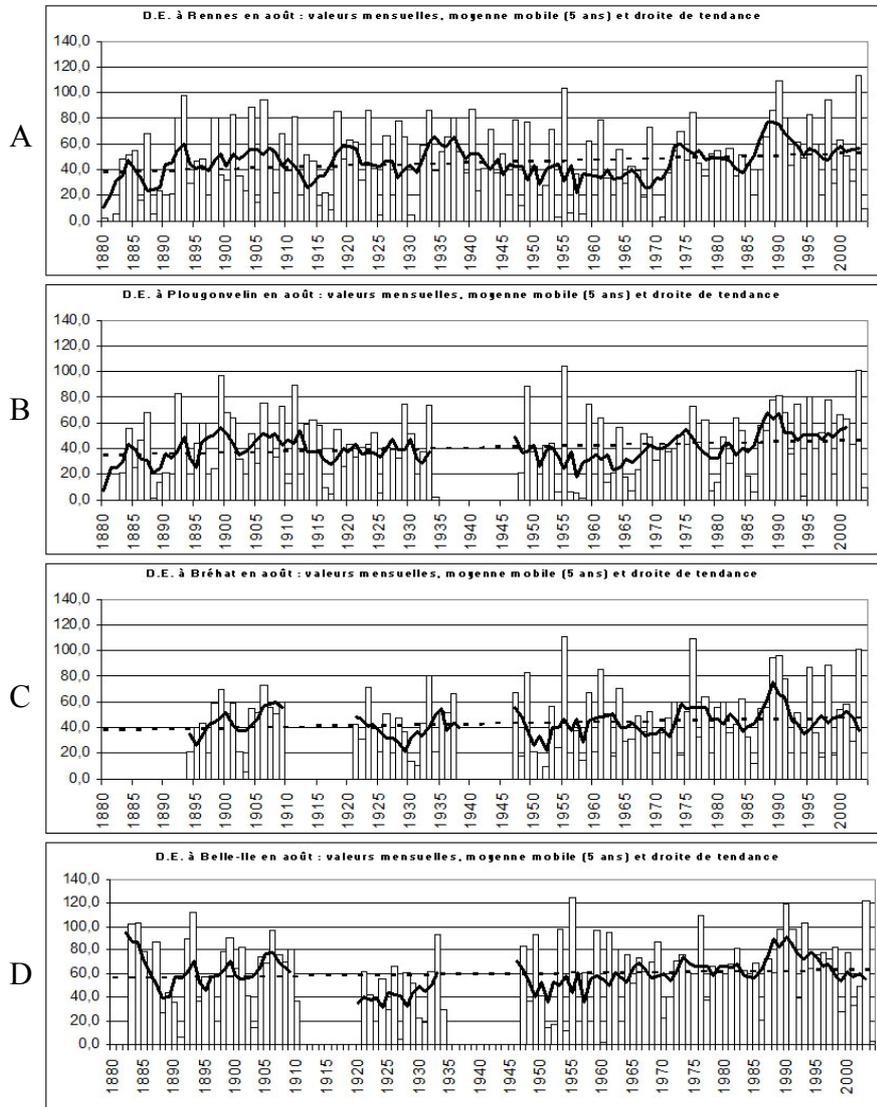


Figure 1.4.5. Graphiques de la déficience d'évaporation (D.E.) mensuelle en août des villes de Rennes et Plougonvelin (pointe St Mathieu) et des îles de Bréhat et Belle-Ile (histogramme : cumul mensuel, courbe trait continu : moyenne mobile, droite traits discontinus : droite de tendance) (Lamy et Dubreuil, 2010).

On remarque que les mois d'août connaissent d'importantes variations de sécheresse d'une année sur l'autre. Pour toutes les villes étudiées on observe des pics d'intensité de déficience d'évaporation coïncidant globalement entre eux. Par exemple en 1956 et en 1977, chacune des stations présente une déficience supérieure à la moyenne. En 1989 et en 1990, toutes les stations sont caractérisées par cette déficience mais dans des intensités variables.

Contrairement aux mois d'août, les mois de juillet ne connaissent pas des déficiences d'évaporation qui augmentent au cours du temps sur tout le territoire breton. A Belle-Ile et Bréhat on note ainsi une diminution légère depuis 1880 jusqu'en 2009. A Rennes il n'y a pas de tendance. A Nantes, Groix et Plougonvelin les graphiques révèlent une augmentation de la déficience, beaucoup plus marquée à Groix que dans les deux autres villes. Les mois de juillet, tout comme les mois d'août, présentent des pics d'intensités non réguliers dans le

temps. On voit notamment les mois d'août 1949 et 1959 où toutes les villes présentent un pic de déficience, excepté pour Bréhat en 1959.

Les graphiques pour les mois de juin illustrent des tendances d'évolution de la déficience d'évaporation encore différentes des mois d'août et de juillet. A Belle-Ile et Bréhat cette déficience tend à diminuer légèrement dans le temps, tandis qu'à Plougonvelin et Nantes on voit plutôt une augmentation, moins marquée pour cette dernière. A Rennes et Groix la déficience reste constante au cours du temps. L'année 1976, caractérisée par une forte déficience, se retrouve sur les graphiques du mois de juin pour toutes les villes de la région.

2.4.4.4. Conclusion

Cette étude montre ainsi des intensités de la déficience d'évaporation marquées par des variabilités interannuelles et spatiales à l'échelle du territoire breton. Les suivis annuels montrent en effet des augmentations du déficit des sols en eau depuis les années 1880 plus marqués pour les îles de Bréhat et de Belle-Ile ainsi qu'à Plougonvelin. Tandis que Rennes et Nantes connaissent une moindre augmentation des phénomènes de sécheresse. Les mois d'été complètent cette vision en révélant une année sur quatre caractérisée par une forte sécheresse estivale, qui revient assez souvent pour les villes bretonnes. Elle met également en avant des décennies où ce rythme devient plus soutenu comme dans les années 1890-1910 par exemple.

Base de données :

Climathèque, Météo France. <http://climatheque.meteo.fr/okapi/accueil/okapiWeb/index.jsp>

Bulletins mensuels de l'office national météorologique de France, bibliothèque climatologie du laboratoire COSTEL, UMR 6554, CNRS, Université Rennes 2.

2.4.5. Publications

Dubreuil, V., Planchon, O., 2008 : Y aura-t-il encore un climat breton en 2030 ? *Bretagne(s)*, 10, 36-41.

Planchon, O., Dubreuil, V., Bernard, V., Blain, S., 2008 : Contribution of tree-ring analysis to the study of droughts in northwestern France (XIX-XXth century). *Climate of the past Discussion*. 4, 249-270 <http://www.clim-past-discuss.net/4/249/2008/cpd-4-249-2008.pdf>

Quénol, H., Dubreuil, V., Lecerf, R., Arvor, D., 2008 : Apport des outils de la géomatique pour la spatialisation des risques climatiques. In «*Climat et risques : changements d'approches*», sous la direction de D. Lamarre. Lavoisier Ed., 43-61.

Dubreuil, V., Planchon O., 2009 : Bilan d'un siècle d'observation des sécheresses et des types de circulations atmosphériques associées à Rennes. *Actes du XXIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cluj (Roumanie), septembre 2009, 139-144.

Lamy, C., Dubreuil, V., 2010 : Impact des sécheresses sur le bilan hydrique : Modélisation à partir du climat d'années passées. *Actes du 23ème colloque de l'AIC*, Rennes (1-3 septembre), 325-330.

Autres références citées

Dubreuil, V., 1994 : *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA.AVHRR*, Thèse de l'Université Rennes 2, 381p.

Fallot, J.M., 2000 : Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20^e siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 100-109.

James, P.M., 2007 : An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, 17-42.

Kyselý, J. et Huth, R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85, 19-36.

Mestre O., 2000 : *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries de données climatiques*, Thèse de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 233 p.

Moisselin, J.M., Schneider, M., Canellas, C. et Mestre, O., 2002 : Changements Climatiques en France au 20^{ème} siècle. Étude des longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et températures. *La Météorologie*, 38, 45-56.

3. Risques climatiques et impacts

3.1. Variabilité de la circulation atmosphérique sur l'Europe (1850-2009)

3.1.1. Introduction

Pour évaluer les risques climatiques liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air sur l'Europe Occidentale, nous proposons en premier lieu d'étudier la variabilité de la dynamique atmosphérique puis de la mettre en relation avec les anomalies climatiques enregistrées en surface sur l'Europe Occidentale. L'étude de la variabilité de la circulation atmosphérique sur l'Europe est basée sur l'utilisation de la classification objective (automatique) des types de circulations atmosphériques de Hess et Brezowsky (présentation détaillée : cf. 1.2.), prenant en compte les champs de pression au niveau de la mer et le géopotential à 500 hPa sur l'espace européen et nord-atlantique (Fig. 3.1.1.) et utilisant les fichiers NCAR-DSS, NCEP et ECMWF (James, 2007). La méthode a été validée dans le cadre du projet européen COST 733 (<http://www.cost733.org>). La classification de Hess et Brezowsky différencie 29 types (*Grosswetterlagen*) regroupés en 5 classes (*Grosswettertypen*) (Tab. 3.1.1.).

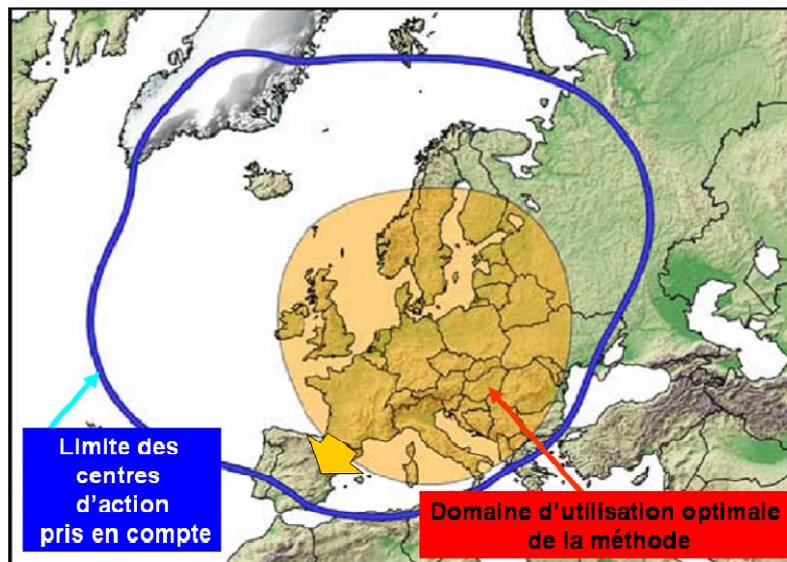


Figure 3.1.1. Espace d'étude de la méthode objective Hess-Brezowsky de classification des types de circulations atmosphériques (James, 2007). (Flèche orange : extension du domaine d'utilisation à la péninsule Ibérique)

Grosswettertypen (GWT)	Grosswetterlagen (GWL)
Ouest	WA, WS, WW, WZ
Sud	SWA, SWZ, SA, SZ, TB, TRW, SEA, SEZ
NW et N	NWA, NWZ, NA, NZ, HNA, HNZ, HB, TRM
NE et E	NEA, NEZ, HFA, HFZ, HNFA, HNFZ
Europe Centrale	HM, BM, TM

Tableau 3.1.1. Type de circulations atmosphériques GWT et GWL selon la classification objective de Hess et Brezowsky (James, 2007).

Nous disposons, dans le cadre du programme soutenu par la Fondation MAIF, d'un fichier quotidien inédit puisque, par rapport aux résultats présentés par le PIK (Gerstengarbe et Werner, 2005), il intègre trente années supplémentaires en début de chronique (1850 à 1880). Nous présentons donc les premiers résultats issus d'une étude basée sur une série quotidienne de 160 années (1850-2009).

3.1.2. Analyse statistique

Une étude statistique a d'abord été menée pour étudier la variabilité et détecter les tendances. Les fréquences d'occurrence de chaque type de circulation (GWT et GWL) ont été calculées aux échelles annuelle et saisonnière (Tab. 3.1.2.) et le test statistique de Pettitt pour détecter les dates de rupture dans les séries chronologiques a été appliqué sur les pourcentages de chaque type de circulation aux différents pas de temps.

GWL et GWT	Année	Hiver	Printemps	Été	Automne
WA	7.0	8.9	3.7	7.7	7.6
WZ	9.8	10.8	6.2	12.4	9.8
WS	3.7	3.0	4.0	5.2	2.3
WW	6.4	8.3	5.2	5.1	7.1
OUEST	26.8	31.0	19.1	30.5	26.8
SWA	5.1	6.1	3.0	4.5	6.8
SWZ	4.0	4.2	3.8	3.7	4.3
SA	2.1	2.3	2.0	0.7	3.4
SZ	1.9	2.3	2.7	0.2	2.2
TB	3.1	2.6	5.0	2.0	2.7
TRW	3.2	2.0	3.3	2.8	4.9
SEA	2.1	2.5	2.2	0.5	3.3
SEZ	1.8	2.2	2.3	0.6	2.0
SUD	23.3	24.2	24.3	15.1	29.6
NWA	4.9	5.1	3.6	5.1	5.7
NWZ	5.7	6.8	5.1	6.4	4.6
NA	1.9	0.8	1.7	3.8	1.3
NZ	2.8	2.0	4.1	3.2	2.0
HNA	2.9	2.1	3.7	2.7	2.9
HNZ	2.8	1.6	5.7	2.6	1.4
HB	2.7	2.9	2.7	2.9	2.5
TRM	2.6	1.9	2.9	3.8	1.7
NW et N	26.4	23.2	29.6	30.6	22.0
NEA	2.0	1.4	1.5	3.7	1.2
NEZ	2.2	1.7	3.0	2.4	1.6
HFA	2.0	2.2	1.8	2.0	2.1
HFZ	2.2	1.9	3.4	2.0	1.7
HNFA	1.7	1.5	2.8	1.1	1.3
HNFZ	2.0	1.6	4.1	1.3	0.9
NE et E	12.1	10.3	16.5	12.6	8.8
HM	3.6	4.1	2.9	3.0	4.4
BM	6.1	5.8	4.5	6.8	7.2
TM	1.8	1.5	3.0	1.4	1.3
Europe Centrale	11.5	11.3	10.4	11.3	12.9

Tableau 3.1.2. Occurrence (%) des types de circulation atmosphérique sur l'Europe selon la classification Hess-Brezowsky (moyenne 1850-2008).

Les circulations d'Ouest, Sud et Nord-Ouest à Nord prédominant à l'échelle annuelle, entre 20 et 30% environ, conformément aux résultats du PIK présentés par Gerstengarbe et Werner (2005) sur la chronique 1881-2004 ; et les moyennes mobiles calculées sur 10 ans pour chaque GWT (5 types) ne montrent aucune tendance, du moins à cette échelle (Fig. 3.1.2.).

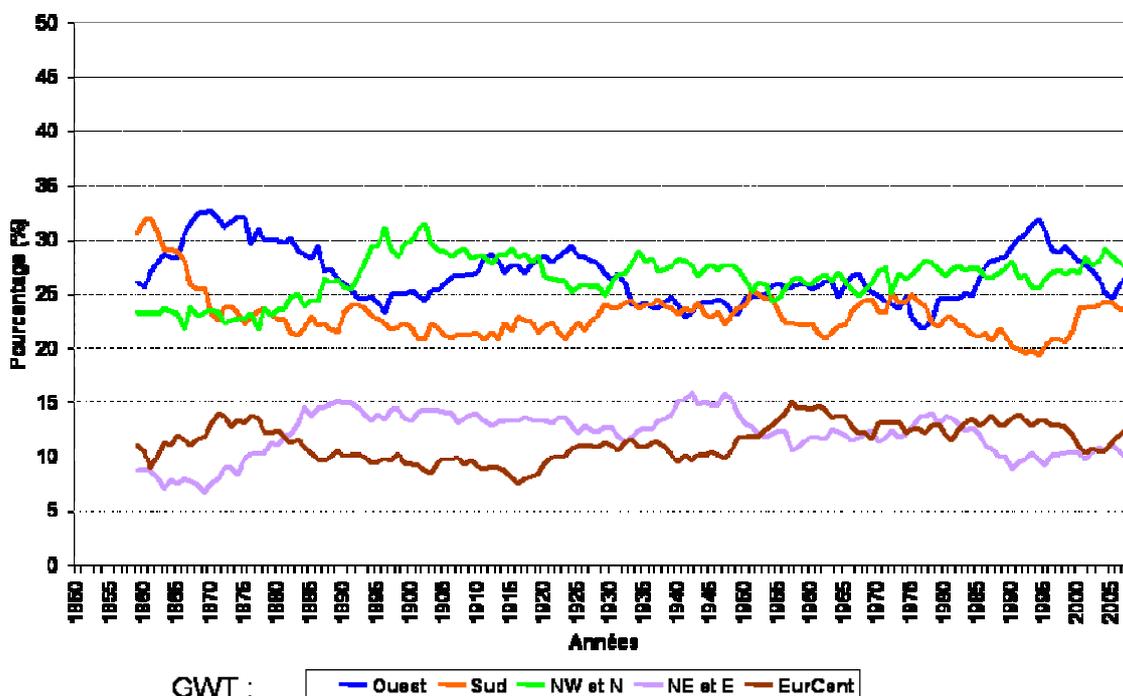


Figure 3.1.2. Occurrence annuelle (%) des types de circulations atmosphériques sur l'Europe (GWT). Moyennes mobiles sur 10 ans de 1850 à 2008 pour chaque GWT (Ouest, Sud, NW et N, NE et E et Europe Centrale).

En revanche, certaines tendances statistiquement significatives sont détectées à l'échelle annuelle si on considère les 29 types GWL (Tab. 3.1.3.). Si on retire les 50 premières années de la série (1850-1899), certaines tendances disparaissent, d'autres se maintiennent ou de nouvelles apparaissent.

GWT	GWL	Périodes	Date de rupture	Seuil	Tendance
NW et N	NA	1850-2008	1918	95%	↘
		1900-2008	/	/	↘
	HB	1850-2008	1928	99%	↘
	TRM	1850-2008	1947	99%	↘
		1900-2008	1947	99%	↘
NE et E	NEA	1850-2008	1924	95%	↘
		1900-2008	1966	90%	↘
Europe Centrale	TM	1850-2008	1923	99%	↘
		1900-2008	/	/	↘

Tableau 3.1.3. Résumé des tendances significatives sur GWL à l'échelle annuelle

La figure 3.1.3. montre par exemple la tendance à la hausse du type de circulation « HB » à l'échelle annuelle. Ce type représente certes un faible pourcentage dans le total annuel (2,7%), cependant, très rare durant la première trentenaire (1850-1880), il est de plus en plus fréquent à partir des années 30. Une rupture significative (99%), décelée en 1928 sur l'ensemble de la période (1850-2008), se maintient si on retire les 50 premières années du test. (Tableau 3.1.3.). L'occurrence annuelle est presque multipliée par deux si on compare la moyenne 1850-1928 (1,9%) à la moyenne 1929-2008 (3,6%).

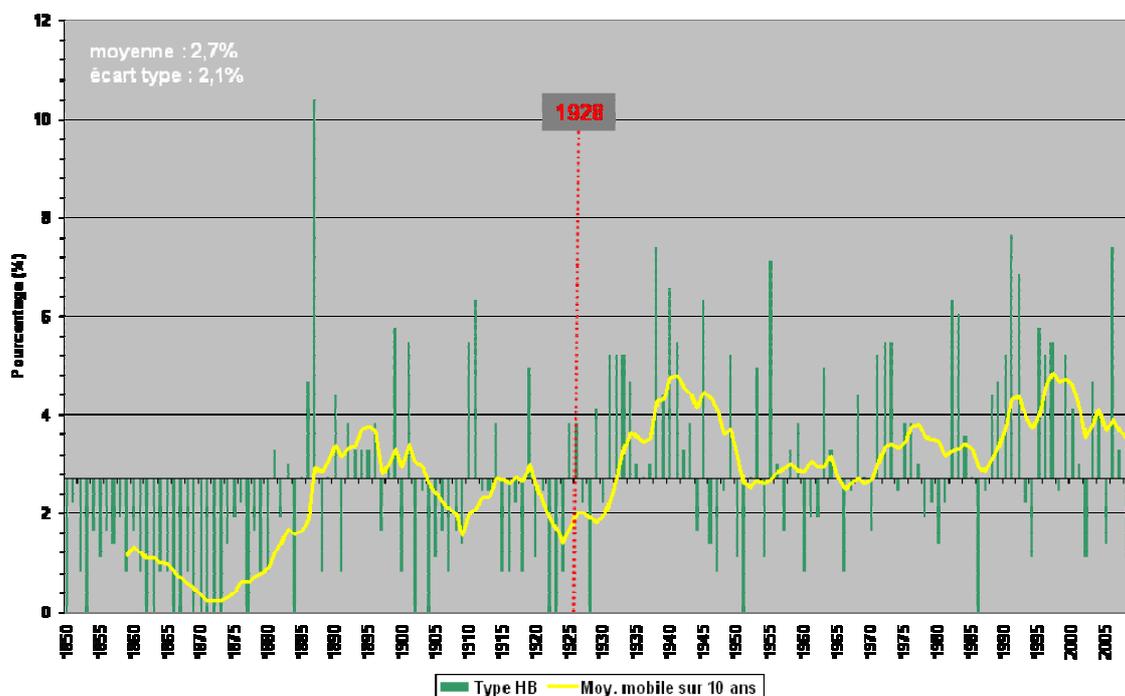


Figure 3.1.3. Occurrence annuelle (%) du type de circulation atmosphérique « HB » sur l'Europe de 1850 à 2008. Ecarts par rapport à la moyenne 1850-2008 et moyenne mobile sur 10 ans. La date de rupture significative selon le test de Pettitt (99%) est surimposée.

On apporte des précisions sur ces tendances à la hausse ou à la baisse si on passe à l'échelle saisonnière. D'autres tendances significatives (de 90 à 99%) sont aussi mises en évidence sur les GWT (Tab. 3.1.4. et Fig. 3.1.4.), et de surcroît sur les GWL (Tab. 3.1.5.) à l'échelle saisonnière.

Saison	GWT	Périodes	Date de rupture	Seuil	Tendance
Printemps	NE et E	1850-2009	1942	95%	↘
		1900-2009	1942	90%	
	Europe Centrale	1850-2009	1942	99%	↗
Automne	NW et N	1850-2008	1883	95%	↗
		1900-2008	/	/	
	NW et N	1850-2008	1930	95%	↗
Hiver	Sud	1850-2008	1938	99%	↘
		1900-2008	1977	95%	
		1950-2008	1981	90%	

Tableau 3.1.4. : Résumé des tendances significatives sur GWT à l'échelle saisonnière

Au printemps, on observe une augmentation significative (99%) des occurrences de types de circulations avec centres d’actions sur l’Europe centrale associée à une baisse significative (95%) des occurrences de circulations NE et E (Fig. 3.1.4a). La date de rupture est la même pour ces deux types : 1942. La tendance à la baisse des circulations de Sud en hiver est significative avec une date de rupture en 1938 si on considère la période de 160 ans (1850-2008) et se maintient en réduisant la série de 100 ans (Tab. 3.1.4). La tendance à la hausse des circulations de NW et N en automne et en hiver (Fig. 3.1.4d) ne sont pas significatives si on effectue le test statistique de Pettitt sur une série réduite de 50 ans (1900-2008), pourtant, si on considère l’ensemble de la série (1850-2008), les tendances sont significatives depuis 1883 et 1930 respectivement ; d’où l’importance de considérer les séries les plus longues possibles pour étudier les tendances. Ainsi, si la série ancienne 1850-1900 n’était pas intégrée à l’étude, les tendances à la hausse des types « TRM » et « HB » en automne ainsi que du type « HB » en hiver n’auraient pas été détectées (Tab. 3.1.5.).

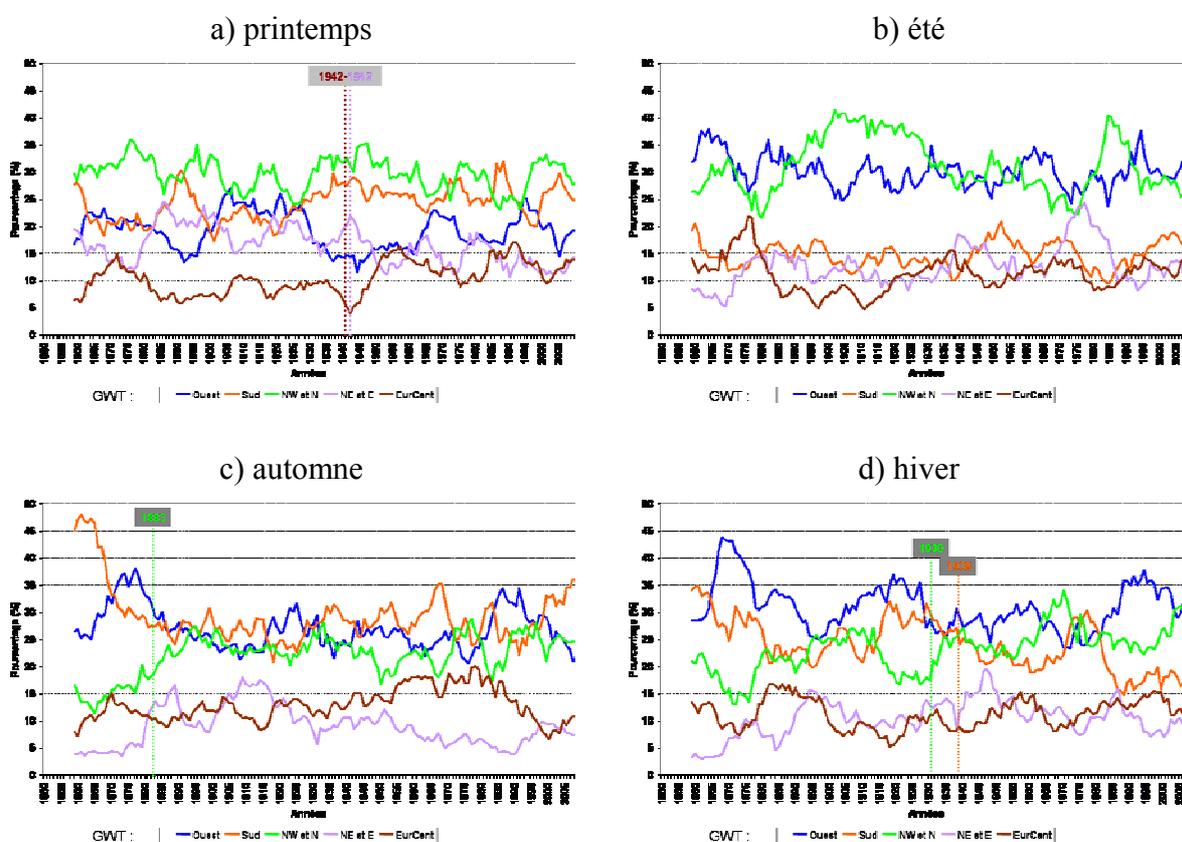


Figure 3.1.4. Occurrence (%) des types de circulations atmosphériques sur l’Europe (GWT) au printemps (a), été (b), automne (c), hiver (d). Moyennes mobiles sur 10 ans de 1850 à 2008 pour chaque GWT. Les dates de rupture significatives selon le test de Pettitt (99 et 95%) sont surimposées.

Saison	GWT	GWL	Périodes	Date de rupture	Seuil	Tendance
Printemps	NE et E	HNFZ	1850-2009	1942	95%	↘
			1900-2009	1942	90%	
Eté	NW et N	NA	1850-2009	1918	99%	↘
			1900-2009	1945	95%	
Automne	NW et N	TRM	1850-2008	1949	95%	↗
			1900-2008	/	/	
		HB	1850-2008	1885	95%	↗
			1900-2008	/	/	
Hiver	NW et N	HB	1850-2008	1924	99%	↗
			1900-2008	/	/	
Hiver	Ouest	WW	1850-2008	1946	95%	↘
			1900-2008	1946	95%	

Tableau 3.1.5. Résumé des tendances significatives sur GWL à l'échelle saisonnière

En hiver, on observe une tendance à la hausse du type de circulation « HB » (Fig. 3.1.5.). Le test de Pettitt fait ressortir l'année 1924 comme date de rupture pour le type « HB ». Malgré un pourcentage faible à l'échelle saisonnière (2,9%), il est multiplié par trois si on compare la moyenne 1850-1924 (1.4%) à la moyenne 1925-2008 (4.2%).

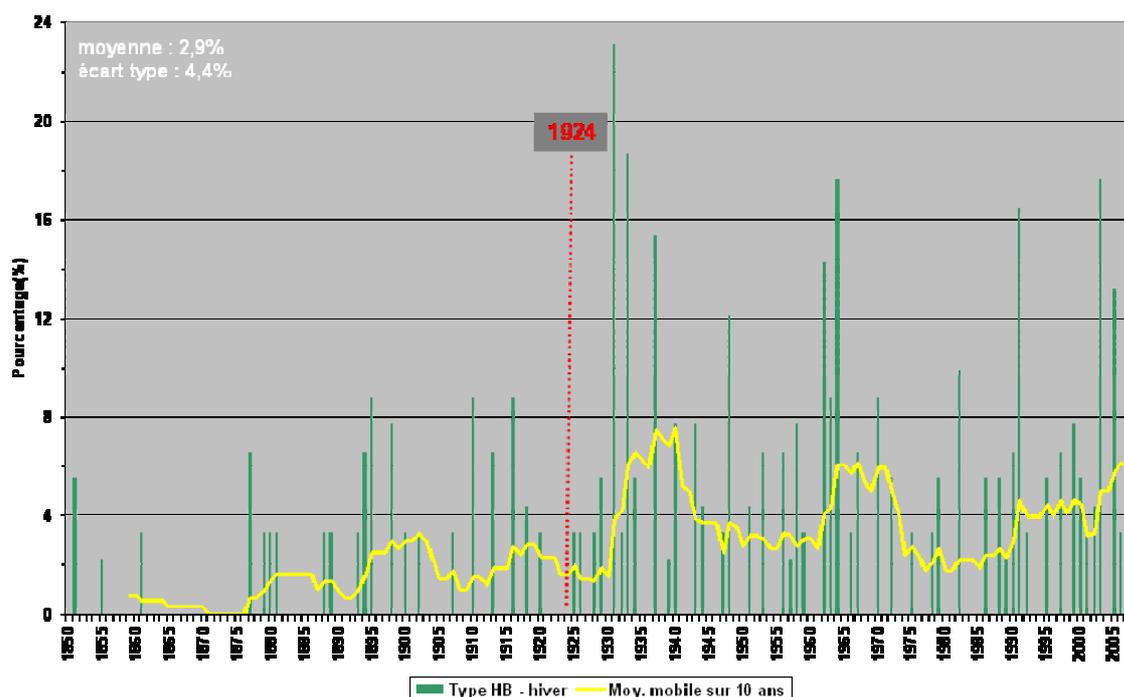


Figure 3.1.5. Occurrence hivernale (%) du type de circulation atmosphérique « HB » sur l'Europe de 1850 à 2008 et moyenne mobile sur 10 ans. La date de rupture significative selon le test de Pettitt (99%) est surimposée.

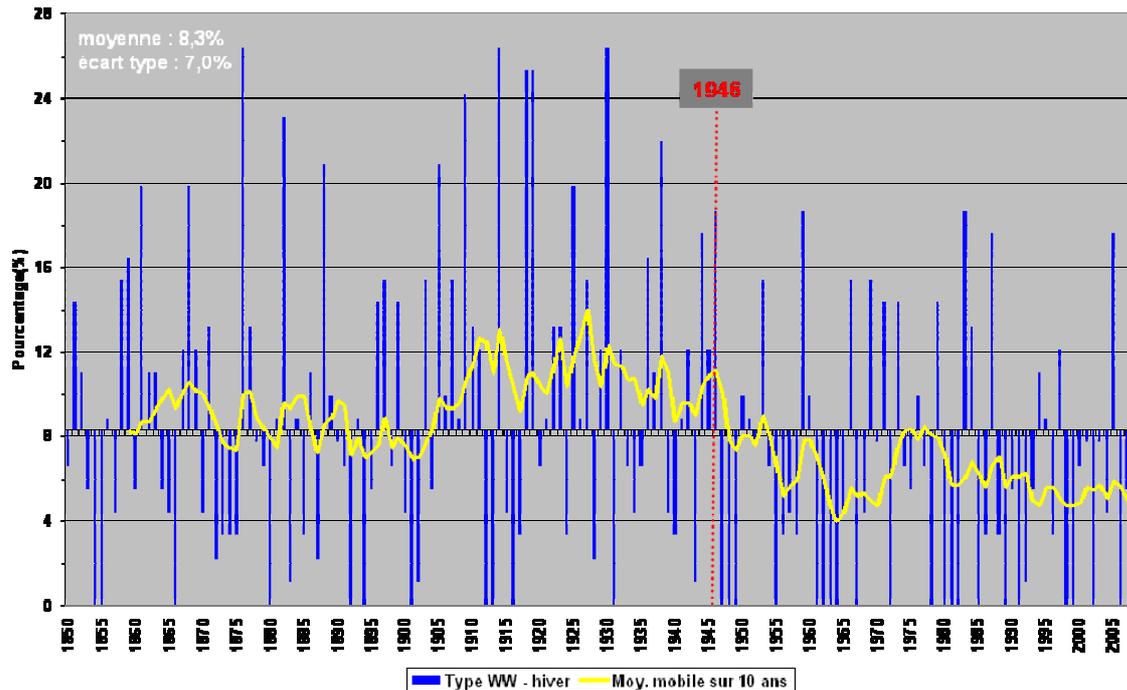


Figure 3.1.6. Occurrence hivernale (%) du type de circulation atmosphérique « WW » sur l'Europe de 1850 à 2008. Ecarts par rapport à la moyenne 1850-2008 et moyenne mobile sur 10 ans. La date de rupture significative selon le test de Pettitt (95%) est surimposée.

On observe également une tendance à la baisse du type « WW » (Fig. 3.1.6.) qui est parmi les plus fréquents en hiver. Avec 8,3% du total saisonnier, il se place au troisième rang après les circulations « WZ » et « WA » (Tab. 3.1.2.). Le test de rupture Pettitt fait ressortir l'année 1946 comme rupture dans la série. Ce type de circulation passe de 9,7% pour la période 1850-1946 à seulement 6.1% pour la période 1947-2008.

Au printemps, le type de circulation « HNFZ », le plus fréquent des types NE et E à cette saison (4,1%) montre une tendance significative à la baisse à partir de 1942 (Fig. 3.1.7.). Le pourcentage d'occurrence de ce type est réduit de presque la moitié si on compare la moyenne 1850-1942 (5.4%) à la moyenne 1943-2009 (2.7%).

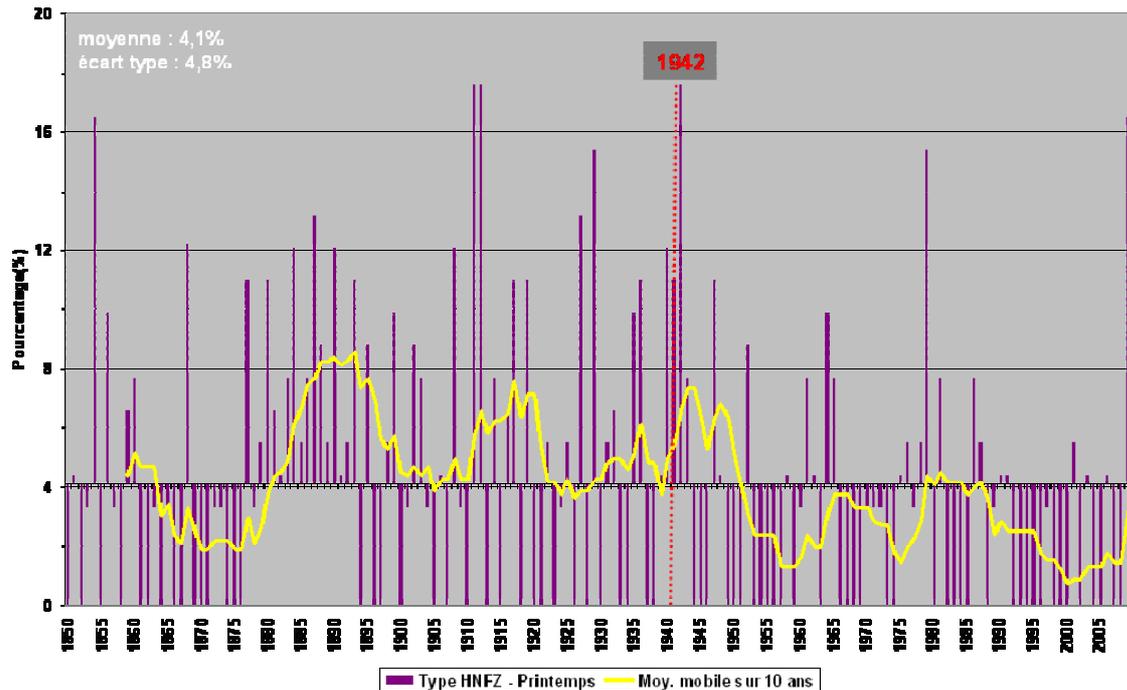


Figure 3.1.7. Occurrence printanière (%) du type de circulation atmosphérique « HNFZ » sur l'Europe de 1850 à 2009. Ecarts par rapport à la moyenne 1850-2009 et moyenne mobile sur 10 ans. La date de rupture significative selon le test de Pettitt (99%) est surimposée.

En été, ce sont les circulations de type « NA » (3,8% du total saisonnier en moyenne pour la période 1850-2009) qui se raréfient (Fig. 3.1.8.). Deux dates de rupture sont mis en évidence par le test de Pettitt : 1918 en considérant la période 1850-2009 et 1945 en considérant la période plus courte 1900-2009. Le pourcentage d'occurrence de ce type de circulation est réduit de plus de moitié si on compare la moyenne 1850-1918 (5.8%) à la moyenne 1919-2009 (2.4%). Une deuxième date de rupture (1945) ressort du test statistique sur la série réduite 1900-2008. La moyenne pour la période 1946-2009 n'est que de 2.2%.

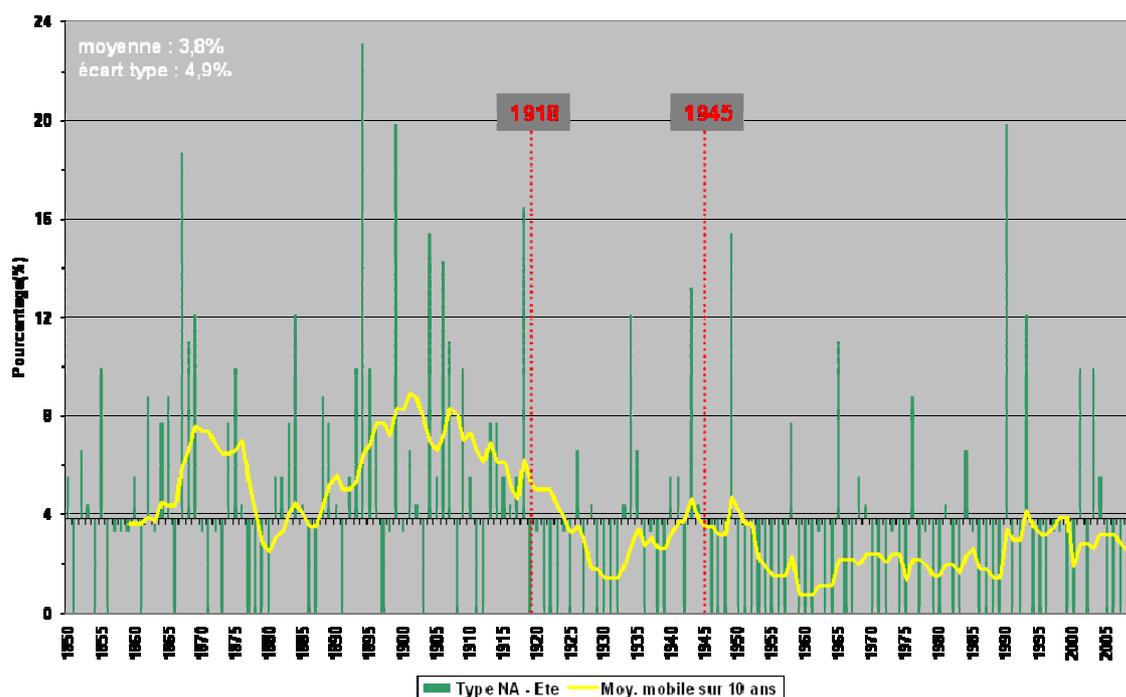


Figure 3.1.8. Occurrence estivale (%) du type de circulation atmosphérique « NA » sur l'Europe de 1850 à 2009 et moyenne mobile sur 10 ans. Les dates de rupture significatives selon le test de Pettitt à 99% (1918) et 95% (1945) sont surimposées.

Les tendances saisonnières, à la hausse des types de circulation « TRM » et « HB » en automne et « HB » en hiver ainsi qu'à la baisse du type de circulation « NA » en été, sont assez importantes pour se répercuter au niveau annuel (Tab . 3.1.3.).

3.1.3. Durée et enchaînements des circulations atmosphériques

Les enchaînements des types de circulation atmosphérique ont été appréhendé de la manière suivante : chaque passage d'un type à un autre (en travaillant avec les 5 classes GWT pour commencer) à été comptabilisé. Le pourcentage de type de passage a ensuite été calculé à l'échelle annuelle et à l'échelle saisonnière. Nous présentons les résultats sous forme de tableau à double entrée comme sur la Figure 3.1.9. Sur la période 1850-2008, les pourcentages les plus élevés concerne le passage des types de circulation de Sud aux types de circulations d'Ouest (12,7%) et inversement (10,3%) et le passage des types de circulation d'Ouest aux types de circulations du NW et N (9%) et inversement (8,4%). Ceci en toute logique puisque ce sont ces trois types de circulation atmosphérique qui prédominent.

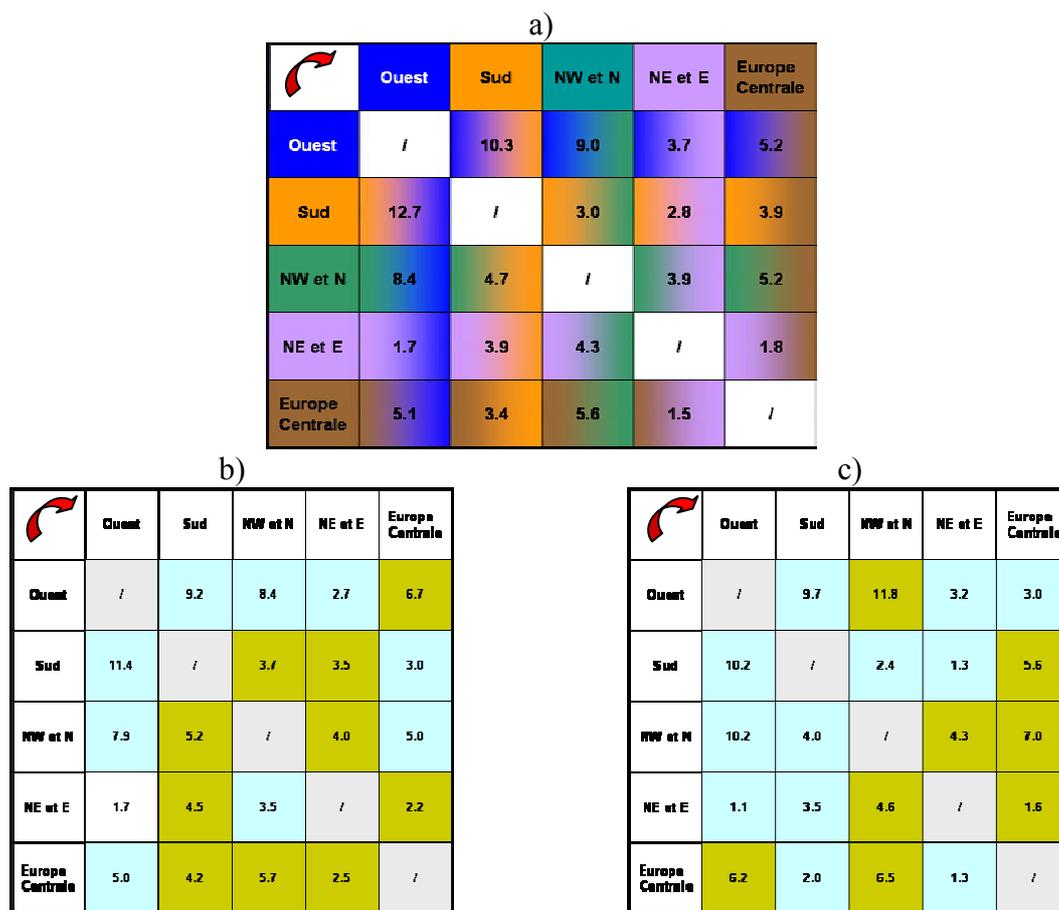


Figure 3.1.9. Enchaînements des types de circulation atmosphérique (%) en hiver sur la période 1850-2008 (a). Idem pour les trentennaires 1881-1910 (b) et 1971-2000 (c) ; les anomalies (par rapport à la moyenne 1850-2009) négatives sont sur fond bleu et les anomalies positives sur fond vert.

Ces tableaux (Fig. 3.1.9bc) montrent par exemple que les enchaînements de types de circulation atmosphérique diffèrent d'une série trentenaire à l'autre. Il sera très intéressant d'affiner ce travail année par année pour le mettre en relation avec les anomalies thermiques et pluviométriques. C'est peut-être l'une des clés principale d'explication des risques climatiques liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air. Cette direction de recherche est d'autant plus intéressante que cela n'a jamais été réalisé auparavant.

3.1.4. Conclusion

Quelques tendances statistiquement significatives sur la série 1850-2009 ont été observées au pas de temps saisonnier. On montre qu'en retirant les 50 premières années de la série 1850-2009, certaines de ces tendances se maintiennent, ne sont plus détectées ou que d'autres apparaissent. Ceci montre la nécessité d'étudier les séries les plus longues possibles, puisque certaines tendances ont pu être décelées très tôt dans la série.

Les tendances sont observées aussi bien sur des situations faiblement que fortement représentées et peuvent donc avoir des impacts différents.

Des oscillations irrégulières mettent en évidence des groupes d'années avec des caractéristiques particulières. Cependant, un même type de circulation n'engendre peut-être pas le même impact thermique et/ou pluviométrique en fonction des périodes, ou peut-être l'intensité d'un type d'impact climatique donné a-t-elle pu varier.

3.2. Impacts thermiques et pluviométriques

3.2.1. Introduction : rappel des tendances observées

L'analyse des impacts thermiques et pluviométriques des types de circulations atmosphériques a été effectuée sur un groupe de types de circulations ou GWT (circulations de Sud) et sur trois types de circulations individuels (GWL), pour lesquels les analyses statistiques présentées dans le chapitre précédent ont permis de détecter les tendances les plus significatives (Tab. 3.2.1. et 3.2.2.), avec des dates de rupture permettant la comparaison de stations pour lesquelles des longues séries de données quotidiennes de températures minimales (TN), de températures maximales (TX) et de précipitations ont été disponibles.

Les stations de Rennes et Genève ont été retenues, situées de part et d'autre d'un espace couvrant la France centrale et dont l'extension d'ouest en est permet de mettre en évidence certains caractères climatiques liés à la continentalité. Les données de ces deux stations ont été obtenues par le serveur de la base de données climatiques européennes ECA&D, hébergé par l'institut météorologique des Pays-Bas (*European Climate Assessment & Dataset* : <http://eca.knmi.nl/>).

D'autre part, afin d'avoir une idée de la spatialisation des impacts en référence à d'autres stations, les données quotidiennes de TN, TX et précipitations ont été obtenues auprès de Météo-France par l'intermédiaire de la climathèque, pour quatre stations du Centre-Ouest de la France (Angers, Nantes, Romorantin et Saumur) permettant de cerner le Val de Loire, puisque celui-ci fait l'objet d'études détaillées dans le cadre de deux autres programmes (CLIMASTER et ANR-JC07-194103 TERVICLIM). Les données n'ont été obtenues que depuis 1950, c'est-à-dire une date postérieure aux dates de rupture ce qui n'a pas permis une étude de tendance, mais a permis de comparer les impacts thermiques et pluviométriques d'une station à l'autre, afin d'en dégager une ébauche de logique spatiale.

SAISON	GWT	Période	Date de rupture	Seuil	Tendance
Printemps	NE et E	1850-2009	1942	95%	
		1900-2009	1942	90%	
	Europe Centrale	1850-2009	1942	99%	
		1900-2009	1942	95%	
Automne	NW et N	1850-2008	1883	95%	
		1900-2008	/	/	
Hiver	NW et N	1850-2008	1930	95%	
		1900-2008	/	/	
	Sud	1850-2008	1938	99%	
	1900-2008	1977	95%		
	1950-2008	1981	90%		

Tableau 3.2.1. Rappel des tendances significatives (GWT) au pas de temps saisonnier (test de Pettitt).

SAISON	GWT	GWL	Période	Date de rupture	Seuil	Tendance
Printemps	NE et E	HNFZ	1850-2009	1942	95%	↓
			1900-2009	1942	90%	
Été	NW et N	NA	1850-2009	1918	99%	↓
			1900-2009	1945	95%	
Automne	NW et N	TRM	1850-2008	1949	95%	↑
			1900-2008	/	/	
Hiver	NW et N	HB	1850-2008	1924	99%	↑
			1900-2008	/	/	
Hiver	Ouest	WW	1850-2008	1946	95%	↓
			1900-2008	1946	95%	

Tableau 3.2.2. Rappel des tendances significatives (GWL) au pas de temps saisonnier (test de Pettitt).

3.2.2. Impacts des circulations de SUD en hiver

Les circulations de Sud regroupent 8 GWL (Tab. 1.1) et constituent, avec les circulations d'Ouest, le groupe de types de circulations atmosphériques le plus pluvigène sur l'Europe de l'Ouest (voir 2.1.). Leurs impacts sur la température ne sont pas à négliger non plus, puisque ces types de circulations impliquent des masses d'air relativement chaud. La fréquence de l'ensemble des circulations de Sud a accusé une diminution de 24 % en hiver de 1850 à 2009, avec, sur la série 1900-2008 pour pouvoir comparer avec les données de Genève, une rupture significative en 1977.

3.2.2.1. Les impacts thermiques

A Genève, les températures minimales et maximales associées au type de circulation de Sud sont logiquement plus élevées que les moyennes calculées pour tous types de circulations confondus (Fig. 3.2.1. et Fig. 3.2.2) et en hausse, une hausse d'ailleurs plus marquée sur les températures maximales, ce qui semblerait coïncider avec les manifestations du réchauffement global ressenti au cours du dernier quart du XX^e siècle.

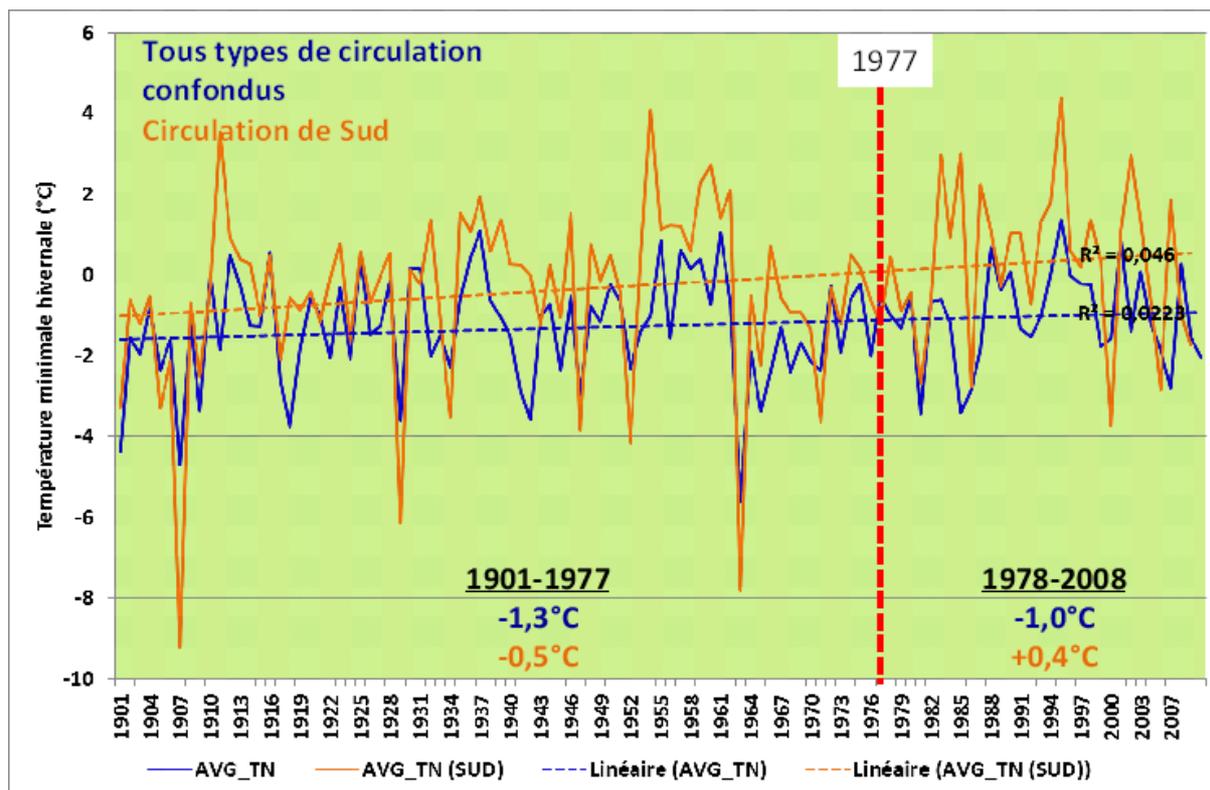


Figure 3.2.1. Evolution de la température minimale hivernale à Genève (1901-2008). La date de rupture significative calculée pour la fréquence des circulations de Sud en Hiver de 1900 à 2009 est surimposée en pointillé rouge (1977). Les températures minimales moyennes associées au type de circulation de Sud (en orange) et tous types confondus (en bleu) sont calculées pour 2 périodes, avant (1901-1977) et après (1978-2008) la date de rupture.

En effet, l'évolution de la température maximale permet de supposer que l'impact des circulations de sud sur la température s'est accentué dans le dernier quart du XX^e siècle.

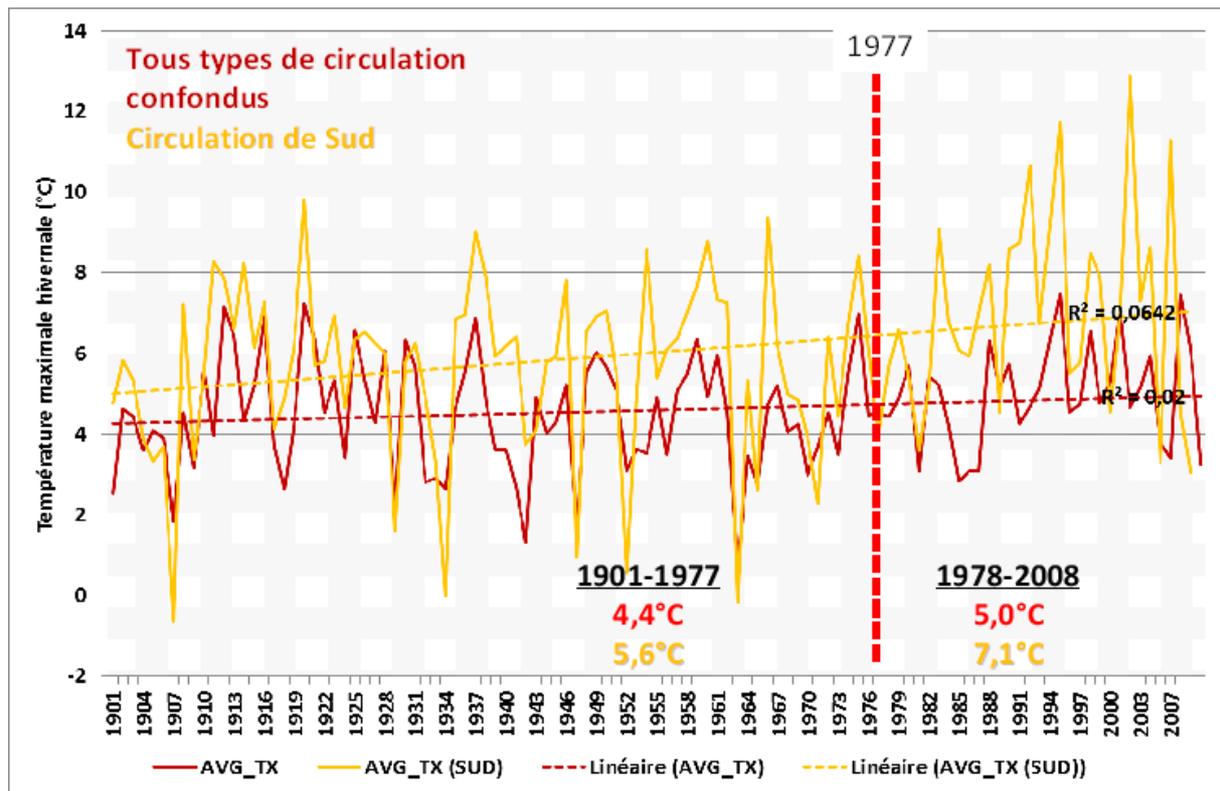


Figure 3.2.2. Evolution de la température maximale hivernale à Genève (1901-2008). La date de rupture significative calculée pour la fréquence des circulations de Sud en Hiver de 1900 à 2009 est surimposée en pointillé rouge (1977). Les températures maximales moyennes associées au type de circulation de Sud (en jaune) et tous types confondus (en rouge) sont calculées pour 2 périodes, avant (1901-1977) et après (1978-2008) la date de rupture.

3.2.2.2. Les impacts pluviométriques

Les figures 3.2.3. et 3.2.4. montrent une évolution analogue des précipitations hivernales au cours du XX^e siècle, de Rennes à Genève. Le total pluviométrique généré par les circulations de sud est logiquement en baisse en raison de la diminution de la fréquence de ce type de circulation, mais cette baisse n'affecte pas le total pluviométrique général des 2 stations (celui généré par tous types de circulation confondus) qui, lui est en hausse. La baisse du total pluviométrique généré par les circulations de sud est donc largement compensée par les précipitations liées aux autres types de circulations.

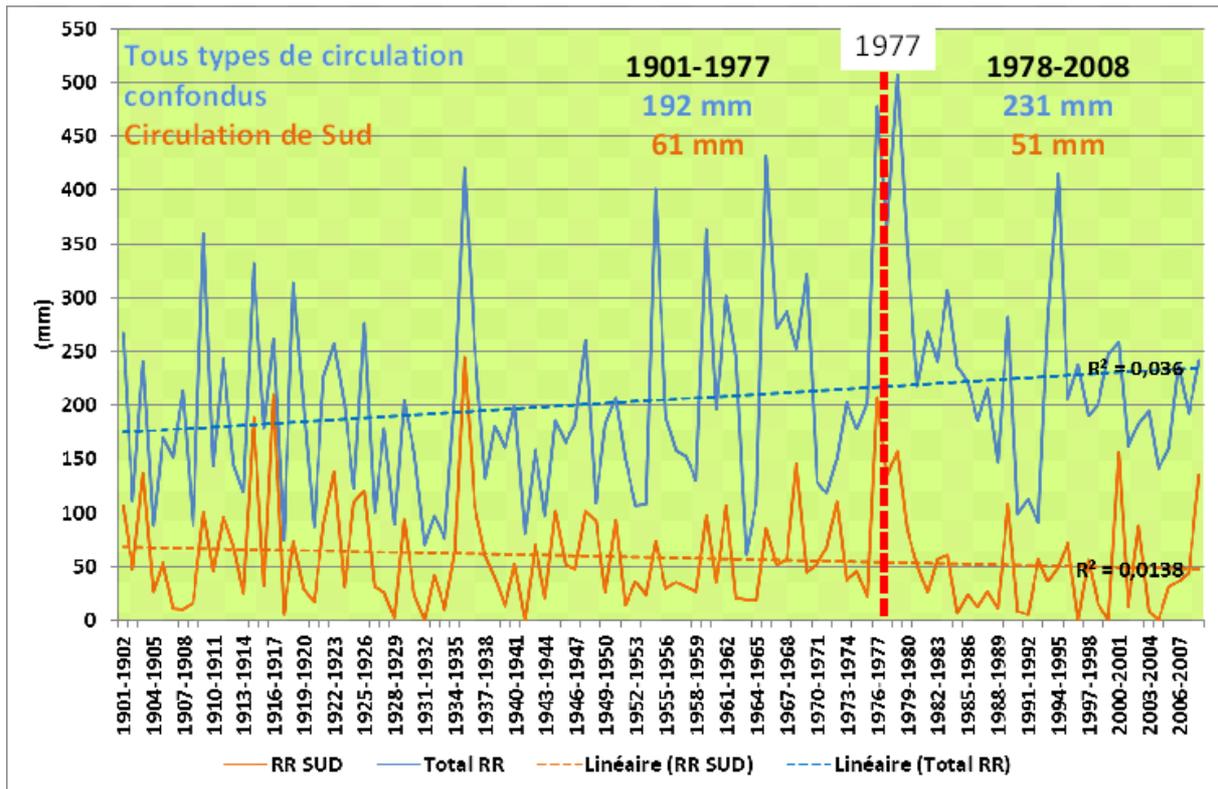


Figure 3.2.3. Evolution du total pluviométrique hivernal à Genève (1901-2008). La date de rupture significative calculée pour la fréquence des circulations de Sud en Hiver de 1900 à 2009 est surimposée en pointillé rouge (1977). Le total pluviométrique associé au type de circulation de Sud (en orange) et les précipitations hivernales (tous types confondus- en bleu) sont calculés pour 2 périodes, avant (1901-1977) et après (1978-2008) la date de rupture.

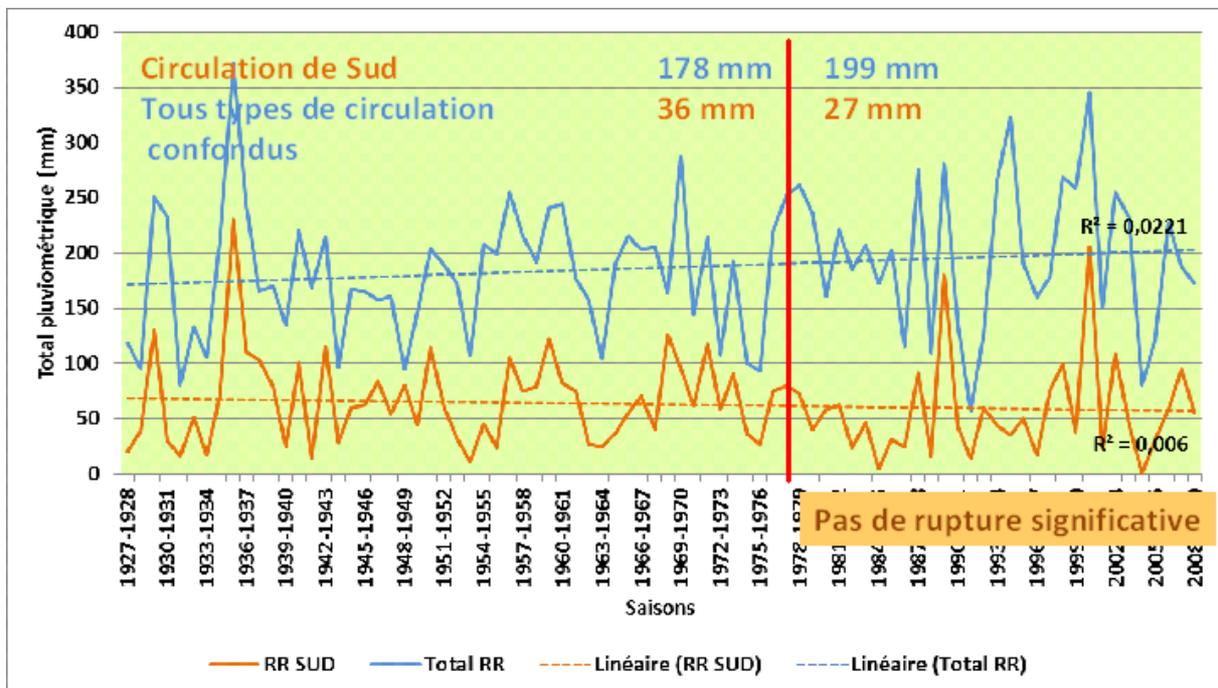


Figure 3.2.4. Evolution du total pluviométrique hivernal à Rennes (1927-2009).

La diminution de la proportion de précipitations liées aux circulations de Sud au cours du XX^e siècle à Genève et à Rennes (Fig. 3.2.5. et 3.2.6.) est faible (respectivement 15 et 10%) et

fortement bruitée par la variabilité interannuelle, mais constitue un effet direct de la diminution de la fréquence d'apparition des circulations de Sud au cours de la même période.

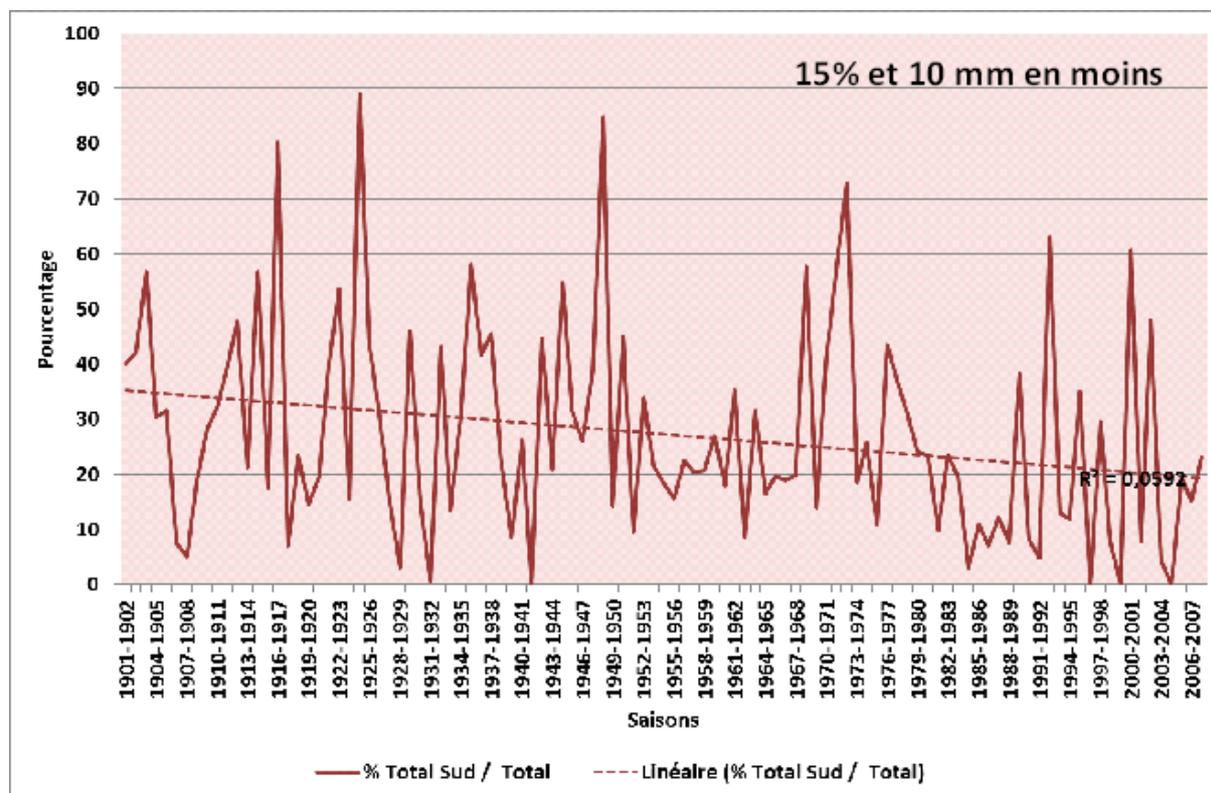


Figure 3.2.5. Evolution du pourcentage pluviométrique hivernal Circulation de Sud / Tous types de circulation confondus à Genève (1901-2008).

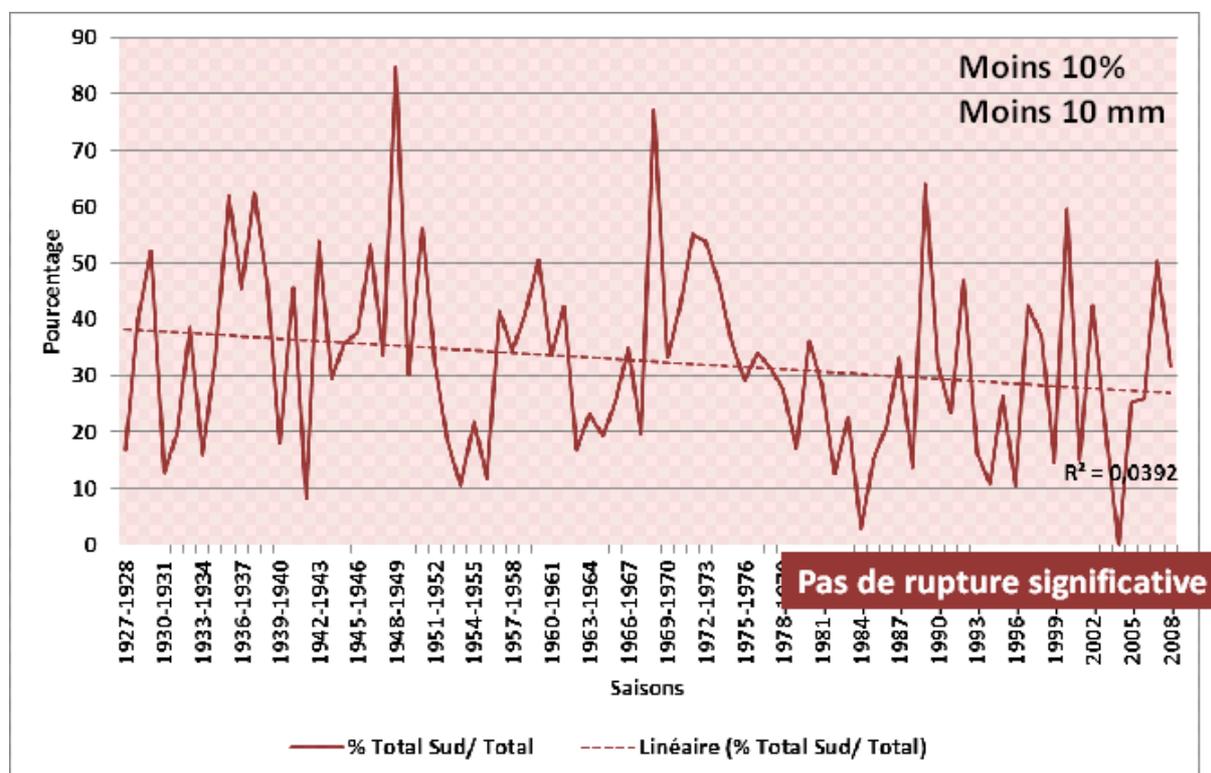


Figure 3.2.6. Evolution du pourcentage pluviométrique hivernal Circulation de Sud / Tous types de circulation confondus à Rennes (1927-2009).

Sachant que les circulations de Sud sont les plus pluvieuses avec celles d'Ouest dans une grande partie de l'Europe occidentale, l'augmentation (non significative) des précipitations tous types de circulations confondus pose la question (déjà posée par plusieurs auteurs, cf. références bibliographiques citées par Dupont *et al.*, 2008 et Planchon *et al.*, 2009) des modifications de la fréquence et de la durée des épisodes de circulations d'Ouest, et tout particulièrement du renforcement des intensités pluvieuses.

3.2.2.3. Impacts des circulations de SUD en hiver : synthèse et conclusion

Aux deux extrémités d'un espace couvrant la France centrale, les stations de Genève et Rennes réagissent de la même façon à l'évolution de la fréquence des circulations de Sud. Les statistiques détaillées données pour Genève, pour laquelle ont été disponibles des données complètes sur tout le XX^e siècle (il s'agit de l'une des plus anciennes et longues séries de données climatiques d'Europe), confirme la place des circulations de Sud par rapport aux autres types de circulations sur l'ensemble de la période considérée (Tab. 3.2.3.), par leurs impacts sur les précipitations (en deuxième place après les circulations d'Ouest pour leur caractère pluvieux) et sur les températures (air chaud, donc adoucissement).

	GWT	TotRR (%)	NBJ_RR (%)	NBJ_RR10 (%)	NBJ_RR0 (%)	AVG_TN	AVG_TX
1901-2008	Ouest	45,2	39	50	24	1,3	2,3
	SUD	28,7	27	28	20	1,0	1,4
	NW/N	18,5	22	17	28	-0,8	-0,8
	NE/E	5,8	9	3	16	-1,6	-2,6
	Eur Cen	3,1	6	2	17	-0,7	-1,6
1901-1977	Ouest	44,1	38	50	23	1,3	2,2
	SUD	32,0	30	32	21	0,9	1,1
	NW/N	16,4	20	13	28	-0,8	-0,9
	NE/E	6,2	9	4	15	-1,5	-2,4
	Eur Cen	2,7	5	2	17	-0,6	-1,6
1978-2008	Ouest	48,6	41	52	26	1,2	2,4
	SUD	22,0	20	21	17	1,4	2,1
	NW/N	22,7	25	23	26	-0,6	-0,7
	NE/E	5,0	9	3	18	-1,7	-3,2
	Eur Cen	3,7	8	3	17	-0,9	-1,6

Tableau 3.2.3. Synthèse des impacts des GWT en hiver à Genève (1901-2008).

Le découpage en deux périodes (avant et après la rupture statistique de 1977 sur la fréquence des types de circulation de Sud) met en évidence quelques particularités déjà décrites pour la fin du XX^e siècle, en particulier l'accentuation de l'impact des circulations de Sud sur l'adoucissement des températures hivernales, surtout les maximales journalières, et la diminution de la part des précipitations liées à ces mêmes types de circulations. On a donc deux évolutions apparemment contradictoires compte tenu de la diminution de la fréquence des circulations de Sud. Tandis que l'on peut clairement conclure à une intensification de l'effet adoucissant de circulations de Sud, la diminution « logique » des précipitations est nécessairement compensée par l'augmentation du caractère pluvieux des autres types de circulations (Ouest, mais aussi Nord-Ouest et Nord).

Une validation de ces résultats avec un plus grand nombre de stations n'a pas été possible, car d'autres longues séries de données n'ont pas été disponibles. Cependant, une comparaison des impacts pluviométriques et thermiques a été possible avec quelques stations du Centre-Ouest de la France pour la période 1950-2009 (Tab. 3.2.4.).

Stations (période)	Total (mm)	Nbj avec RR	Nbj sans RR	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	62	13	6	3,4	9,5
Nantes (1950-2009)	77	13	6	4,2	10,7
Angers (1950-2009)	52	12	7	3,9	10,1
Saumur (1950-2009)	42	11	8	3,8	10,3
Romorantin (1952-2009)	42	11	7	2,5	10,2
Genève (1950-2009)	54	9	10	0,1	6,4

Tableau 3.2.4. Circulations de Sud en Hiver : impacts pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

En circulation de Sud, la station de Nantes ressort par ses précipitations plus abondantes et ses températures plus élevées, caractères liés à son climat maritime (Planchon, 1997). Au contraire, la position continentale de Genève se traduit par des températures nettement plus basses, alors que les quantités de précipitations ne diffèrent pas de celles reçues par les stations du Centre-Ouest de la France. Si, en Suisse, les circulations de Sud sont fortement pluviogènes en premier lieu (et logiquement) sur le versant sud des Alpes, les autres régions du pays ne sont pas épargnées (Fallot, 2000). Ainsi, l'orientation des massifs montagneux pourtant élevés environnant Genève (Jura méridional et Alpes occidentales) ne garantit pas un effet d'abri tel qu'on peut l'observer dans certains bassins d'Europe centrale et occidentale encadrés par des massifs d'altitude plus modeste (Planchon, 1992 et 2005). L'homogénéité pluviométrique et thermique des stations du bassin de la Loire moyenne reflète son homogénéité topographique d'ensemble (bas plateaux). Seule la station de Romorantin se distingue par des températures minimales plus basses, liées au rayonnement amplifié par le sol sableux de la région (Bonney *et al.*, 2010). De plus, l'affaiblissement du vent sur un espace à dominante forestière (la Sologne dans ce cas), et donc à forte rugosité, aggrave les possibilités de basses températures minimales et les gelées de rayonnement (Oke, 1978 ; Escourrou, 1981 ; Pinty *et al.*, 1989).

La conversion de ces mêmes valeurs en proportions et en anomalies (Tab. 3.2.5.) fait ressortir l'originalité thermique de Romorantin par des anomalies positives de température plus fortes que les autres stations par flux de Sud. Cette particularité illustre les contrastes thermiques quotidiens auxquels est soumise cette station, en relation directe avec des facteurs

géographiques locaux (topoclimatiques, avec forte influence du substratum et de l'occupation du sol).

Stations (période)	Total (% saisonnier)	Nbj avec RR (% saison)	Nbj sans RR (% saison)	Ano TN (°C)	Ano TX (°C)
Rennes (1950-2009)	32	27	14	+1,2	+1,3
Nantes (1950-2009)	32	27	14	+1,8	+1,9
Angers (1950-2009)	29	26	15	+1,9	+2,0
Saumur (1950-2009)	26	26	16	+1,8	+2,1
Romorantin (1952-2009)	25	25	16	+2,2	+2,6
Genève (1950-2009)	24	23	19	+1,2	+1,7

Tableau 3.2.5. Circulations de Sud en Hiver : anomalies pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

3.2.3. Impacts des circulations d'OUEST de type « WW » en hiver

Les circulations d'Ouest de type « WW » sont caractérisées, en hiver, par un fort contraste de masses d'air entre l'ouest de l'Europe sous l'influence de systèmes perturbés d'origine atlantique (basses pressions de surface à proximité de l'Islande) et l'Europe orientale sous l'influence de hautes pressions de surface sur la Russie (Fig. 3.2.7). Ce contraste de masses d'air se traduit par des températures légèrement excédentaires sur l'Europe occidentale baignée par l'air océanique humide et anormalement basses sur l'Est de l'Europe (Russie surtout) dominé par les conditions anticycloniques. Les circulations de type WW se manifestent aussi notamment par de fortes différences pluviométriques entre l'Ouest de l'Europe (anomalies positives) et l'Est (anomalies négatives). La fréquence de ce type de circulation a diminué de 8,3 % en hiver de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1946.

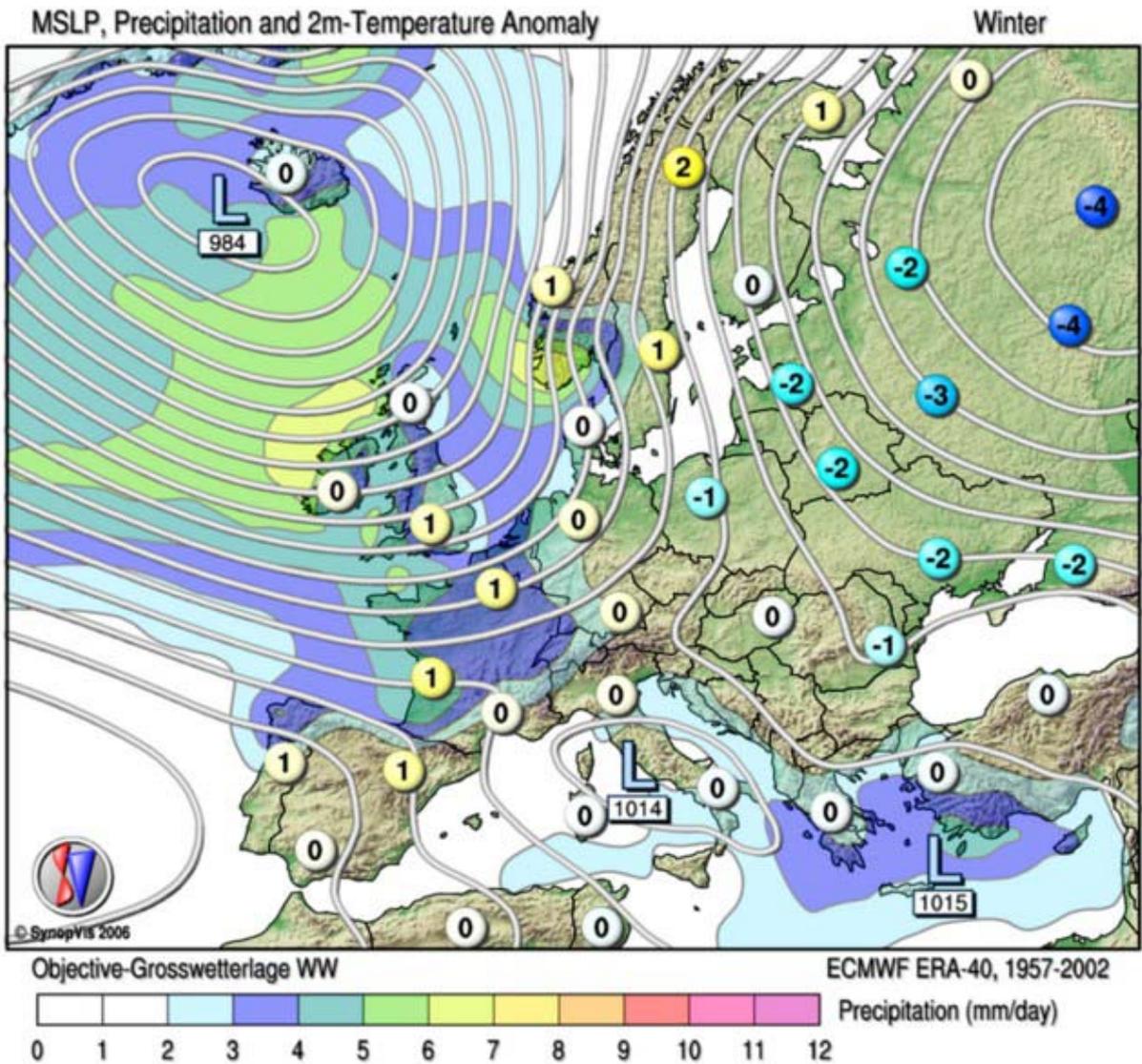


Figure 3.2.7. Configuration isobarique moyenne de la situation « WW » en hiver et anomalies thermiques et pluviométriques s sur l'Europe. Source : <http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html> (2008)

Compte tenu de la faible proportion de ce type de circulation (et, de surcroît, en baisse au cours du XX^e siècle : Tab. 3.2.6.), la part des précipitations associées est faible. En revanche, la hausse des températures liées au type WW durant la période succédant à la rupture statistique de 1946 mérite une attention particulière.

	%	TotRR (%)	NBJ_RR (%)	NBJ_RR10 (%)	NBJ_RR0 (%)	AVG_TN	AVG_TX
1901-2008	7,9	26	4	1	4	-0,1	6,2
1901-1946	10,3	27	5	1	5	-0,3	5,8
1947-2008	6,2	25	4	2	3	0,1	6,6

Tableau 3.2.6. Résumé des impacts pluviométriques et thermiques de la situation WW en hiver, à Genève (1901-2008).

3.2.3.1. Les impacts thermiques

La fréquence d'apparition de températures minimales quotidiennes (TN) et maximales quotidiennes (TX) anormalement basses ou élevées a été calculée et classée en fonction de l'intensité des anomalies. Les résultats obtenus montrent, sur l'ensemble de la période, que les valeurs proches de la moyenne sont nettement plus fréquentes (majoritaires) à Rennes qu'à Genève (Fig. 3.2.8. et 3.2.9.), laissant fort peu de place aux valeurs extrêmes dans la première des deux stations. La forte variabilité des températures quotidiennes hivernales par type de circulation de type WW, s'accompagnant d'une accentuation des extrêmes, illustre bien, au-delà du simple effet de continentalité, la position de Genève à proximité du contact entre deux masses d'air thermiquement contrastés : air océanique et « tiède » à l'ouest ; air continental et froid à l'est de l'Europe. Le Centre-Ouest de l'Europe se situe alors au contact entre ces deux masses d'air, contact dont le mouvement d'un jour à l'autre est donc susceptible de provoquer de brusques sautes de température. Les régions de l'Est de la France, l'Allemagne et les pays alpins connaissent fréquemment, en saison froide, ces situations à fort gradient thermique longitudinal (Planchon, 1991). A Rennes, comme dans l'ensemble des régions de l'ouest de la France, la persistance de la masse d'air d'origine océanique contribue à atténuer les variations de température et rendent ainsi plus rares les fortes anomalies.

Malgré la différence observée entre Rennes et Genève, les deux stations ont en commun une fréquence plus élevée de journées à anomalies thermiques positives (TN et TX), en particulier à Genève, ce qui traduit l'importance de l'impact thermique de l'air d'origine océanique relativement chaud (ou « tiède », en hiver), notamment dans les régions continentales où l'irruption de celui-ci se fait sentir de façon d'autant plus sensible. Le découpage de la période étudiée en deux sous-périodes divisées par la rupture statistique de 1946, tendrait même à montrer que cet impact « adoucissant » s'est renforcé à Rennes dans la deuxième moitié du XX^e siècle (Fig. 3.2.11.).

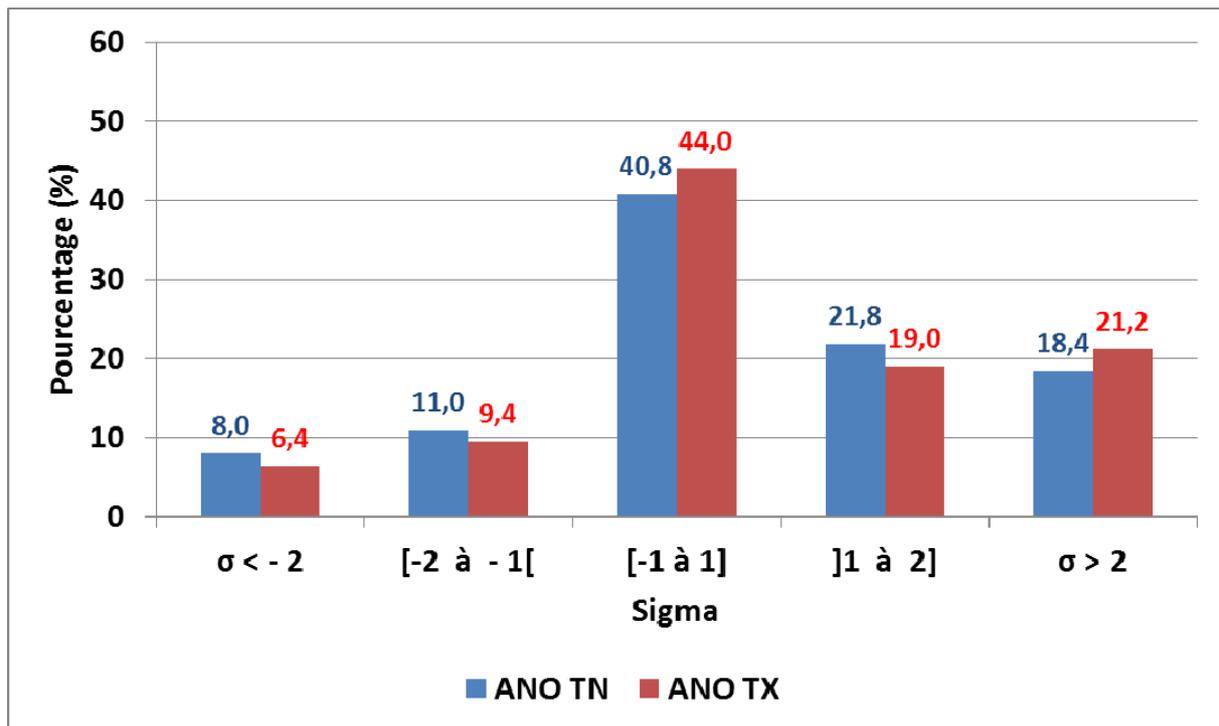


Figure 3.2.8. Impact du type de circulation « WW » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'hiver à Genève (1901-2008).

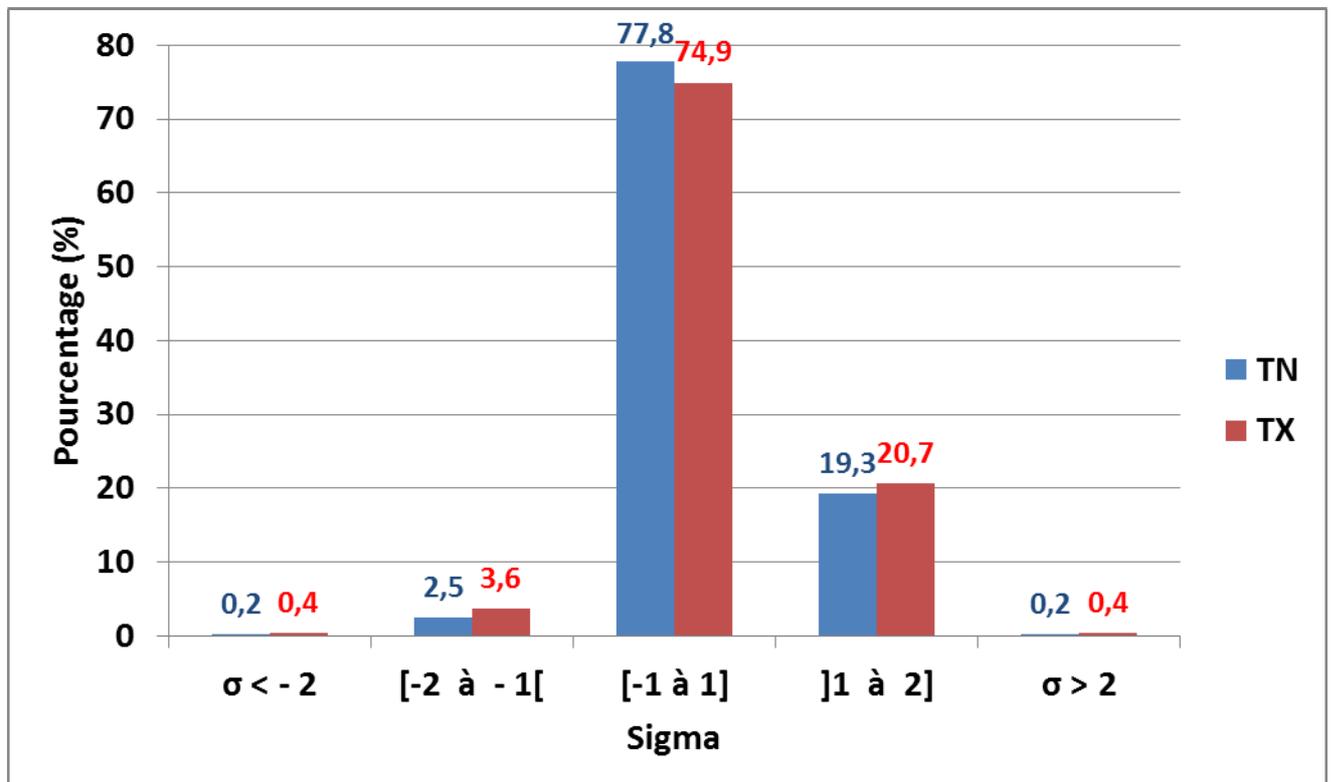


Figure 3.2.9. Impact du type de circulation « WW » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'hiver à Rennes (1925-2008).

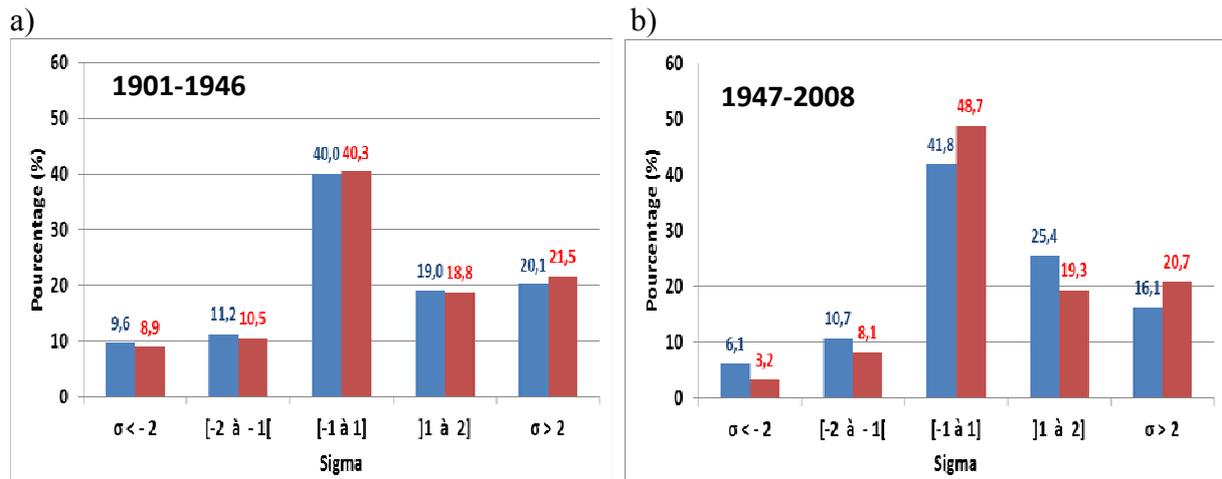


Figure 3.2.10. Impact du type de circulation « WW » sur les températures minimales (TN en bleu) et maximales (TX en rouge) quotidiennes d'hiver à Genève (a : 1901-1946 ; b : 1947-2008).

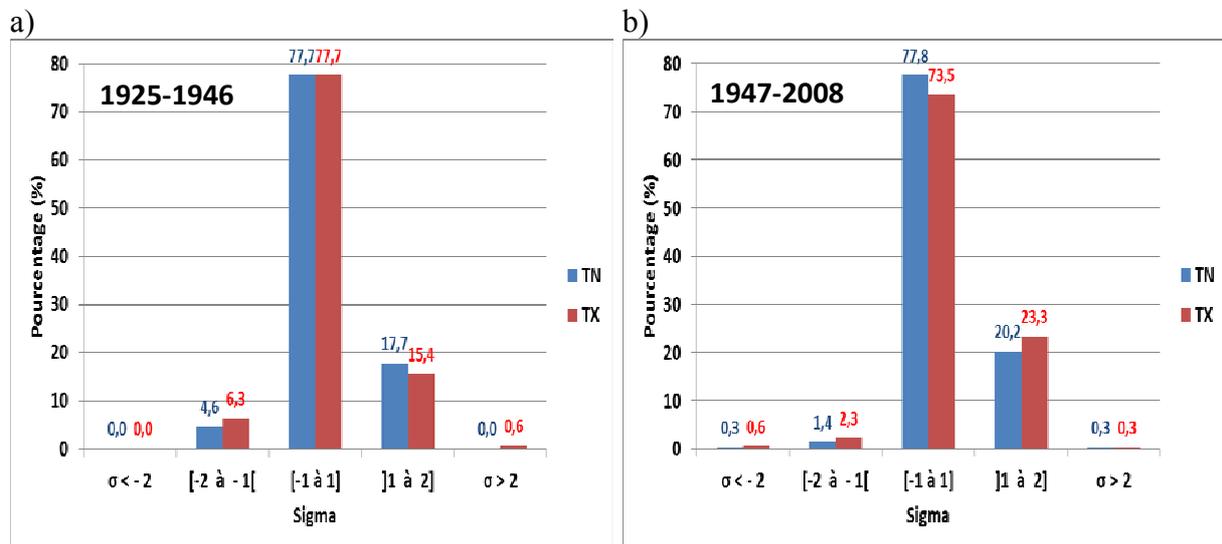


Figure 3.2.11. Impact du type de circulation « WW » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'hiver à Rennes (a : 1925-1946 ; b : 1947-2008).

A Genève de 1901 à 2008 (Fig. 3.2.10.) comme à Rennes de 1925 à 2008 (Fig. 3.2.11.), on constate une augmentation de la fréquence des températures anormalement élevées en hiver (surtout les minimales à Genève et les maximales à Rennes) par circulation de type WW. Les anomalies extrêmes ne sont pas affectées, mais ces résultats permettent d'affirmer que la douceur hivernale qui accompagne à l'occasion les situations de type WW se fait sentir de façon un peu plus insistante vers la fin du XX^e siècle, même modulée par la continentalité.

3.2.3.2. Impacts des circulations de type « WW » en hiver : synthèse et conclusion

La comparaison des impacts pluviométriques et thermiques sur la période récente (1950-2009) et pour l'ensemble des stations sélectionnées, incluant celles des pays de la Loire, fait à nouveau ressortir le climat maritime de Nantes, dans ce cas fortement influencé (du moins en quantité de pluie reçue) par les événements pluvieux hivernaux associés aux circulations de type WW (Tab. 3.2.7.). Toutes les autres stations (y compris Genève) diffèrent peu entre elles. Les impacts thermiques font ressortir l'homogénéité des stations du Centre-Ouest de la France, à l'exception (déjà montrée avec les circulations de Sud) de Romorantin (Tab. 3.2.8.). Ces stations bénéficient en moyenne de températures plus élevées qu'à Genève située plus souvent en marge des masses d'air d'origine océanique, d'où des anomalies plus faiblement positives en moyenne à Genève.

Stations (période)	Total (mm)	Nbj avec RR	Nbj sans RR	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	35	7	1	4,5	11,0
Nantes (1950-2009)	50	7	1	4,7	11,2
Angers (1950-2009)	34	7	2	4,4	10,7
Saumur (1950-2009)	30	6	2	4,1	10,8
Romorantin (1952-2009)	30	6	2	2,6	9,8
Genève (1950-2009)	36	5	3	0,2	6,6

Tableau 3.2.7. Circulations « WW » en Hiver : impacts pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

Stations (période)	Total (% saisonnier)	Nbj avec RR (% saison)	Nbj sans RR (% saison)	Ano TN (°C)	Ano TX (°C)
Rennes (1950-2009)	18	14	4	+2,4	+2,9
Nantes (1950-2009)	20	15	3	+2,3	+2,4
Angers (1950-2009)	19	14	4	+2,4	+2,6
Saumur (1950-2009)	19	14	4,5	+2,2	+2,5
Romorantin (1952-2009)	18	14	4	+2,3	+2,2
Genève (1950-2009)	16	13	5,5	+1,0	+1,9

Tableau 3.2.8. Circulations « WW » en Hiver : anomalies pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

Ainsi, il convient de distinguer les résultats obtenus en termes de fréquences et de moyennes. Si les anomalies thermiques sont plus fréquentes à Genève en raison de sa position géographique, cette même position explique aussi que les anomalies thermiques soient, en moyenne, plus faiblement positives à Genève que dans les régions du Centre-Ouest de la France exposées plus durablement aux masses d'air d'origine océanique.

3.2.4. Impacts des circulations de NORD-EST et EST de type « HNFZ » au printemps

Les circulations de Nord-Est et d'Est de type « HNFZ », anticycloniques sur le Nord de l'Europe et perturbées sur le centre et le Sud du continent (Fig. 3.2.12.), sont caractérisées, sur la France, surtout par des anomalies thermiques négatives (fortement négatives en saison froide), ce qui peut poser des problèmes quant aux risques de gel printanier. Les précipitations sont en moyenne légèrement excédentaires en saison chaude, surtout à l'Est (seulement dans la partie sud en saison froide). La fréquence de ce type de circulation a diminué de 4 % au printemps de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1942.

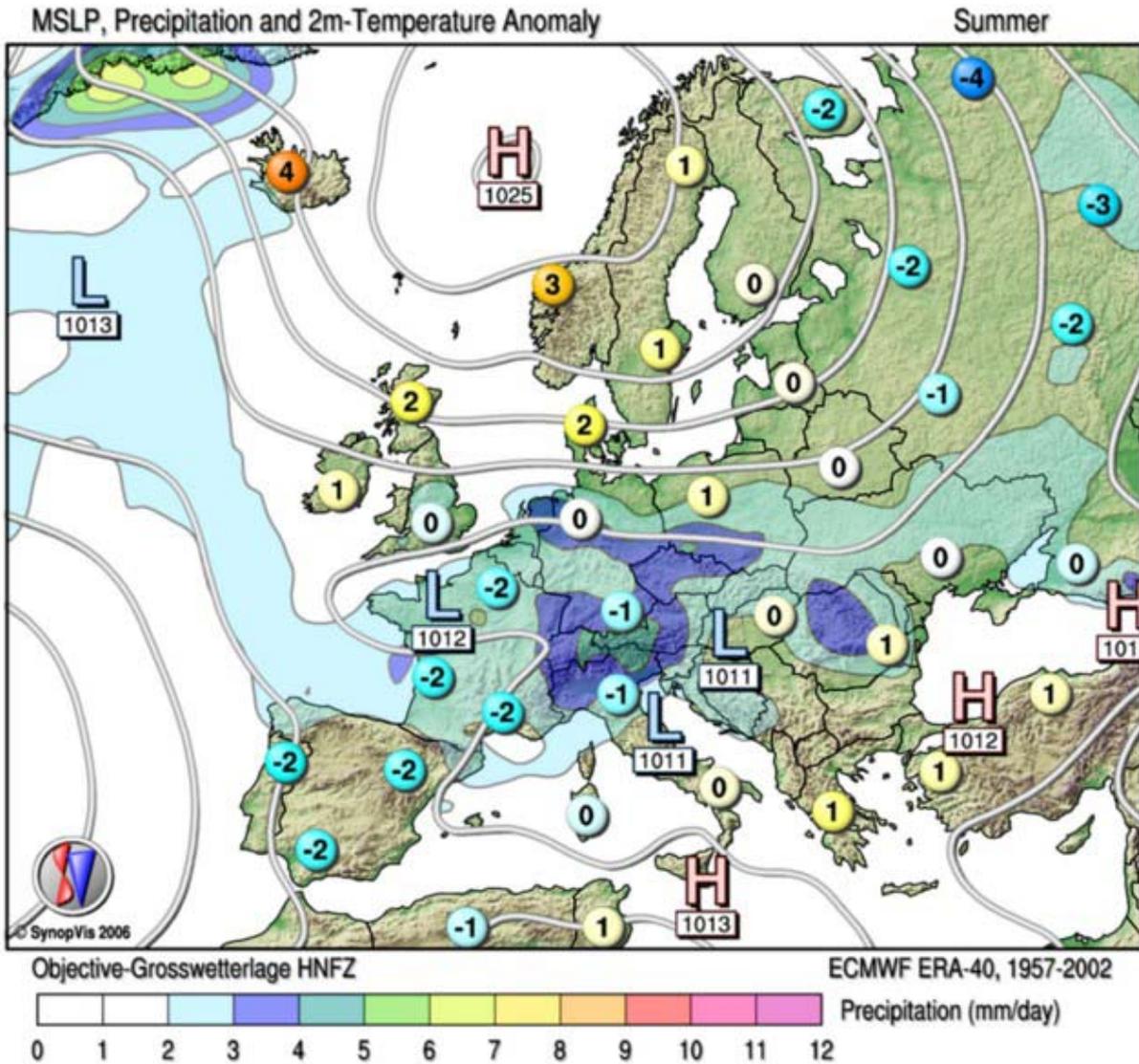


Figure 3.2.12. Configuration isobarique moyenne de la situation « HNFZ » en hiver et anomalies thermiques et pluviométriques sur l'Europe. Source : <http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html> (2008)

3.2.4.1. Les impacts thermiques

Le constat d'ensemble est analogue à ce que l'on a pu observer avec les impacts thermiques des circulations de type WW, c'est-à-dire une fréquence plus élevée des anomalies thermiques (supérieures à $+1\sigma$ ou inférieures à -1σ) à Genève qu'à Rennes (Fig. 3.2.13. et 3.2.14.). Dans les deux cas, ce sont les anomalies thermiques négatives (les TX en particulier) qui sont les plus fréquentes. La forte variabilité thermique de Genève en comparaison à Rennes est illustrée par la fréquence remarquablement élevée des anomalies négatives extrêmes.

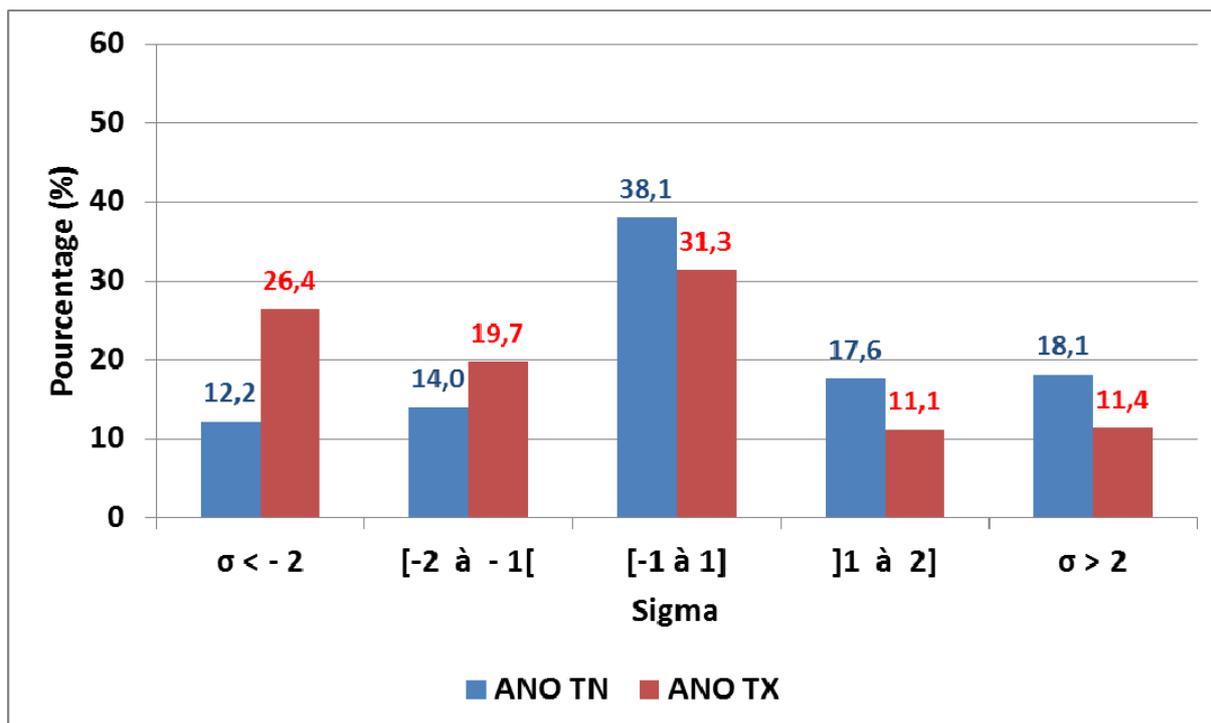


Figure 3.2.13. Impact du type de circulation « HNFZ » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes de printemps à Genève (1901-2009).

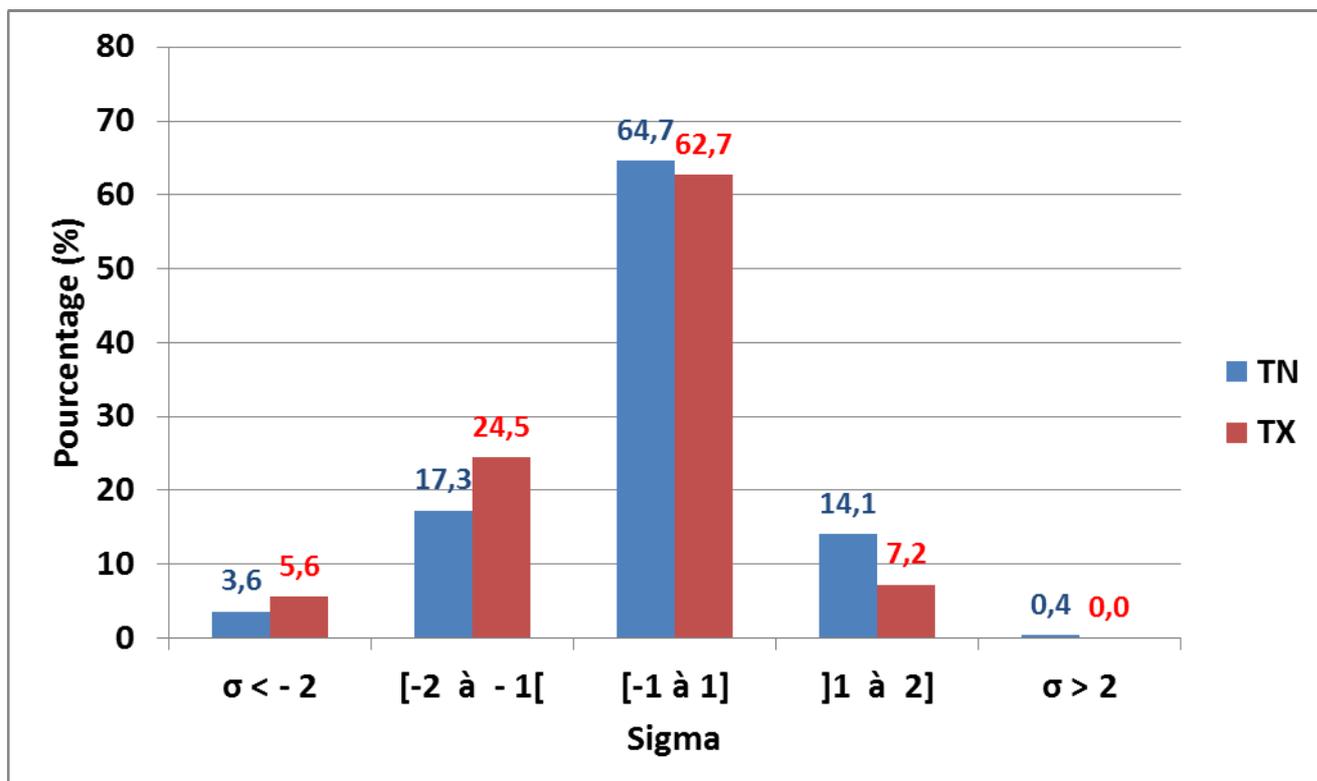


Figure 3.2.14. Impact du type de circulation « HNFZ » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes de printemps à Rennes (1925-2009).

Les circulations de type HNFZ dirigent des masses d'air continental sur l'Europe moyenne, alternant avec des phénomènes d'instabilité plus précisément sur l'Europe centrale

(apport d'air humide d'origine méditerranéenne). Bien connus en hiver, les « *retour d'Est* » associés au type HNFZ peuvent aussi apporter des chutes de neige tardives au printemps dans les massifs montagneux de l'Est de la France (Wahl *et al.*, 2007). Le type HNFZ est classé parmi les circulations *méridiennes* dans les rapports détaillés publiés par le P.I.K. (Werner et Gerstengarbe, 2010 / <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>).

Il convient de rappeler l'importance du printemps dans la mise en place de cette large catégorie de types de circulations, qui regroupe 18 des 29 GWL. Alors que le début de l'hiver (en décembre et janvier) est marqué par des Westerlies forts, les circulations méridiennes prennent une plus grande importance en février (Barry et Chorley, 1987). Le ralentissement de la circulation s'accroît au printemps et les circulations méridiennes atteignent leur fréquence la plus élevée en avril et mai (Lejenäs et Økland, 1983 ; Shukla et Mo, 1983), mais elles sont soumises à une forte variabilité d'un mois à l'autre (Moron, 1990). La fréquence la plus élevée des situations anticycloniques sur le nord-ouest de l'Europe est observée en mai (<http://www.uea.ac.uk>). De plus, les mers du Nord et Baltique atteignent leur plus basse température à la fin de l'hiver et au début du printemps, ce qui peut favoriser, par stabilisation des basses couches de l'atmosphère, une anticyclonogenèse étendue des îles Britanniques aux pays Baltes (Kendrew, 1961), permettant ainsi l'établissement de flux d'Est à Nord-Est sur l'Europe moyenne.

La diversité des types de circulations méridiennes et leur forte variabilité contribue à expliquer les brusques sautes de température printanières. L'exemple du type HNFZ suggère en plus une différenciation régionale de cette variabilité thermique, Genève étant plus exposée que Rennes aux changements de température provoqués par l'irruption de masses d'air venant du Nord-Est ou de l'Est dans l'axe déprimé du *Moyen-Pays* suisse ou *Mittelland*, entre Jura et Alpes et orienté NE-SW. Le découpage de la période de référence de chacune des deux stations en fonction de la rupture statistique de 1942 fait aussi ressortir quelques modifications dans la distribution des anomalies thermiques, d'une période à l'autre (Fig. 3.2.15. et 3.2.16.).

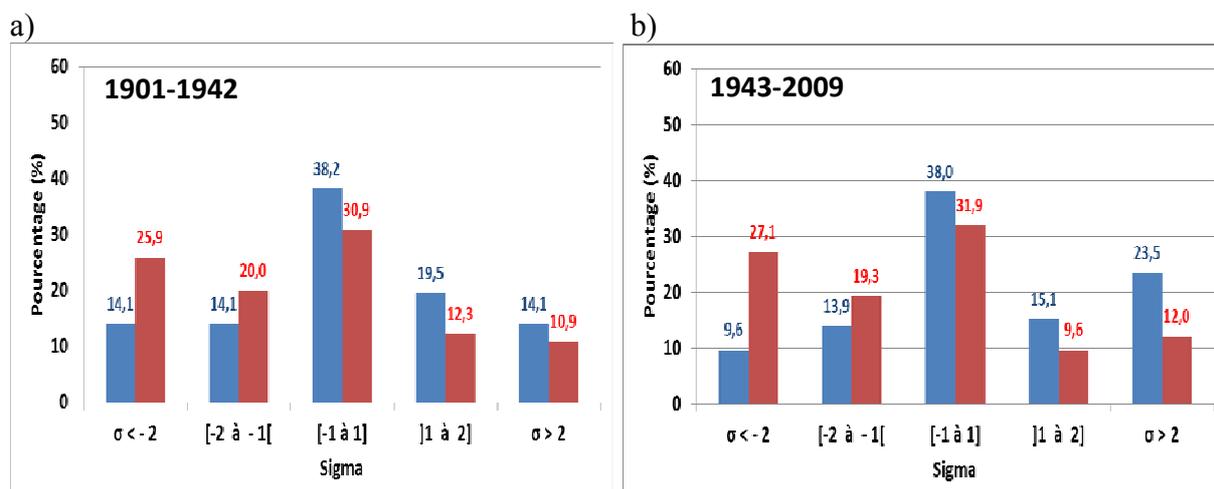


Figure 3.2.15. Impact du type de circulation « HNFZ » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes de printemps à Genève (a : 1901-1942 ; b : 1943-2009).

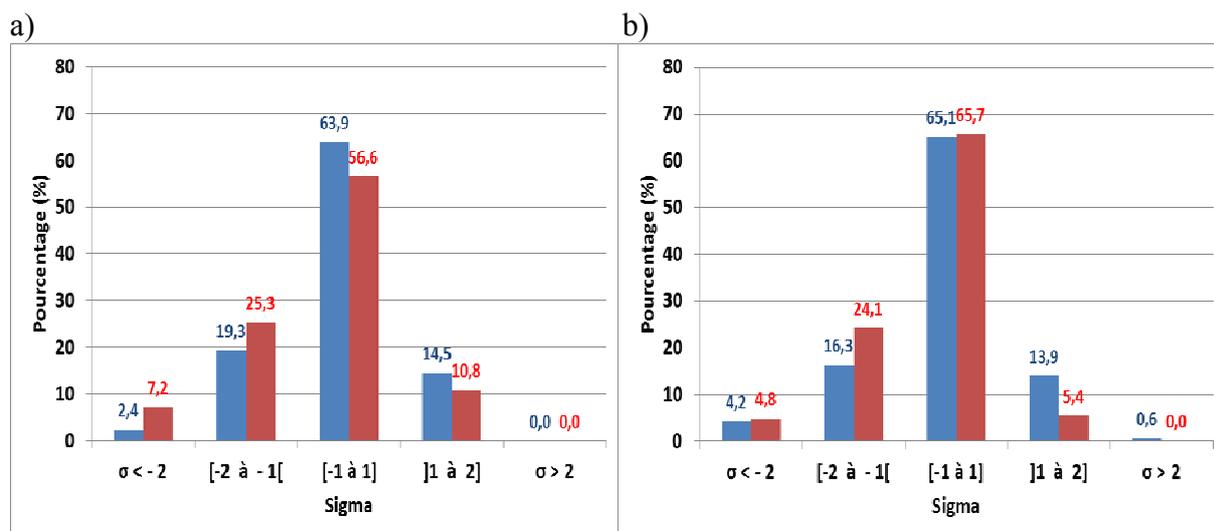


Figure 3.2.16. Impact du type de circulation « HNFZ » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes de printemps à Rennes (a : 1925-1942 ; b : 1943-2009).

A Genève, la fréquence de certaines anomalies thermiques extrêmes s'est renforcée : anomalies négatives des TX quotidiennes avec un écart-type inférieur à -2 ; anomalies positives des TN quotidiennes avec un écart-type supérieur à -2. Ainsi, avec une fréquence plus élevée de TX plus basses et de TN plus élevées, le type de circulation HNFZ tendrait donc à atténuer certains contrastes thermiques... Impliquerait-il une plus forte nébulosité ? Sans avoir encore la réponse à cette question, cette hypothèse est vraisemblable en référence à la figure. 3.2.12.

La station de Rennes, de 1925 à 2009, montre aussi une atténuation générale des contrastes thermiques au printemps par circulation HNFZ, mais aussi une augmentation de la fréquence des températures minimales extrêmes (2,4 à 4,2% de TN entre les deux périodes). Cette augmentation qui affecte des faibles pourcentages n'est pas à négliger, puisque le risque de gel printanier est une contrainte forte pour certaines cultures sensibles (cf. 2.3.).

3.2.4.2. Impacts des circulations de type « HNFZ » au printemps : synthèse et conclusion

La comparaison des impacts pluviométriques et thermiques sur la période récente (1950-2009) et pour l'ensemble des stations sélectionnées, incluant celles des pays de la Loire, isole une fois de plus Nantes des autres stations, cette fois à l'abri des précipitations liées aux retours d'Est (Tab. 3.2.9.). Les températures ne montrent pas, en valeur absolue, de différences significatives entre les stations. Les TX plus élevées à Saumur reflètent un caractère climatique local dont bénéficie cette station, en bordure d'un plateau crayeux, en position de cuvette abritée au centre du bassin de la Loire moyenne et inférieure (Quénol *et al.*, 2008 ; Bonnefoy *et al.*, 2010) et à l'intérieur du cadre régional déjà favorisé du Val de Loire (Pédelaborde, 1957). Les anomalies thermiques négatives affectent surtout les températures maximales, dans une moindre mesure à Genève (Tab. 3.2.10.). Les anomalies faiblement négatives des TN s'estompent vers l'est pour devenir positives dès le centre de la France (effet d'une plus forte nébulosité ?).

Stations (période)	Total (mm)	Nbj avec RR	Nbj sans RR	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	17	3	2	5,9	14,2
Nantes (1950-2009)	6	3	2	6,3	14,5
Angers (1950-2009)	18	3	2	6,0	14,4
Saumur (1950-2009)	17	3	2	6,1	15,2
Romorantin (1952-2009)	19	4	2	5,0	14,7
Genève (1950-2009)	17	4	2	6,2	14,2

Tableau 3.2.9. Circulations « HNFZ » au printemps : impacts pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

Stations (période)	Total (% saisonnier)	Nbj avec RR (% saison)	Nbj sans RR (% saison)	Ano TN (°C)	Ano TX (°C)
Rennes (1950-2009)	11	8	5	-0,3	-1,2
Nantes (1950-2009)	9	8	4	-0,3	-1,3
Angers (1950-2009)	11	8	4	-0,2	-1,4
Saumur (1950-2009)	12	9	4	-0,4	-1,3
Romorantin (1952-2009)	11	9	4	+0,5	-1,4
Genève (1950-2009)	8	9	4	+1,3	-0,7

Tableau 3.2.10. Circulations « HNFZ » au printemps : anomalies pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

3.2.5. Impacts des circulations de NORD-OUEST et NORD de type « NA » en été

Les circulations de Nord-Ouest et d'ouest de type « NA », anticycloniques sur le Nord-Ouest de l'Europe et perturbées sur l'Est (Fig. 3.2.17.), sont caractérisées, en saison chaude, par des températures voisines des normales saisonnières sur l'Europe de l'Ouest, mais inférieures aux normales sur l'Europe centrale et orientale, et des précipitations déficitaires sur une grande partie occidentale de l'Europe. La fréquence de ce type de circulation a diminué de 4 % en été de 1850 à 2009, avec une rupture significative en 1945.

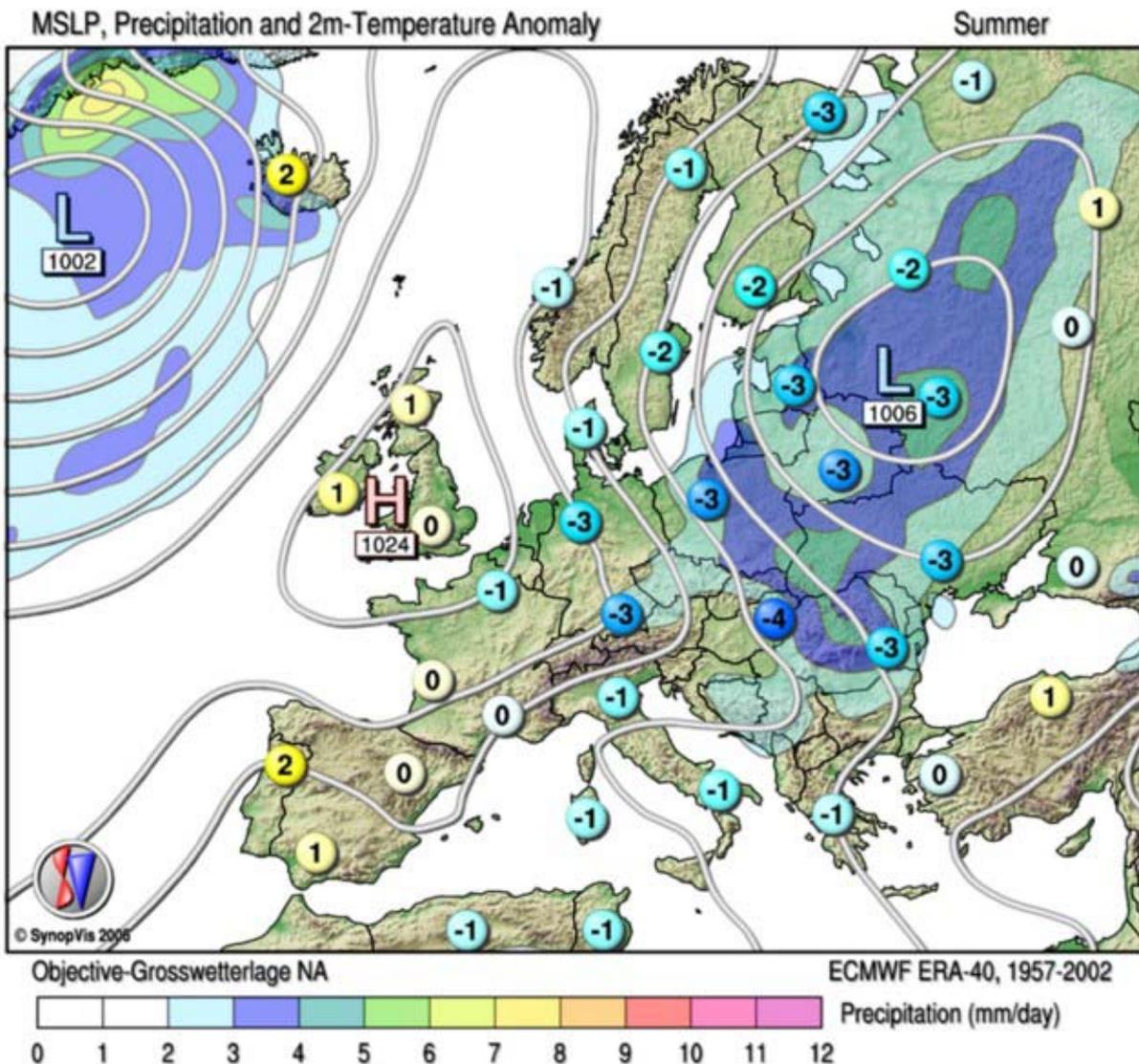


Figure 3.2.17. Configuration isobarique moyenne de la situation « HNFZ » en hiver et anomalies thermiques et pluviométriques sur l'Europe. Source : <http://www.cost733.org/GWL/ObjGWL.html> (2008)

3.2.5.1. Les impacts thermiques

De la même manière qu'avec les précédents cas étudiés, et pour la même raison principale (continentalité), la variabilité des températures au pas de temps quotidien est nettement plus forte à Genève qu'à Rennes (Fig. 3.2.18. et 3.2.19.). A Genève, les anomalies thermiques négatives extrêmes ressortent nettement, et plus particulièrement encore sur les TN. Les conditions anticycloniques couvrant une grande moitié ouest de l'Europe favorisent les ciels clairs et les nuits fraîches à l'intérieur des terres. De plus, les hautes pressions de surface sur le Nord-Ouest de l'Europe dirigent un flux de nord (et donc une masse d'air frais) directement sur l'Europe centrale, ce qui, en conséquence, contribue à y aggraver la baisse des TN par rayonnement nocturne.

A Rennes, sous l'influence directe des hautes pressions de surface, mais abritée du courant de nord par rapport à Genève, la variabilité est plus faible, les écarts de température sont atténués mais la fréquence la plus élevée de journées à anomalies thermiques négatives se reporte aussi sur les TN. Conséquence de la position abritée de Rennes vis-à-vis du courant de Nord, on note une fréquence plus élevée de journées à anomalies positives portant sur les TX.

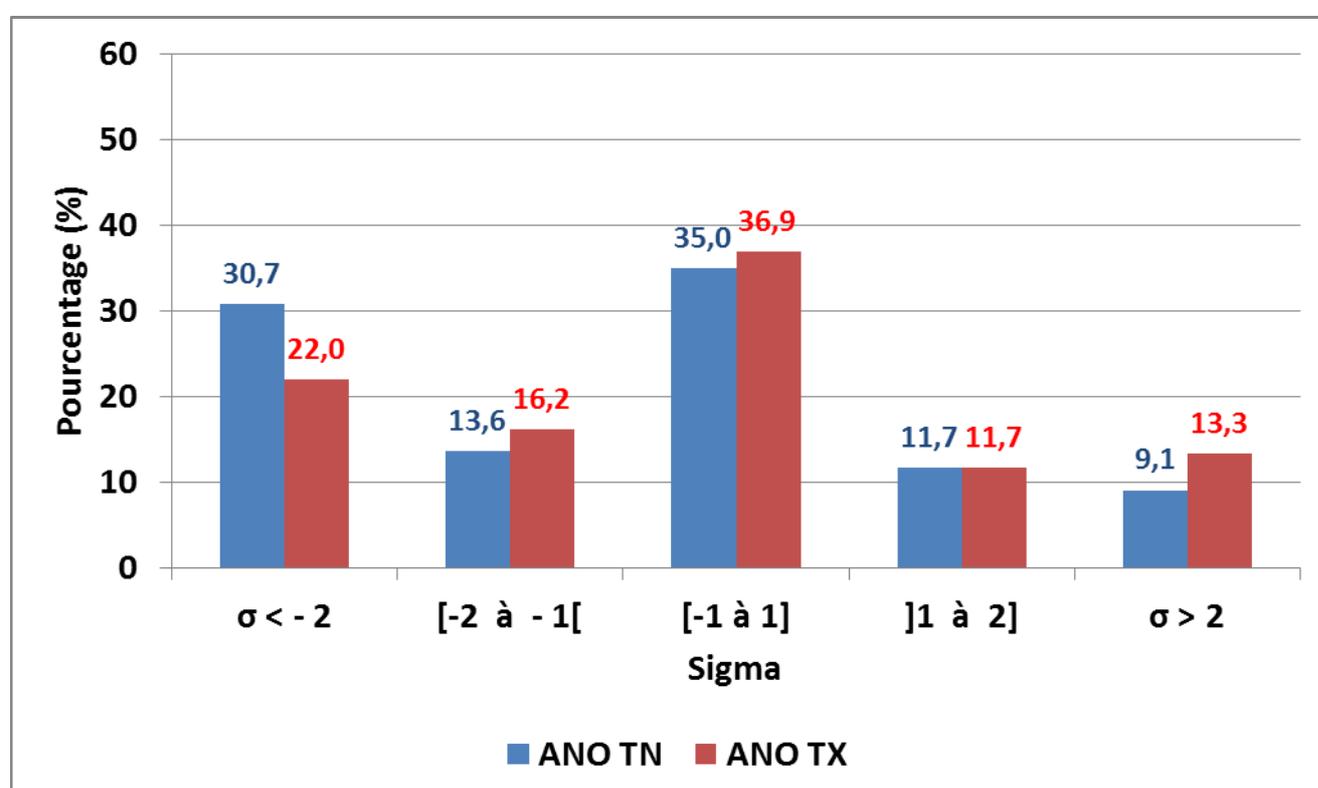


Figure 3.2.18. Impact du type de circulation « NA » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'été à Genève (1901-2009).

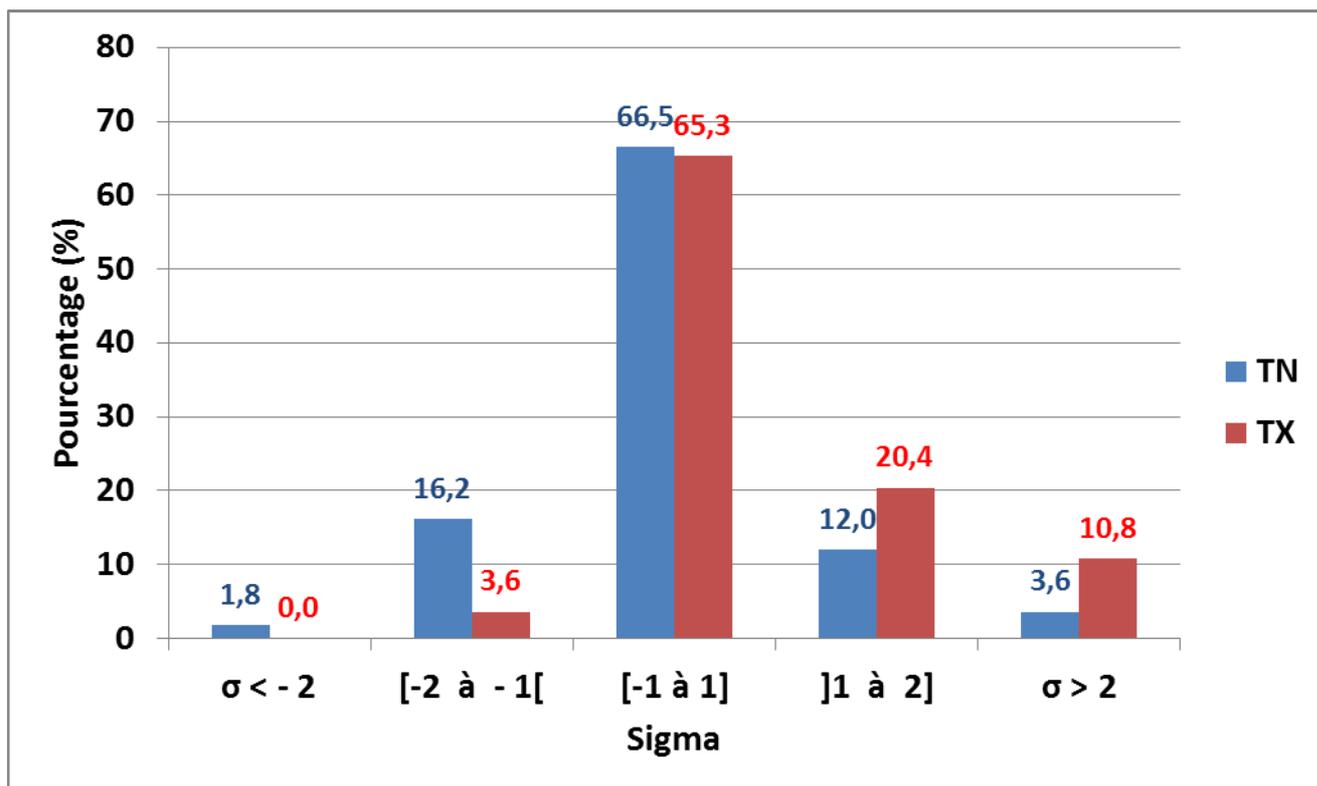


Figure 3.2.19. Impact du type de circulation « NA » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'été à Rennes (1925-2009).

A Rennes et plus encore à Genève, le découpage en deux périodes (avant et après la rupture statistique de 1945) fait ressortir une augmentation de la fréquence des températures maximales anormalement élevées en été par circulation de type NA (Fig. 3.2.20 et 3.2.21).

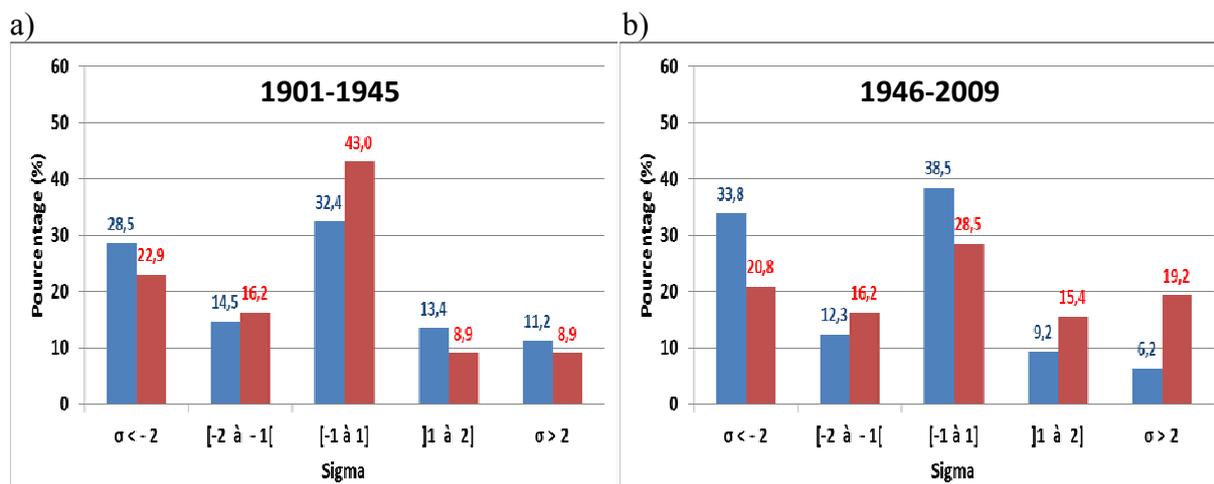


Figure 3.2.20. Impact du type de circulation « NA » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'été à Genève (a : 1901-1945 ; b : 1946-2009).

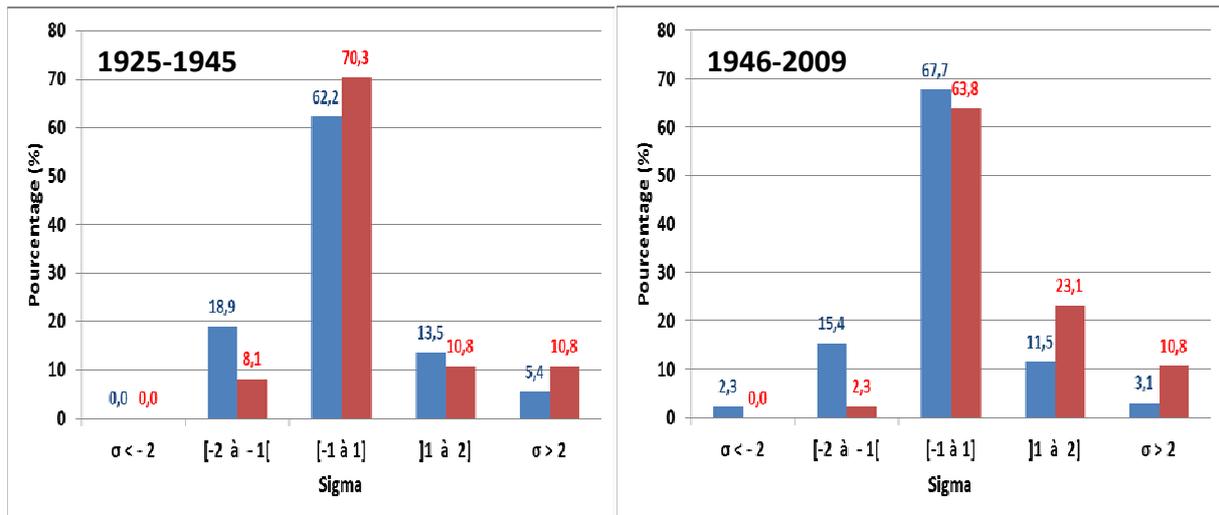


Figure 3.2.21. Impact du type de circulation « NA » sur les températures minimales (TN) et maximales (TX) quotidiennes d'été à Rennes (a : 1925-1945 ; b : 1946-2009).

Le cas de la fréquence des TX extrêmes (> 2 écarts-types) peut être précisé dans cette analyse des impacts thermiques des circulations de type NA, car les journées concernées incluent l'événement exceptionnellement chaud d'août 2003. Sur l'ensemble de la période 1946-2008 à Genève et 1946-2009 à Rennes, cette dernière a dénombré 14 cas « extrêmes » (19,2 %) contre 25 à Genève (10,8 %), forte différence liée aux effets combinés de la latitude (Rennes : 48°N ; Genève : 46°N) et de la continentalité. Les cas recensés à Rennes correspondent à des séquences chaudes remarquables durant les étés 1949, 1990, 2001, 2003 (étés communs à Rennes et à Genève). L'année 2003 n'est pas unique en terme d'occurrence de journées à TX « extrêmes », puisqu'à Genève par exemple, l'été 2003 a enregistré le nombre de cas maximum (6) à égalité avec les étés 2001 et 1990. Ces résultats d'une analyse fréquentielle, bien entendu, ne remettent pas en cause l'intensité exceptionnelle de la vague de chaleur de l'été 2003 (5 cas sur 6 en 2003 avec des écarts-type supérieurs à $+6\sigma$!). Ils montrent que les TX extrêmes de l'été 2003 s'ajoutent à celles mesurées au cours de plusieurs autres étés précédents pour expliquer l'augmentation de la fréquence des TX extrêmes entre le début et la fin du XX^e siècle. Or cette différence observée entre les deux périodes (avant et après la rupture statistique de 1945) est significative.

Les distributions de TN et TX ont été comparées statistiquement au moyen du test de Kolmogorov-Smirnov, afin de vérifier la significativité des différences observées entre les 2 séries (avant et après rupture). Les résultats se sont révélés significatifs pour les TX de la station de Genève (Fig. 3.2.22.). Ces résultats montrent que la rupture significative détectée en 1945 par l'analyse de la fréquence des circulations de type NA, de 1850 à 2009, est confirmée statistiquement par l'analyse de la fréquence des TX à Genève, de 1901 à 2008. Cette rupture statistique est illustrée, sur la figure 3.2.22., par la séparation des deux courbes représentant chacune une des deux périodes.

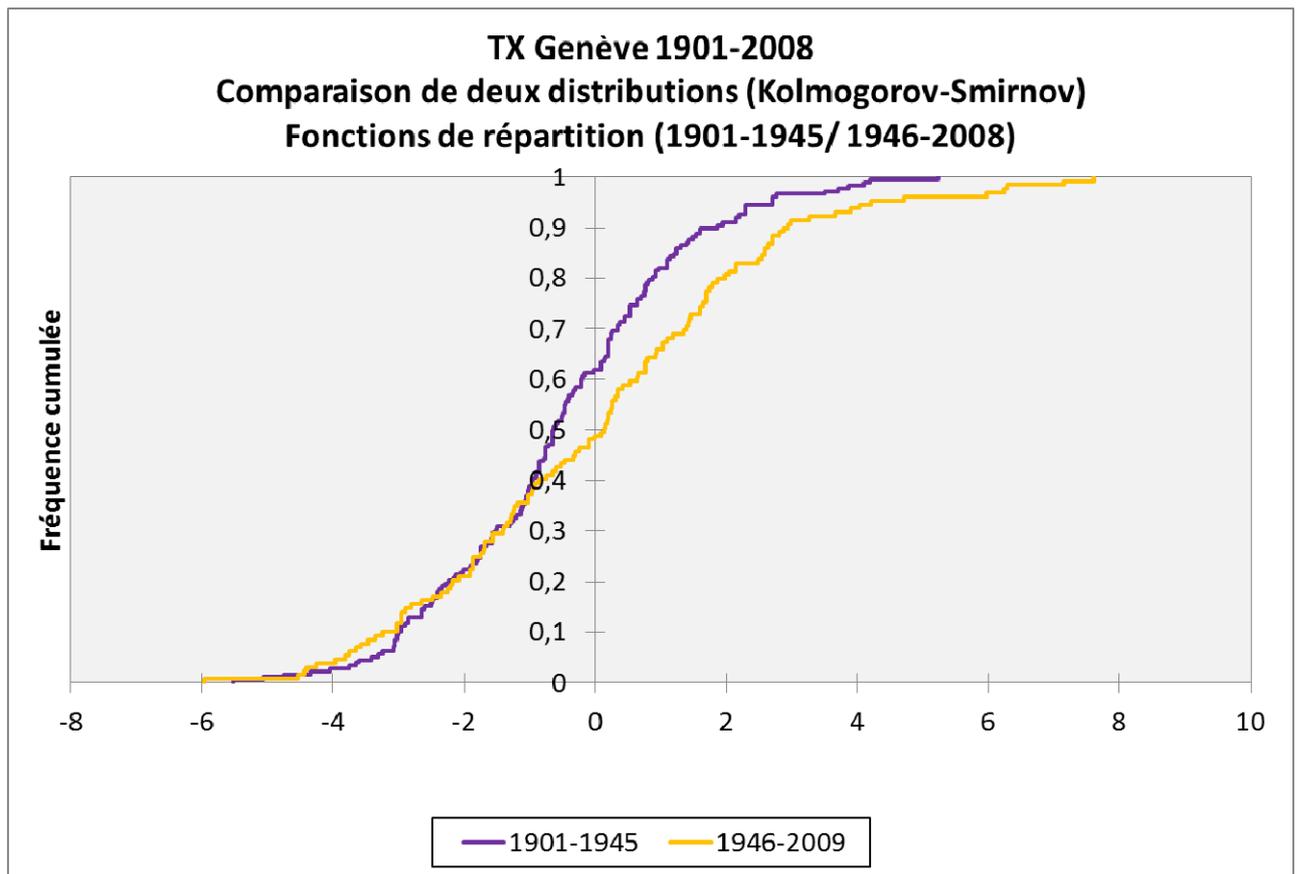


Figure 3.2.22. Comparaison de deux distributions (Test de Kolmogorov-Smirnov) de températures maximales (TX) quotidiennes d'été à Genève : fonctions de répartition.

3.2.5.2. Impacts des circulations de type « NA » en été : synthèse et conclusion

Compte tenu de la présence de hautes pressions de surface sur la moitié ouest de l'Europe, les précipitations sont négligeables sur toutes les stations de référence. En revanche, l'impact des circulations de type NA fait ressortir quelques disparités caractéristiques entre certaines stations (Tab. 3.2.11. et 3.2.12.).

La station de Genève, qui subit davantage que les autres stations l'influence du flux de Nord, est aussi par conséquent la plus fraîche, même si les TN sont plus basses encore à Romorantin, en raison des facteurs locaux déjà exposés. Dans le Centre-Ouest de la France également, et en raison de la combinaison de facteurs régionaux et locaux exposés précédemment eux aussi, la station de Saumur se distingue par ses TX plus élevées que les autres stations (Tab. 3.2.11).

Stations (période)	Total (mm)	Nbj avec RR	Nbj sans RR	TN (°C)	TX (°C)
Rennes (1950-2009)	1	1	6	11,5	24,2
Nantes (1950-2009)	5	1	6	12,9	24,9
Angers (1950-2009)	4	1	6	11,7	24,8
Saumur (1950-2009)	4	1	6	12,3	25,8
Romorantin (1952-2009)	7	1	5	9,2	24,6
Genève (1950-2009)	8	2	5	10,5	23,1

Tableau 3.2.11. Circulations « NA » en été : impacts pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

Par circulation de type NA, la fraîcheur relative de Genève se traduit par des anomalies thermiques négatives tant pour les TN que pour les TX (Tab. 3.2.12.), tandis que les autres stations enregistrent des anomalies positives d'autant plus sensibles que l'on se dirige vers l'ouest, à l'écart du flux dominant de nord. La température minimale quotidienne est partout légèrement inférieure à la moyenne de chaque station, l'anomalie thermique négative étant plus accentuée sur le site particulier de Romorantin

Stations (période)	Total (% saisonnier)	Nbj avec RR (% saison)	Nbj sans RR (% saison)	Ano TN (°C)	Ano TX (°C)
Rennes (1950-2009)	1	3	9	-1,1	+1,2
Nantes (1950-2009)	3	3	10	-0,2	+1,3
Angers (1950-2009)	3	2	10	-1,1	+0,9
Saumur (1950-2009)	3	3	8	-1,0	+0,9
Romorantin (1952-2009)	4	4	9	-2,1	+0,2
Genève (1950-2009)	3	5	8	-2,4	-1,2

Tableau 3.2.12. Circulations « NA » en été : anomalies pluviométriques et thermiques moyens à Rennes, Genève, et dans les stations du Val de Loire.

3.2.6. Conclusions

L'analyse des impacts pluviométriques des types de circulations retenus montre :

- d'une part, sur l'ensemble des stations en seconde partie du XX^e siècle, une homogénéité des impacts à l'exception de la station de Nantes dont le caractère climatique maritime la singularise durant les séquences de circulations perturbées ;
- d'autre part, à Rennes et à Genève au cours du XX^e siècle, une évolution analogue des précipitations hivernales par circulations de Sud. A Rennes et à Genève, par circulations de sud, les anomalies pluviométriques négatives (non significatives) observées en fin de période sont compensées par les précipitations liées aux autres types de circulations.

L'analyse des impacts thermiques fait davantage ressortir certains facteurs géographiques locaux :

- la variabilité des températures au pas de temps quotidien est nettement plus forte à Genève qu'à Rennes, exprimant ainsi le poids de la continentalité ; cette variabilité donne l'avantage aux anomalies positives ou négatives (TN ou TX) selon le type de circulation concerné. Rennes et Genève se différencient aussi par leur simple position en longitude par rapport aux centres d'action et aux flux d'échelle synoptique.
- Dans le Centre-Ouest de la France, malgré l'homogénéité topographique d'ensemble, certaines particularités locales sont mises en évidence : TX élevées à Saumur et TN remarquablement basses à Romorantin.
- A Genève, au cours du XX^e siècle, par circulations de Sud, les anomalies thermiques sont plus fortement positives en fin de période (tendance non significative), surtout les températures maximales.

Ces résultats montrent que, malgré l'échelle spatiale large (synoptique) prise en compte par les GWL, la différenciation des impacts permet d'identifier certains caractères climatiques locaux, illustrant davantage encore le poids de la géographie, mais aussi faisant intervenir des éléments explicatifs aux interactions plus complexes que la seule circulation atmosphérique (topographie, occupation du sol, nature du substratum...). Une mise en relation plus précise des types de circulations atmosphériques avec les faits d'échelle locale nécessite donc des analyses spécifiques.

Références citées

Bardossy, A., Caspary, H.J. 1990 : Detection of climate change in Europe by analysing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 155-167.

Barry, R.G. et Chorley, R.J., 1987 : *Atmosphere, weather and climate*. London : Methuen, 460 p.

Bonnefoy, C., Quénot, H., Planchon, O., Barbeau, G., 2010 : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, 14, 13 p. Accès en ligne sur <http://echogeo.revues.org/12146>

Dupont, N., Planchon, O., Cador, J.M., Delahaye, D. et Douvinet, J, 2008 : Types de circulations atmosphériques et de crises hydrologiques dans le nord-ouest de la France : approches croisées de risques liés au climat, In Lamarre, D.: *Climat et Risques : changements d'approches*, Collection SRD (Lavoisier Ed., Paris), chap. 5, 63-92, 2008.

Escourrou, G., 1981 : *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Paris : Masson, 184 p.

Fallot, J.M., 2000 : Evolution du nombre de jours avec des précipitations abondantes en Suisse durant le 20^e siècle. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 13, 100-109.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C. 2005 : Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2004). *PIK Report n°100*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 153 p.

Hess, P., Brezowsky, H. 1952 : Katalog der Grosswetterlagen Europas. *Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, 33, 39 p.

James, P.M., 2007 : An objective classification for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 88, 17-42.

Kendrew, W.G., 1961 : *The climates of the continents*. Oxford at the Clarendon Press, fifth edition, 608 p.

Klaus, D. 1993 : Zirkulations- und Persistenzänderungen des Europäischen Wettergeschehens im Spiegel der Grosswetterlagenstatistik. *Erdkunde*, 47, 85-104.

Kysely, J. et Huth, R., 2006 : Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 85, 19-36.

Lejenäs, S. L. et Økland, H., 1983 : Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from a long time series of observational data. *Tellus*, 35, 350–362.

Moron, V. 1990 : *Contribution à l'étude de la variabilité climatique mensuelle en Europe*. Mémoire de D.E.A. (non publié), Université de Bourgogne, Dijon, 75 p.

Oke, T.R., 1978 : *Boundary Layer Climates*. London : Methuen & Co. Ltd, 372 p.

Pédélaborde, P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien*. Paris, Génin, 539 p. et atlas 232 p.

Pinty, J.P., Mascart, P., Richard, E., Rosset, R., 1989 : An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against HAPEX-MOBILHY data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 976-992.

Planchon, O., 1991: *Recherche sur les climats de l'Europe moyenne : le problème des limites entre les influences océaniques et continentales*. Mémoire de Maîtrise (non publié), Université de Bourgogne, Dijon, 67 p.

Planchon, O., 1992 : *Contribution à l'étude du contact climatique océanique / continental en Europe du centre-ouest : l'exemple des régimes pluviométriques (1961-1990)*. Mémoire de D.E.A. "Climats et Contraintes Climatiques" (non publié), Université de Bourgogne, Dijon, 53 p.

Planchon, O., 1997 : *Les climats maritimes dans le Monde*. Thèse de Doctorat, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 p.

Planchon, O., 2005 : À propos des excès pluviométriques d'été dans le centre-ouest de l'Europe. In Lamarre, D. : *Les risques climatiques*, chap. 8 : Problèmes de structures et de normes climatiques. Belin, Paris, 129-145.

Planchon, O., Quénot, H., Dupont, N. et Corgne, S., 2009 : Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany (France). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1161-1173. Accès en ligne sur <http://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/1161/2009/nhess-9-1161-2009.html>

Quénot, H., Planchon, O., Wahl, L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Shukla, J. et Mo, K.C.1983 : Seasonal and geographical variation of blocking. *Monthly Weather Review*, 111, 388-402.

Wahl, L., Planchon, O., David, P.M., 2007 : Névés, corniches et risque d'avalanche dans les Hautes-Vosges. *Revue Géographique de l'Est*, 47 (4), <http://rge.revues.org/1533>.

Werner, P.C., Gerstengarbe, F.W., 2010 : Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2009). *PIK Report n°119*, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 140 p. <http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>

4. Le problème du passage aux échelles fines

4.1. Introduction

La prise en compte du niveau d'échelle local pose d'une part le problème de l'analyse des interactions entre des phénomènes atmosphériques d'échelles spatiales et de pas de temps différents (Orlanski, 1975) et, d'autre part, fait largement intervenir le rôle des états de surface et leurs interactions complexes avec la couche limite atmosphérique (Geiger, 1966 ; Oke, 1978).

Dans le cadre de ce programme, plusieurs pistes de recherche ont été explorées afin de trouver la (ou les) meilleur(e)s connexion(s) possible(s) entre les types de circulations atmosphériques d'échelle synoptique (GWL) et leurs impacts climatiques en tenant compte des facteurs locaux. Ces recherches ont portées (et portent toujours) sur :

- les sécheresses, abordées ici sous des angles différents (et avec des méthodes et outils différents) ;
- la climatologie appliquée à l'échelle des terroirs viticoles ;
- les types de temps.

4.2. Spatialisation et suivi des sécheresses

4.2.1. Suivi de la sécheresse par images satellites à moyenne résolution

Actuellement, les modifications de la couverture végétale ne peuvent être identifiées qu'en utilisant des séries temporelles d'images satellites ou en effectuant des analyses de terrain. Les suivis de la couverture végétale sont souvent effectués à l'échelle locale à l'aide d'images à haute résolution ou à l'échelle continentale et globale à l'aide d'images à basse résolution. Depuis l'année 2000, des capteurs à « moyenne résolution », dont la taille du pixel se situe entre la basse résolution et la haute résolution spatiale ont fait leur apparition. Ces capteurs sont caractérisés par une résolution avoisinant les 250-300 m et une résolution temporelle variant entre 1 et 4 jours. Le premier capteur à moyenne résolution, MODIS, a été placé sur la plate-forme EOS-AM1 (Terra) en orbite descendante par la NASA et est opérationnel depuis février 2000. Il acquiert une information à 250 m de résolution tous les 1 à 2 jours dans le domaine spectral du rouge et du proche infrarouge.

Afin d'identifier l'impact de la variabilité climatique sur l'évolution de la couverture végétale, deux séries de données ont été traitées : une série temporelle d'images satellites MODIS à 250 m de résolution et une série de données météorologiques. L'objectif a été d'estimer des variables biophysiques à partir des séries temporelles d'images de réflectance moyenne résolution pour mettre en évidence l'évolution des taux de couverture végétale chlorophyllienne verte (fCOVER). La série de données météorologiques a été utilisée dans l'objectif d'identifier les variations des températures et des précipitations menant à des changements d'occupation du sol. Une fois les situations climatiques menant à des changements déterminées, les types de circulation atmosphériques ont été identifiés en utilisant la classification des types de circulations de Hess-Brezowsky.

Une série temporelle d'images satellites couvrant la période 2000-2007 a été constituée à partir de données journalières MODIS à 250 m de résolution (bande rouge et proche infrarouge). Seules les images acquises avec des angles d'observation inférieurs à 40° ont été conservées. Les images ont subi plusieurs phases de prétraitement : elles ont d'abord été corrigées des effets atmosphériques et des distorsions géométriques. Les images affectées par des nuages et leurs ombres portées ont été ensuite reconstruites en estimant les données manquantes à l'aide d'un réseau de Kohonen. Puis, les séries temporelles reconstruites ont été lissées en utilisant des fonctions robustes. Le modèle de transfert radiatif des couverts SAIL couplé au modèle de transfert radiatif des feuilles PROSPECT a été appliqué afin d'estimer des variables biophysiques parmi lesquelles la fraction de couverture végétale verte (fCOVER) et la brillance des sols (B_s). Le modèle de transfert radiatif a été mis à disposition par F. Baret pour cette étude. Les séries temporelles de variables biophysiques constituées sont ainsi obtenues à un pas de temps de 15 jours et à une résolution de 250 m sur l'ensemble de la Bretagne.

Ces séries temporelles de variables biophysiques ont été utilisées pour classer les différents types d'occupation des sols sur la période d'étude en distinguant l'occupation hivernale des sols de l'occupation annuelle des sols. La classification des types d'occupation des sols a été effectuée à l'aide d'un arbre décisionnel utilisant les séries temporelles de fCOVER. Les couverts végétaux ont été répertoriés sur l'arbre décisionnel en fonction de leur phénologie. Les classifications ont par la suite été validées à l'aide de cartes de l'occupation du sol issues du traitement d'images haute résolution (SPOT et LANDSAT) et de contrôles effectués sur le terrain.

Dans l'objectif de mettre en évidence les modifications de chacun des types de couvert végétal, des profils moyens de fCOVER ont été extraits des séries temporelles de variables biophysiques en utilisant les classifications précédemment validées. Les profils ont été extraits à la fois pour l'ensemble des types d'occupation hivernale et annuelle des sols.

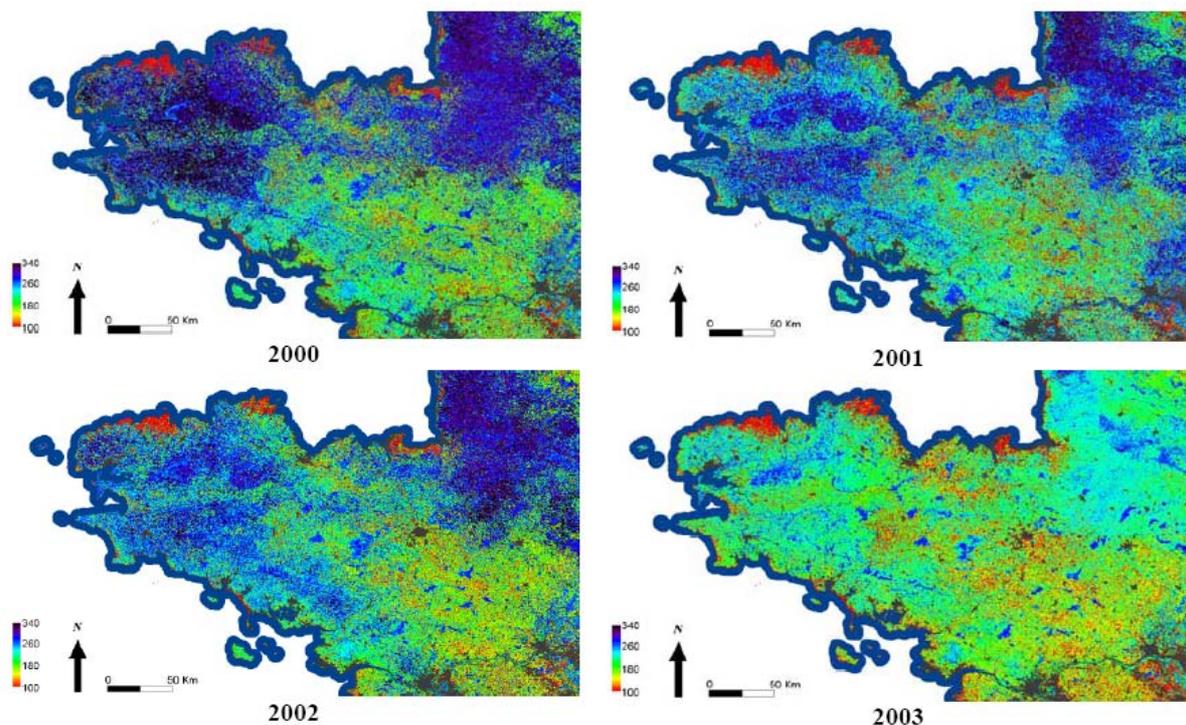


Figure 4.2.1. Synthèses d'images MODIS montrant pour 4 années la date de fin de la période de croissance végétative. En 2003, la fin plus précoce de développement (en orange) de la végétation est liée à la période de sécheresse (Lecerf, 2009).

Une série de données climatiques mensuelles a été acquise auprès de Météo-France (*Climathèque*) pour 9 stations réparties uniformément sur le territoire breton pour la période 2000-2007 : Brest, Quimper, Lannion, Saint Briec, Rostrenen, Lorient, Vannes, Rennes et Dinard. Pour ces neuf stations, outre les séries de températures et de précipitations, le déficit d'évaporation a été calculé à partir de l'évapotranspiration réelle et potentielle. Le calcul de l'ETP a été réalisé à partir de la formule de Turc avec une réserve utile unique fixée à 125 mm. Nous avons choisi de retenir les valeurs mensuelles du déficit d'évaporation ($DE = ETP - ETR$) afin de quantifier l'intensité du manque d'eau.

Sur la période étudiée, de l'année 2000 à 2007, trois diminutions des taux de couverture végétale supérieures à la normale ont été observées : lors de l'hiver 2000/2001, de l'été 2003 et de l'hiver 2005/2006. Seule la situation de l'été 2003 correspond à une situation de sécheresse (voir Fig. 4.2.1.).

L'été 2003 a été caractérisé par une diminution des taux de couverture végétale survenant à partir du mois de mai sur l'ensemble des prairies. Ces résultats ont déjà été mis en évidence à l'aide d'images à basse résolution. Toutefois, l'utilisation d'images moyenne résolution a permis de préciser l'impact du manque d'eau en déterminant les types d'occupation et d'utilisation du sol affecté par celui-ci. En premier lieu, ce sont les prairies qui ont subi une diminution de leur taux de couverture végétale. Le taux de couverture végétale verte des surfaces cultivées en maïs a diminué précocement comparé aux profils moyens de fCOVER sur l'ensemble de la période 2000-2007. Les autres céréales étant récoltées au mois de juillet, celles-ci n'ont pas été affectées par le manque d'eau. Cette situation s'explique par un déficit d'évaporation débutant au mois de mai, se terminant au mois de septembre et particulièrement important au mois d'août, lié à la prédominance de situations anticycloniques (62,3 % du total des types de circulations, d'avril à septembre).

4.2.2. Vers la spatialisation des bilans hydriques aux échelles fines

4.2.2.1. Introduction

Dans les régions à vocation agricole, le bilan hydrique peut être considéré comme un bon indicateur des disponibilités en eau et en énergie dont les plantes ont besoin pour se développer. Les avantages de cette approche agro-climatique reposent sur la prise en compte simultanée de l'ensemble des facteurs atmosphériques responsables de la demande évapotranspiratoire (rayonnement solaire, température, humidité et vent) et sur l'intégration de l'influence du sol dont la réserve hydrique peut compenser, pour un temps, le déficit pluvial (Fig. 4.2.2.).

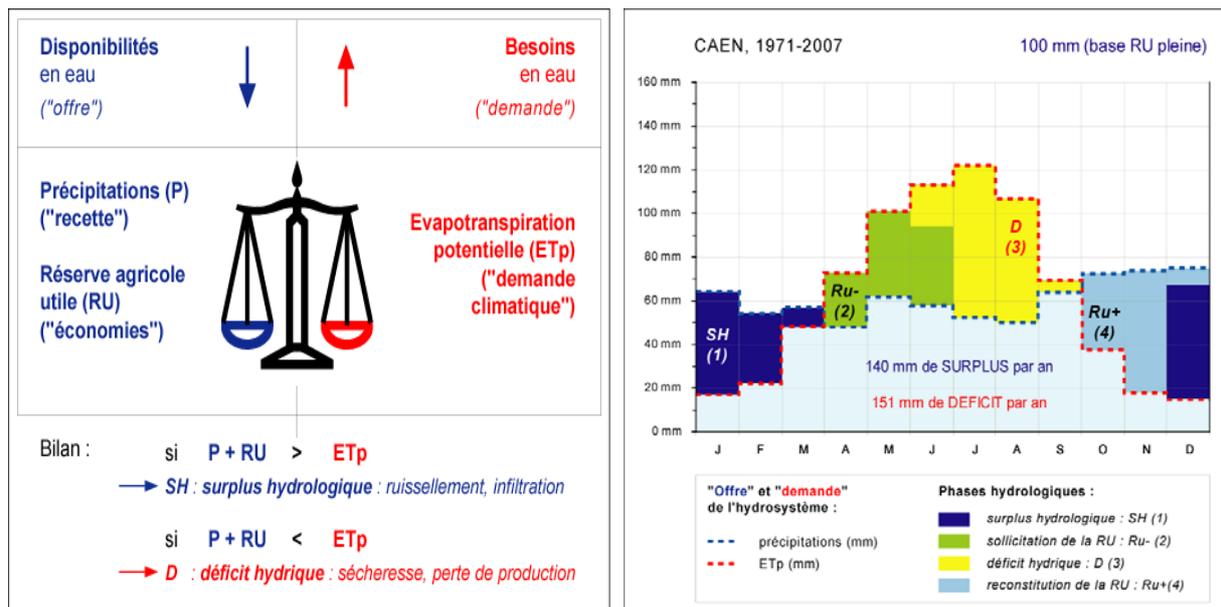


Figure 4.2.2. Les deux « plateaux » de la balance hydrique : un équilibre entre les disponibilités et les besoins en eau des plantes, régulé par la réserve agricole utile (à gauche) ; exemple de bilan hydrique stationnel simplifié pour la station de Caen-Carpiquet sur la période 1971-2007 : la mise en évidence d'un déficit estival récurrent sur la Plaine agricole de Caen (à droite) (Cantat *et al.*, 2010).

Une étude détaillée des bilans hydriques, intégrant les longues séries de données disponibles, est en cours dans le cadre de doctorat de Chloé LAMY, soutenue par le programme CLIMASTER et intitulée : *impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*. (cf. 2.4.4.).

4.2.2.2. Application à l'identification des sécheresses en Bretagne

La Bretagne, comme la plupart des autres régions françaises, est touchée par des sécheresses dont la durée et l'intensité sont variables. L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact des sécheresses sur les ressources en eau et leur évolution depuis le XIX^e siècle. Un bilan de l'eau a ainsi été calculé à l'échelle de la région pour plusieurs stations (Fig. 4.2.2.).

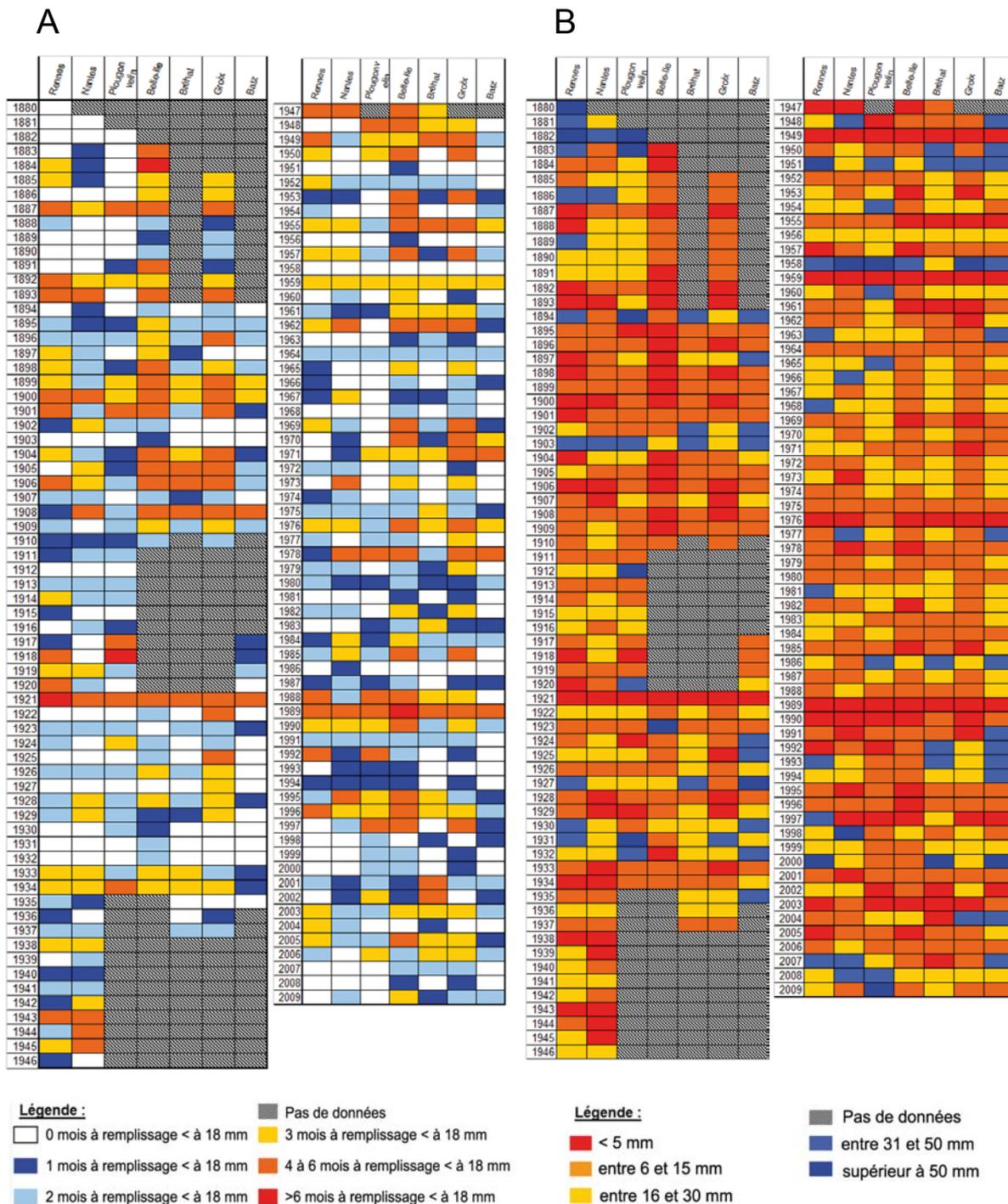


Figure 4.2.2. Nombre de mois par an où le stock d'eau est inférieur à 18 mm (A) et niveau d'eau minimal de la RU (*réserve utile*) par an et par station (B) (Lamy et Dubreuil, 2010).

N.B. Le seuil de 18 mm a été retenu car il représente 15 % de la réserve utile (c'est-à-dire le point de flétrissement en sols argileux).

La déficience d'évaporation calculée au pas de temps mensuel souligne la variabilité spatio-temporelle de la sécheresse. A l'échelle annuelle, une légère augmentation apparaît, qui résulte essentiellement de l'aggravation du déficit lors du mois d'août, à la fin de l'été (Cf. 2.4.4. et Dubreuil *et al.*, 2010).

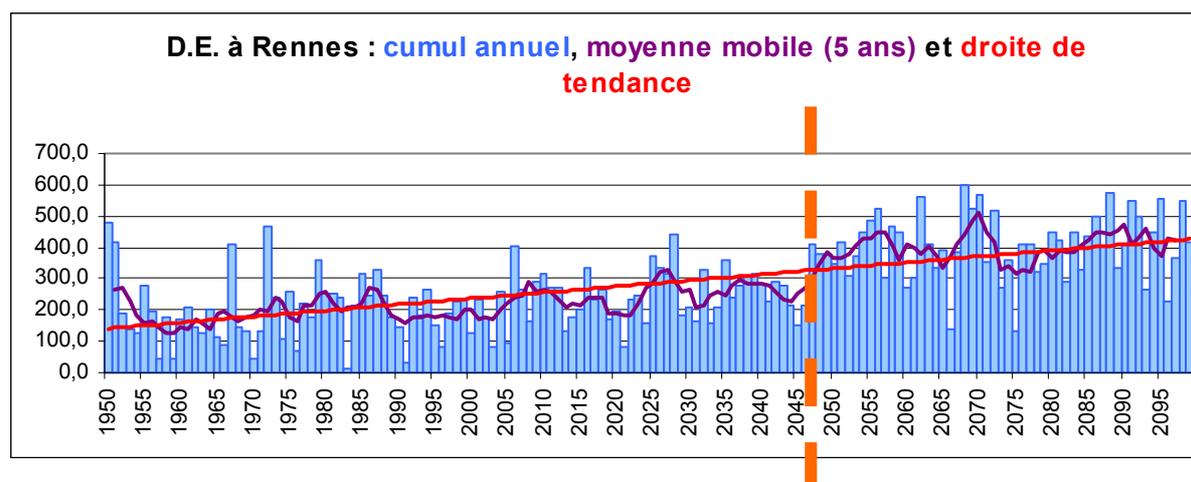
Le Nombre de mois par an où le stock d'eau est inférieur à 18 mm (Fig. 4.2.2.A) souligne certaines disparités spatiales bien connues en Bretagne, telle que la forte sensibilité du littoral méridional et des îles proches aux déficits hydriques (Dubreuil, 1994). Ainsi, les stations de Belle-Île et de Groix apparaissent globalement plus sèches que les autres stations depuis 1880. Dans le temps, cette même figure met en évidence des années à longue sécheresse (1906, 1921, 1989, 1996 et 2005), mais ces sécheresses diffèrent en intensité.

Le niveau d'eau minimal de la RU par an et par station (Fig. 4.2.2.B) exprime le degré d'intensité des sécheresses en Bretagne depuis 1880. Parmi les sécheresses longues, on peut distinguer :

- les sécheresses intenses (1921 et 1989) ;
- les sécheresses de moindre intensité (1906, 1996 et 2005).

La figure 4.2.2.B fait ressortir des années de sécheresse intenses telles celles de 1949, 1959 et 2003, qui apparaissaient comme « courtes » sur le graphique précédent.

Les méthodes de calcul des bilans hydriques ont ensuite été appliquées aux données simulées pour le XXI^e siècle (scénario A1B) issues du modèle ARPEGE de Météo-France (Déqué, 2007). Les calculs ont d'abord été effectués sur les simulations du climat de Rennes (Fig. 4.2.3.).



Test de rupture (Pettitt) : 2047

De 1950 à 2047 : 6 ans où D.E. > 400 mm

Médiane D.E. (1950-2047) : 211 mm

De 2047 à 2100 : 1 an sur 3

Médiane D.E. (2047-2100) : 416 mm

Figure 4.2.3. Déficit d'évaporation (D.E.) estimé d'après les simulations du climat de Rennes selon le scénario A1B (Dubreuil *et al.*, 2010).

L'évolution du déficit d'évaporation calculé d'après les simulations du climat de Rennes selon le scénario A1B montre une tendance à la hausse de 1950 à 2100, donc allant dans le sens d'une aggravation des conditions de sécheresse, en accord, sur une partie de l'Europe occidentale, avec la plupart des scénarios (Stahl, 2001 ; Kottek *et al.*, 2006). Cependant, une rupture statistique a été détectée dans la série en 2047. Au-delà de cette rupture, l'augmentation brutale du déficit d'évaporation pose question... Sans réponse pour le moment.

De plus, la comparaison entre les données observées et simulées pour la même période (1951-1980) montre, à Rennes, quelques divergences (Fig. 4.2.4.).

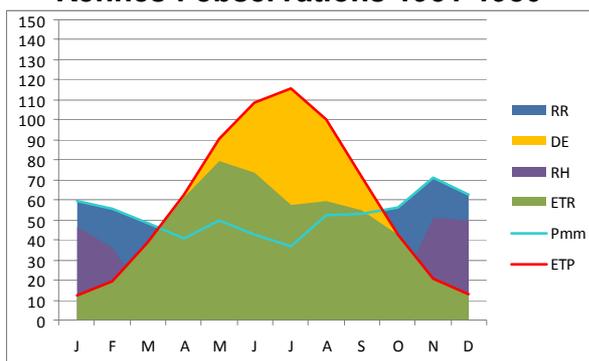
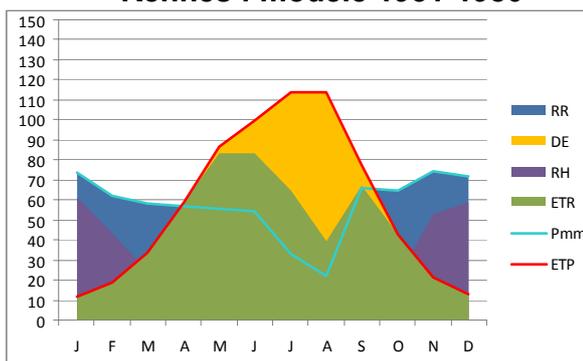
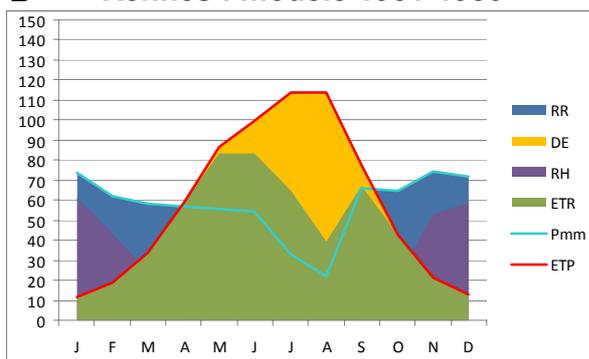
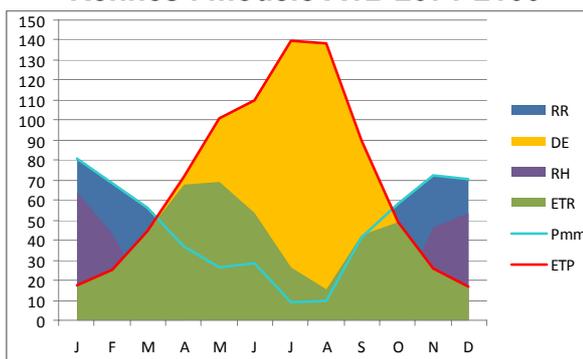
A Rennes : observations 1951-1980**Rennes : modèle 1951-1980****B Rennes : modèle 1951-1980****Rennes : modèle A1B 2071-2100**

Figure 4.2.4. Comparaison du bilan hydrique observé et modélisé (A) et Projection du bilan de l'eau à Rennes de la période 1951-1980 à 2071-2100 (B), à Rennes (Dubreuil *et al.*, 2010).

Source : Modèle ARPEGE (Météo-France) sur des mailles de 50 km, sur lesquelles a été appliquée une méthode de correction (dite méthode de désagrégation quantile/quantile conditionnelle) permettant de reconstituer des séries plus cohérentes localement pour une station donnée (Déqué, 2007).

En effet, les simulations du climat de Rennes pour la période 1951-1980, selon le scénario A1B, accentuent le fléchissement pluviométrique d'été caractéristique du climat océanique de l'Europe occidentale (Fig. 4.2.4.A). Cette simulation d'un été moins arrosé se répercute sur le déficit d'évaporation, accentué lui aussi. En conséquence, le scénario A1B pour la période 2071-2100 s'en trouve vraisemblablement biaisé, dans le sens d'une exagération de la sécheresse estivale (Fig. 4.2.4.B).

Si, toujours à Rennes, on compare l'évolution du déficit d'évaporation d'après les observations de la période 1880-2000, et l'évolution de ce déficit calculé d'après les simulations selon le du scénario A1B, pour la période 2000-2100 (Fig. 4.2.5.), l'évolution obtenue dans le long terme (deux séries séculaires) confirme bien les projections déjà évoquées, tant par le cumul annuel (Fig. 4.2.5.A) que par la seule prise en compte du mois d'août (Fig. 4.2.5.B ; le mois le plus « critique » en matière de déficit hydrique selon le scénario A1B à Rennes). Cependant, la rupture de 2047 décelée statistiquement sur la série simulée 1950-2100 est bien visible aussi dans ces deux cas (simulation A1B 2000-2100, Fig. 4.2.5.A et B).

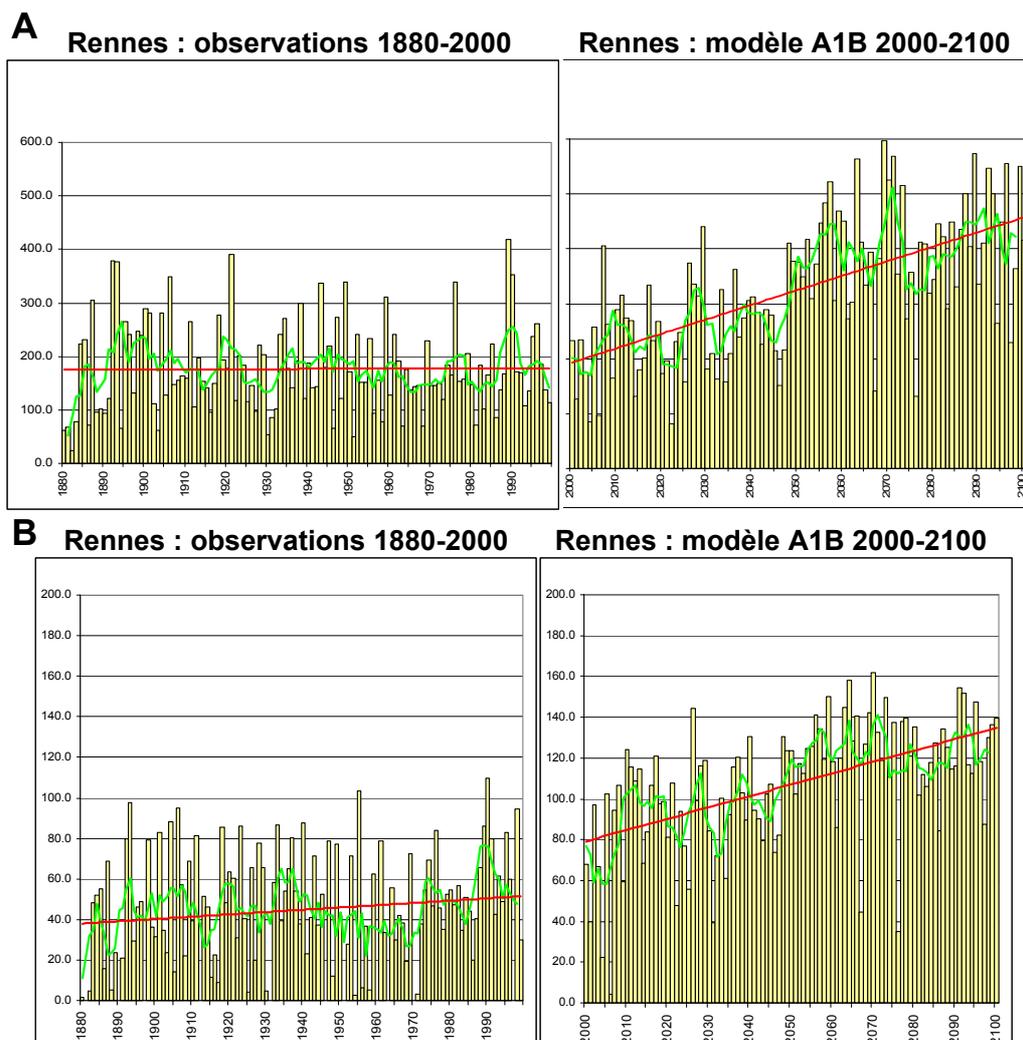


Figure 4.2.5. Déficit d'évaporation (D.E.) à Rennes : observations 1880-2000 et simulation A1B 2000-2100, avec moyenne mobile sur 5 ans et droite de tendance. A) Cumul annuel ; B) en août (Dubreuil *et al.*, 2010).

Ainsi, si les observations collectées sur des périodes anciennes doivent être examinées avec précaution (cf. 2.4.4.), les données issues des modèles climatiques doivent aussi être utilisées et interprétées avec prudence. Le problème se pose avec d'autant plus d'acuité aux échelles fines.

4.2.2.3. Modélisation spatiale à fine résolution des bilans hydriques

Sachant que la qualité des productions végétales et animales dépend étroitement du climat et du sol, il apparaît nécessaire de spatialiser à échelle fine le bilan hydrique pour avoir une image fiable des atouts et contraintes naturels dont dispose chaque parcelle agricole. L'objectif de cette recherche est de proposer une méthode rationnelle et reproductible à d'autres secteurs pour passer d'une connaissance ponctuelle (liée à la densité du réseau de mesure météorologique et à l'existence de quelques sondages pédologiques) à une représentation surfacique, tout en garantissant à échelle fine la fiabilité de l'information.

La méthode de spatialisation du bilan hydrique présentée dans cet article permet d'accéder à une connaissance fiable et détaillée de la diversité géographique des disponibilités en eau dans le sol car, comparativement aux données utilisées traditionnellement, nous avons intégré à très fine échelle les conditions de sols (*via* leur réserve utile) et de relief (*via* leur pente et

leur exposition), en sus des données climatiques de base fournies par Météo France, le tout associé à des moyens de calcul performants (Cantat, Le Gouée, Bensaïd, 2009).

- Les données pédologiques disponibles

Durant la saison végétative, sous un même climat, la diversité d'état d'avancement de la végétation reflète bien souvent l'influence des facteurs stationnels, au premier rang desquels figure la réserve en eau des sols. Disposer d'une information précise et en de très nombreux points de cette variable apparaît comme une des conditions essentielles pour envisager une représentation réaliste à échelle fine du bilan hydrique. Très récemment, l'établissement d'une carte des sols au 1/25000 sur le Calvados a permis d'accéder à cette connaissance intime des variations spatiales de la réserve utile (Le Gouée, 2008).

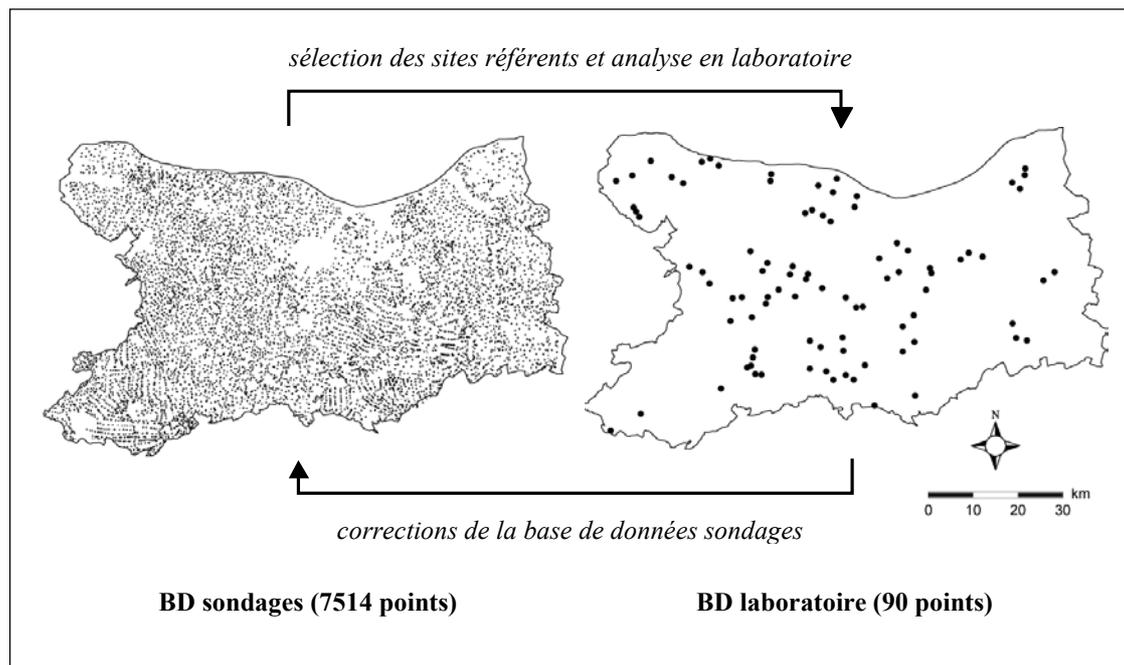


Figure 4.2.6. Localisation des 7514 échantillons et des 90 sites-référents pour la cartographie des sols (Calvados) (Cantat *et al.*, 2010).

Cette cartographie des sols s'appuie sur quelque 7514 sondages pédologiques, représentant une épaisseur cumulée de plus de 3500 mètres. Une typologie des relevés a permis de définir ensuite 90 sites représentatifs de la diversité pédologique dans le Calvados (Fig. 4.2.6.). Les prélèvements effectués sur ces sites référents ont ensuite été analysés plus précisément en laboratoire afin de dégager quelques grandes propriétés (granulométrie, texture, pH, calcaire total, stabilité structurale, etc.). Le passage des points de sondage à une représentation spatialisée a été réalisé en procédant au tracé de nombreuses coupes représentatives des grands types de sol rencontrés sur le terrain et en appliquant quatre concepts fondamentaux de la généralisation cartographique : lithoséquence, toposéquence, bioséquence et chronoséquence (Le Gouée et Delahaye, 2008).

La carte des réserves utiles maximale a été construite après extraction puis traitement de trois couches d'informations (Jamagne *et al.*, 1977 ; Baize, 2000) : *texture*, *épaisseur* et *charge caillouteuse* du sol. Il en a résulté pour ce département la possibilité de substituer aux 100 mm de réserve utile – valeur généralement retenue par défaut d'information dans les travaux cartographiques – des valeurs « vraies », ici comprises entre 10 et 235 mm (Fig. 4.2.7.).

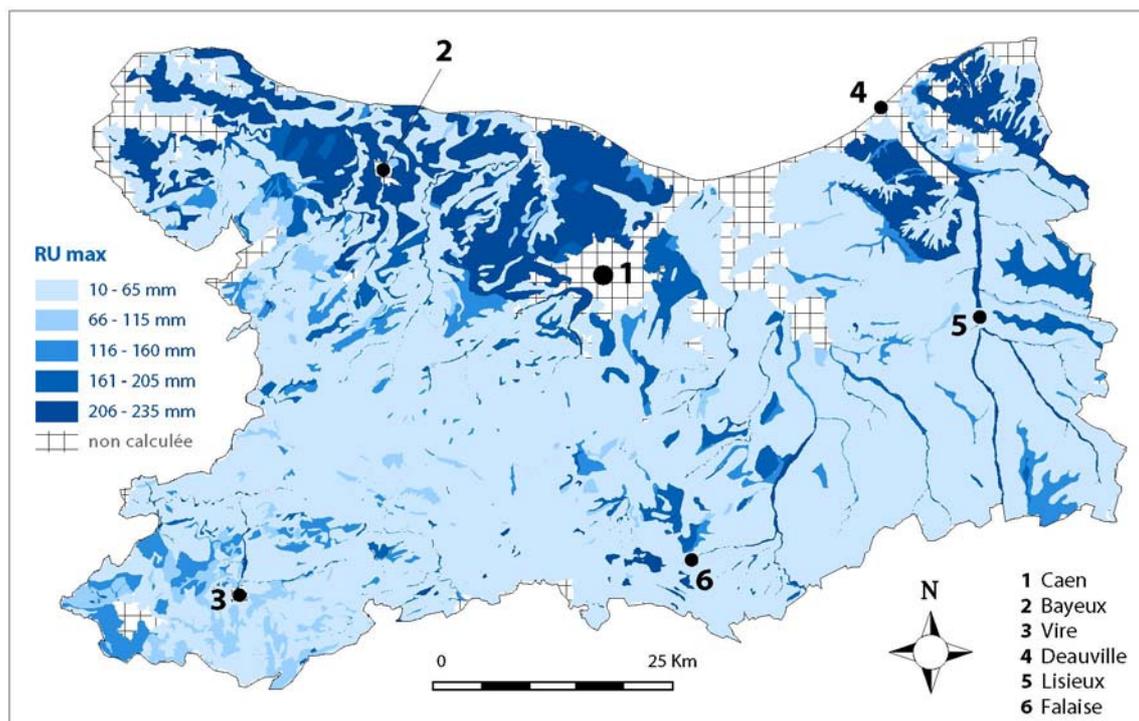


Figure 4.2.7. Réserve agricole utile maximale du sol dans le Calvados (les secteurs représentés par un quadrillage correspondent aux espaces non agricoles : zones urbaines et zones humides des basses vallées) (Cantat *et al.*, 2010).

- Les données topographiques disponibles

La connaissance de la topographie de détail constitue le second volet majeur à prendre en compte pour obtenir un bilan hydrique valide à échelle fine car, en fonction de la pente et de l'exposition d'un terrain, la quantité d'énergie solaire peut varier beaucoup d'un point à un autre de l'espace (Fig. 4.2.8.).

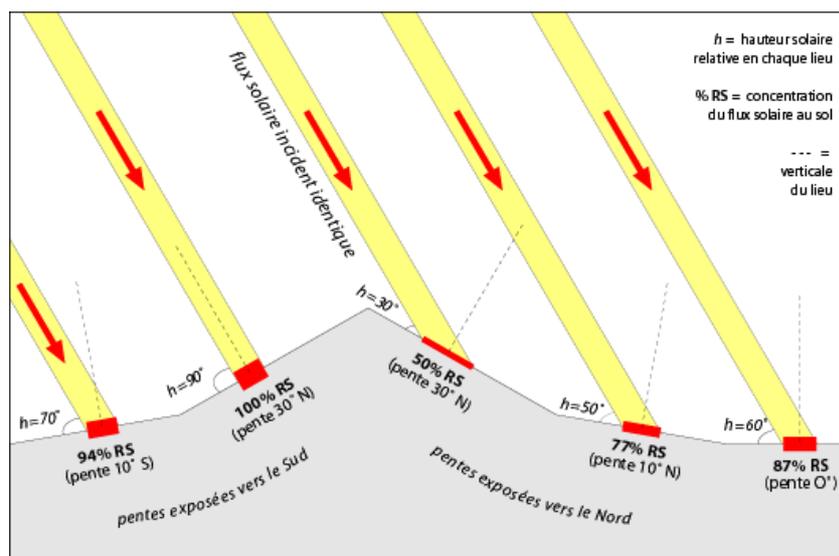


Figure 4.2.8. Comparaison du pourcentage d'énergie solaire disponible au niveau du sol en fonction de la pente et de l'orientation : exemple au solstice d'été, midi, 49° de latitude Nord (100% correspond à un angle d'incidence au sol de 90°) (Cantat *et al.*, 2010).

Cela se traduit sur les versants par des contrastes importants entre les valeurs d'ETp *in situ* et celles faisant office de référence régionale, calculées à partir d'une surface conventionnellement horizontale et en quelques points seulement du réseau d'observation. Grâce à l'apparition des Modèles Numériques d'Altitude (MNA) à fine résolution spatiale et au développement de la puissance des ordinateurs (Fig. 4.2.9.), il a été possible d'intégrer la composante topographique dans le calcul du rayonnement solaire global (Rich *et al.*, 1994), grandeur qui contrôle majoritairement l'intensité des phénomènes évapotranspiratoires. L'ETp a été calculée selon la formule de Turc, légèrement modifiée pour davantage rendre compte des facteurs géoclimatiques locaux (Cantat *et al.*, 2009).



Figure 4.2.9. Carte des pentes du Calvados, dérivée du modèle numérique d'altitude d'après une grille carrée comportant un point tous les de 50 m (Cantat *et al.*, 2010).

Les espaces en gris foncé indiquent les secteurs à fortes pentes (Bocage au sud-ouest et Pays-d'Auge au nord-est)

- Méthodes et outils pour la modélisation spatiale à fine résolution des bilans hydriques

Au final, pour le calcul et la représentation du bilan hydrique spatialisé, les trois composantes cardinales du système bio-pédoclimatique représentant l'offre (P), la demande (ETp) et la réserve (RU) ont été échantillonnées selon un maillage carré de 50 m de côté. L'*offre* a été calculée par krigeage des données pluviométriques de 27 stations météorologiques calvadosiennes et limitrophes ; la *demande*, évaluée d'après une ETp calculée en fonction des données astronomiques (hauteur solaire et durée du jour) et des caractéristiques topographiques de chaque point (pente et exposition) ; et la *réserve*, élément de régulation primordial dans les échanges hydriques, évaluée selon les valeurs de RU maximales issues de la carte détaillée des sols. L'écriture d'un programme en Visual Basic a permis d'automatiser les procédures de calcul pour les quelque 2,2 millions de points de grille nécessaires pour couvrir le Calvados. Enfin, l'utilisation de logiciels de cartographie a rendu possible la production de documents à très fine résolution spatiale pour évaluer à l'échelle de la parcelle les différentes composantes du bilan hydrique : l'évapotranspiration réelle, le déficit hydrique et les surplus hydrologiques, variables utiles au traitement de divers problèmes environnementaux (inondation, sécheresse, érosion des sols...).

- Exemple de résultats : analyse de la sécheresse estivale moyenne dans le Calvados

En plus de la topographie d'échelle fine, l'adjonction des réserves utiles « vraies » dans le calcul du bilan hydrique module de façon parfois remarquable la répartition et l'intensité des stress hydriques vécus par les plantes, comparativement à l'image que peuvent donner les

cartographies « traditionnelles » calées conventionnellement, faute de mieux, sur une RU de 100 mm (Fig.5). Ainsi, en juillet, les faibles déficits sur les hauteurs pluvieuses du Bocage calvadosien (carte du haut) se trouvent mécaniquement amplifiés par la piètre réserve utile de sols propres à cette région du massif ancien (carte du bas). Inversement, malgré l'indigence des précipitations au regard de la demande atmosphérique, le stress hydrique dans les grands champs céréaliers de la *Campagne de Caen* est sensiblement atténué grâce à la profondeur des sols et à leur texture argilo-limoneuse. Au sein même de la « diagonale aride » du Calvados, les répercussions sur le monde agricole sont évidentes et en phase d'ailleurs avec la réalité des faits observés par les agriculteurs et des actions entreprises : en restituant plus d'eau et plus longtemps, les sols profonds et limoneux des bas plateaux au nord-ouest de l'agglomération caennaise limitent le stress hydrique des plantes et, par voie de conséquence, le recours à l'irrigation durant l'été ; *a contrario*, en allant vers le sud-est du département, la présence de terres plus minces et caillouteuses dans ce secteur d'openfield entraîne un manque d'eau plus précoce (mai contre juillet) et marqué (environ 200 mm contre 100 mm sur l'ensemble de la saison).

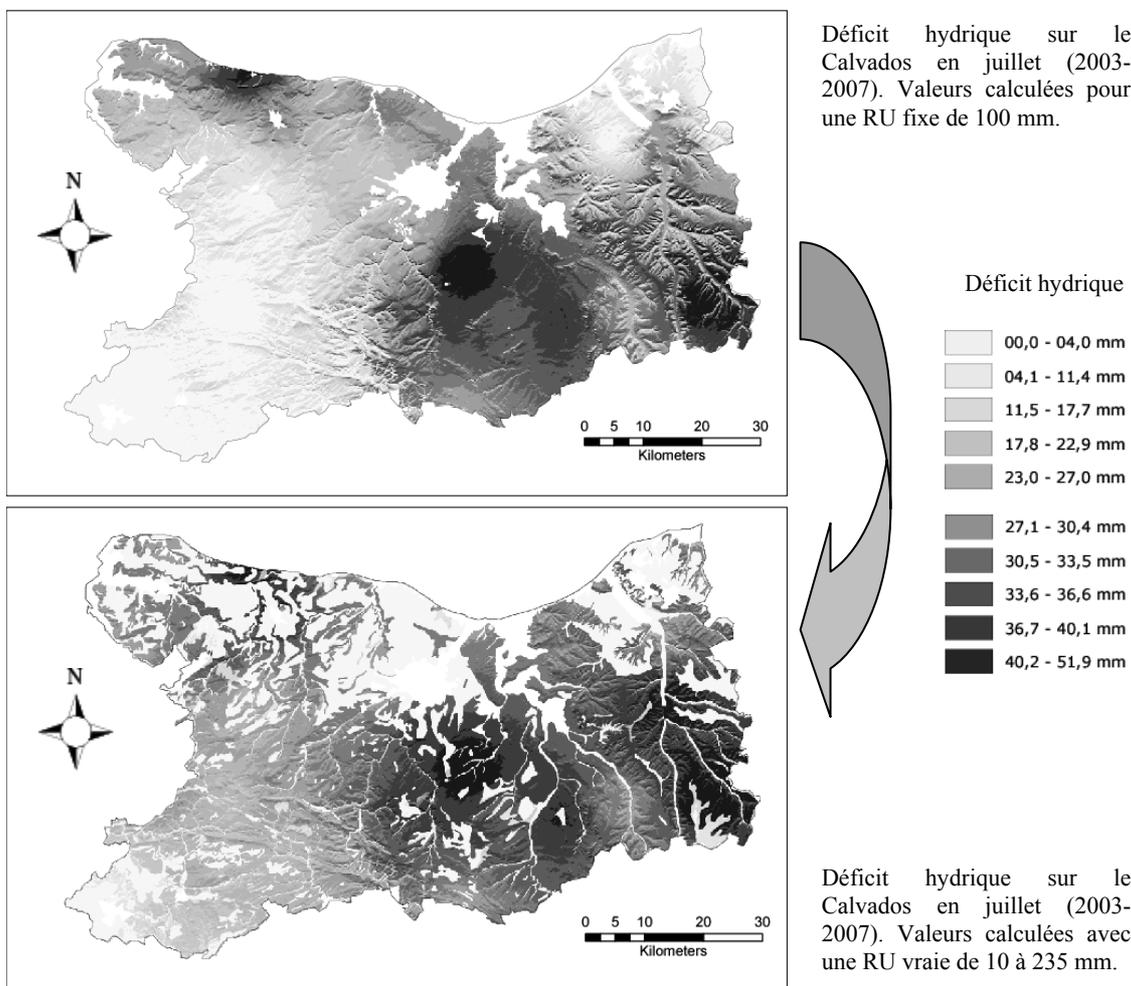


Figure 4.2.10. Déficit hydrique dans le Calvados en juillet (moyenne 2003-2007) : déficit calculé en prenant en compte le relief et une RU fixe de 100 mm (en haut) ou une RU « vraie » (en bas) dont les valeurs varient entre 10 et 235 mm en fonction de la texture, de l'épaisseur et du pourcentage en éléments grossiers des sols (Cantat *et al.*, 2010).

- Conclusion

Grâce à la prise en compte de la diversité des sols et du relief à l'échelle de la parcelle, le bilan hydrique spatialisé à fine résolution présenté dans cet article offre une nouvelle lecture des contraintes hydriques qui peut s'avérer utile pour les acteurs en charge de la gestion et de l'aménagement du territoire, mais aussi pour l'agriculteur puisque la finesse de résolution spatiale permet de localiser et d'identifier les exploitations les plus touchées par le déficit en eau des sols. Prochainement, ces résultats seront affinés par la création d'une nouvelle couche d'informations (pondération des valeurs de RU en fonction des mouvements gravitaires de l'eau dans le versant) et par l'intégration d'un module de spatialisation « raisonnée » des précipitations (travaux en cours). Dans l'optique d'un changement climatique apportant sur la France moins d'eau et plus de chaleur durant la saison végétative (d'après les conclusions du GIEC, 2007), on assisterait corrélativement à un accroissement des déficits hydriques. Cela pose à moyen terme la question de la vulnérabilité des systèmes de production agricole pour lesquels la sécheresse des sols sera la plus « impactante » (Le Gouée *et al.*, 2010). Plus largement, dans le cadre du *Développement durable*, cette étude souligne la nécessité de réfléchir dès aujourd'hui à des stratégies d'adaptation de l'agriculture pour atténuer les effets attendus du changement climatique.

4.2.3. Publications

Cantat, O., Le Gouée, P., Bensaïd, A., 2009 : Le rôle de la topographie et des sols dans la modélisation spatiale d'échelle fine des bilans hydriques. *Actes des Journées de Climatologie*, CNFG, 2009, 81-100.

Cantat, O., Le Gouée, P., Bensaïd, A., Savouret, E., 2010 : Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC*, Rennes (1-3 septembre), 101-106.

Dubreuil, V., Lamy, C., Lecerf, R., Planchon, O., 2010 : Monitoramento de secas na Bretanha : reconstituição histórica e abordagem por teledeteção. *Mercator*, 9 (1), 107-119.

Lamy, C., Dubreuil, V., 2010 : Impact des sécheresses sur le bilan hydrique : Modélisation à partir du climat d'années passées. Poster présenté au *23ème colloque de l'AIC*, Rennes (1-3 septembre).

Lecerf, R., Planchon, O., Dubreuil, V., Hubert-Moy, L., 2008 : Impact de la variabilité climatique sur la dynamique de la végétation par télédétection moyenne résolution à l'échelle régionale : le cas de la Bretagne. *XXI^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Montpellier, septembre 2008, 385-390.

Lecerf, R., 2009 : *Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution (Application à la Bretagne)*. Thèse de doctorat de Géographie, Université Rennes-2, 326 p.

Le Gouée, P., 2008 : *Représentation cartographique des grands types de sols du Calvados. Conseil général du Calvados, Chambre d'agriculture du Calvados, DIREN de Basse-Normandie*. Poster au 1/50000.

Le Gouée, P., Delahaye, D., 2008 : *Modélisation et cartographie de l'aléa érosion des sols et des espaces de ruissellement dans le Calvados*. Rapport d'étude, Conseil général du Calvados, Chambre d'agriculture du Calvados, DIREN de Basse-Normandie et AUP, 240p.

Le Gouée, P., Cantat, O., Bensaïd, A., Savouret, E., 2010 : La sensibilité des systèmes de production agricole en Normandie face au Changement climatique (2000-2100). *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC*, Rennes (1-3 septembre), 331-336.

Autres références citées

Baize, D., 2000 : *Guide des analyses en pédologie. Techniques et pratiques*. INRA Editions, 257 p.

Brochet, P., Gerbier, N., 1974 : *L'évapotranspiration. Aspects agrométéorologique. Evaluation pratique de l'évapotranspiration potentielle*. Monographie Météorologie Nationale, 65, Paris, 65 p.

Déqué, M., 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.

Dubreuil, V., 1994 : *La sécheresse dans la France de l'Ouest : Etude d'après les bilans hydriques et les données des satellites NOAA.AVHRR*, Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, 381p.

Duchaufour, P., 1991 : *Pédologie. Sol, végétation, environnement*. Masson, Paris, Milan, Barcelone, Bonn, 3^{ème} édition, 289 p.

Fu P., et Rich P.M., 2002 : A geometric solar radiation model with application in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 25-35.

Geiger, R., 1966 : *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge (Massachusetts, USA), 611 p.

GIEC, 2007 : *Climate change 2007 : the physical science basis*, Summary for policymakers. Contribution of WG 1 to the fourth assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change, website: ipcc.ch

Jamagne, M., Betremieux, R., Begon, J.C., Morin, A., 1977 : Quelques données sur la variabilité dans le milieu naturel de la réserve en eau des sols. *Bull. Techn. Infor.*, 324-325, 627-641.

Kotték, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F., 2006 : World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/>

Lecarpentier, C., 1975 : L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. *Annales de Géographie*, 463-464, 257-274, 385-414.

Oke, T.R., 1978 : *Boundary Layer Climates*. London : Methuen & Co. Ltd, 372 p.

Orlanski, I., 1975 : A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin American Meteorological Society*, 56, 527-530.

Rich, P.M, Dubayah, R., Hetrick, W.A., Saving, S.C., 1994 : Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetric and Remote Sensing*, Technical papers, 524-529.

Stahl, K., 2001 : *Hydrological drought : A study across Europe*. Thèse de Doctorat, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br. (D), 122 p.

Turc, L., Trzpit, J.P., 1985 : Les bilans d'eau : un thème de recherche fondamental pour la climatologie écologique. *Physio-Géo*, 12, 41-57.

4.3. Observation et modélisation spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles

4.3.1. Introduction et plan de travail méthodologique

Les simulations du changement climatique avec les modèles globaux ne permettent pas de prendre en compte les effets locaux. L'objectif de ces travaux, menés dans le cadre du programme *ANR-JC07-194103 TERVICLIM* durant la période 2008-2011, est donc de mettre en place une méthode de mesures (météorologique et agronomique) et de modélisation spatiale adaptée aux échelles fines, qui permettra de définir le climat actuel du vignoble et apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée.

1. Mesures : utilisation ou installation de réseaux de mesures climatiques ; analyse des données (locales et régionales), notamment en prenant en compte les types de circulation et de temps ; comparaison avec observations agronomiques.
2. Modélisation numérique RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) permettant de rendre compte des processus physiques de l'atmosphère à l'échelle des terroirs puis d'effectuer des simulations de l'impact du changement climatique attendu à l'échelle du terroir.
3. Forçage des sorties de modèles RAMS avec les scénarios du changement climatique.

4.3.2. Un réseau météorologique adapté à l'échelle du terroir viticole et tenant compte des échelles spatiales imbriquées : exemple du Val de Loire

Afin d'avoir une vision à la fois élargie et détaillée des climats viticoles et des contraintes climatiques communes à chaque vignoble, mais aussi propres à chacun d'entre eux, plusieurs régions viticoles représentatives ont été sélectionnées dans le monde :

- En Europe : Val de Loire, Champagne, Bourgogne et Bordelais en France, Navarre en Espagne.
- En Amérique du Nord : Napa Valley aux Etats-Unis (Californie).
- En Amérique du Sud : Vallées de Casablanca et du Rio Bio Bio au Chili, région de Mendoza en Argentine, de Tarija en Bolivie.
- En Afrique : région de Stellenbosch en Afrique du Sud.
- En Océanie : région de Marlborough en Nouvelle-Zélande.

L'accent a été mis sur les vignobles français dans le cadre des travaux menés en interaction avec le programme soutenu par la Fondation MAIF (cf. article publié dans le *Bulletin de la Société Géographique de Liège* (Quénol *et al.* , 2008). Les travaux sur le Val de Loire (thèse de Doctorat en cours de Cyril Bonnefoy) permettent d'avoir une vision multi-échelles de la problématique développée (Fig. 4.3.1.).

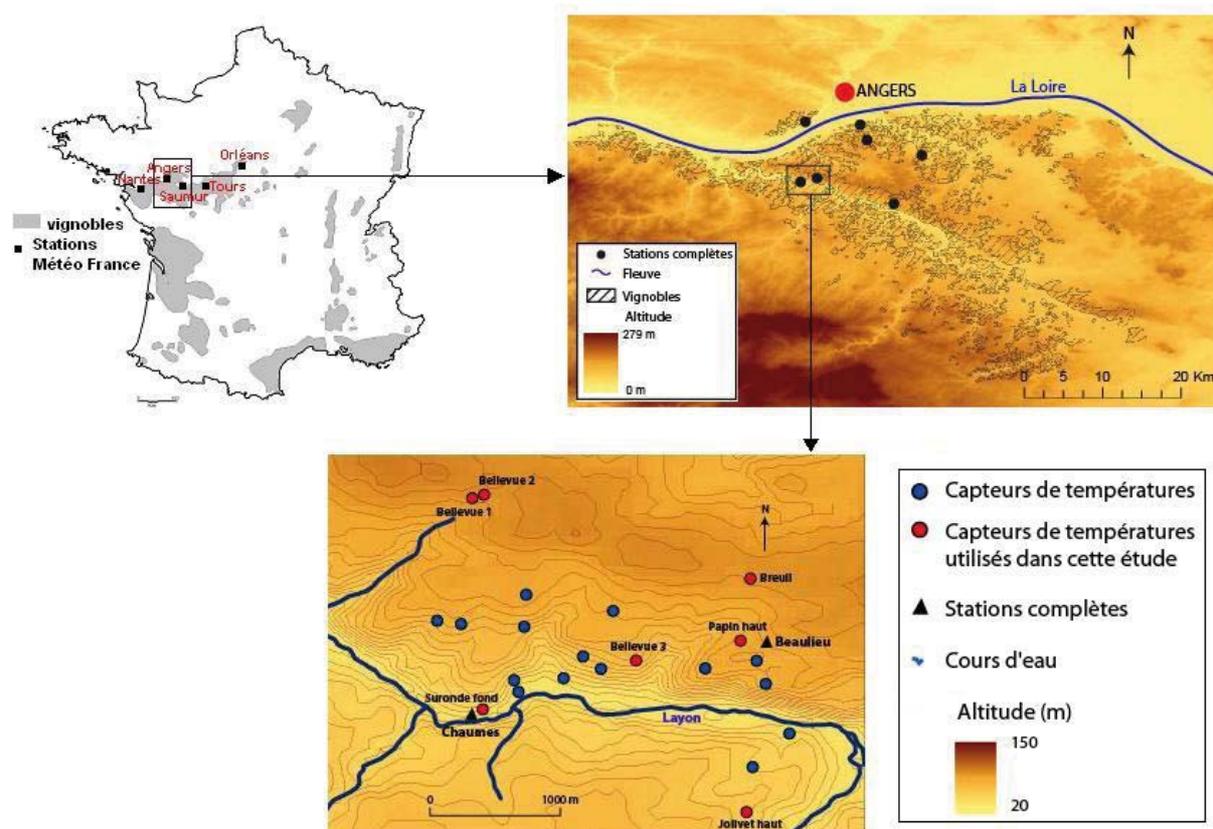


Figure 4.3.1. Site d'étude dans le Val de Loire et spécifiquement en Anjou, avec localisation des stations météorologiques de référence et des capteurs installés (Bonnefoy *et al.*, 2010a).

4.3.3. Quelques résultats obtenus dans l'ensemble du Val de Loire (échelle régionale)

L'observation des températures moyennes annuelles depuis le milieu du XX^e siècle indique une nette tendance au réchauffement depuis la fin des années 1980 pour l'ensemble des stations du centre-ouest de la France (Fig. 4.3.2.).

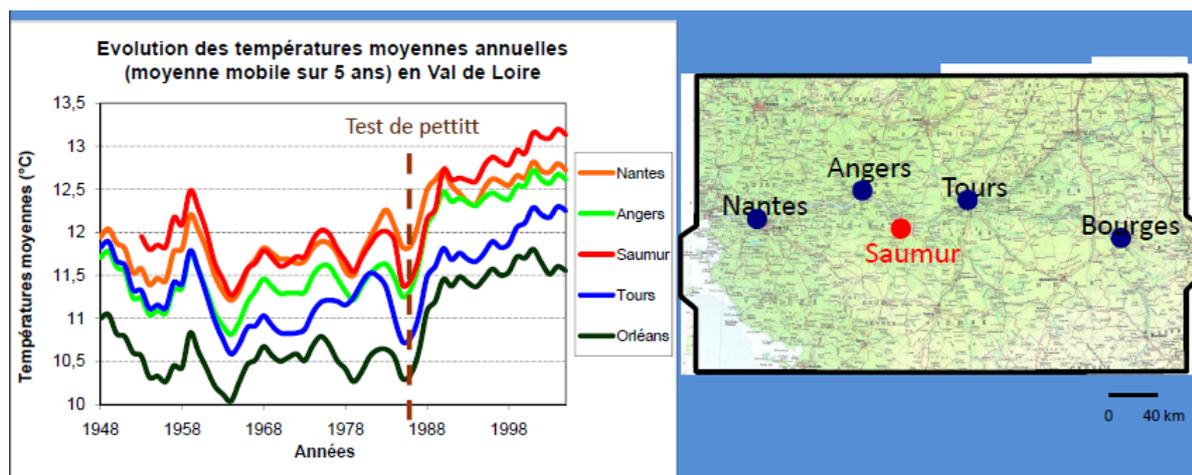


Figure 4.3.2. Caractérisation du réchauffement climatique dans le Val de Loire (Bonnefoy *et al.*, 2010b).

Le test statistique de Pettitt fait ressortir une rupture climatique en 1987, avec, selon les stations, une augmentation de la température moyenne annuelle de 0,7 à 1,2°C entre la période « pré-rupture » et « post-rupture ». La figure 4.3.3. montre les répercussions du réchauffement climatique sur l'évolution de l'indice des degrés-jours de Winkler.

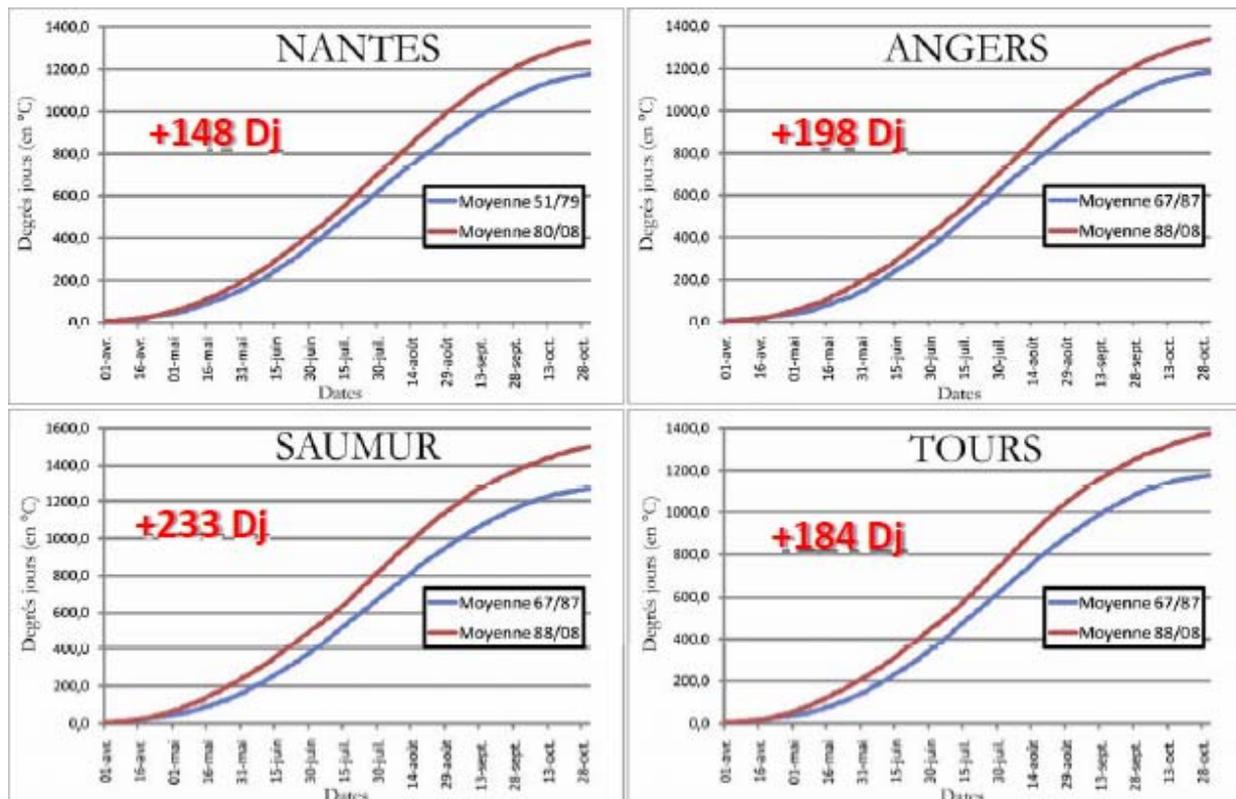


Figure 4.3.3. Evolution de l'indice des degrés-jours de Winkler calculé pour quatre stations du Val de Loire, sur deux périodes avant et après la rupture identifiée en 1987 (Bonnefoy *et al.*, 2010b).

L'indice des degrés-jours de Winkler (Winkler *et al.*, 1974) se calcule sur la saison végétative de la vigne (avril à octobre) et permet de connaître les besoins en chaleur de la plante pour le développement/apparition de chaque stade phénologique (débourrement, floraison, véraison et maturité). Il est donc utilisé dans des travaux traitant de l'impact du climat sur la vigne.

La figure 4.3.3. présente les valeurs de cet indice pour deux périodes avant et après la rupture d'homogénéité des températures moyennes annuelles identifiée en 1987. Une hausse des valeurs de l'indice est constatée pour toutes les stations, conséquence de la hausse de la température moyenne. Cependant, l'amplitude de cette hausse varie d'une station à l'autre, en fonction de celle de la température moyenne annuelle. Ainsi la hausse de l'indice est la plus faible à Nantes (+148 Dj) et la plus forte à Saumur (+233 Dj). Ainsi la station de Saumur, plus chaude que ses voisins du fait de sa position géographique et topographique, se réchauffe également plus vite. Cette hausse de l'indice des degrés-jours de Winkler a des conséquences sur la phénologie de la vigne. L'apport de chaleur requis pour chaque phénophase étant atteint plus tôt dans la saison, chacun des stades est observé plus précocement, avec une avance de parfois 15 jours à trois semaines.

4.3.4. Résultats obtenus dans le secteur des *Coteaux du Layon* (échelle locale)

Afin de caractériser le climat des *Coteaux du Layon* (Maine-et-Loire), 22 capteurs de températures type « *Tinytag* » ont été disposés au sein même des vignobles, durant deux campagnes de terrain, une au printemps 2008 et une autre au printemps 2009. Ces capteurs sont directement implantés sur les piquets de vigne et sont situés sous abri à 1 mètre du sol. Pour une bonne représentativité du climat, les *data loggers* ont été installés en prenant en

compte la topographie, les pentes, les expositions, la nature du sol ... Ces informations ont été obtenues sous SIG (système d'information géographique) à partir du modèle numérique de terrain et de la carte des unités de terroirs de base de l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA). L'ensemble des capteurs sont répartis sur un secteur d'environ 600 ha (Fig. 1), la majorité d'entre eux étant situé dans l'appellation *Quart de Chaumes*. Cette appellation est la plus prestigieuse des coteaux du Layon puisqu'il a été reconnu par décret que ce secteur, exposé au sud, permet le développement quasi-régulier de la pourriture noble à l'origine des vins liquoreux (Institut National des Appellations d'Origine). La plupart des capteurs se trouvent donc en exposition sud, mais parfois avec des conditions très différentes les uns des autres. Par exemple, le capteur Bellevue 1, situé à quelques dizaines de mètres du capteur Bellevue 2, est disposé sur un sol peu profond et par conséquent très humide alors que l'autre capteur est sur un sol beaucoup plus profond et donc plus sec. Deux stations *Campbell* viennent compléter ce réseau, celle de Chaumes, dans le fond de vallée et celle de Beaulieu en haut de coteau.

Les « Tinytags » et les stations ont été programmés afin de fournir une donnée de température toutes les 15 minutes. La saison phénologique de la vigne commence le 1^{er} avril mais ne disposant des données que depuis le 18 avril 2009 pour la plupart des capteurs, nous avons calculé les moyennes de températures mensuelles de mai à octobre et les indices bioclimatiques ont été calculés à partir de cette date.

Le réseau de capteurs installés dans le secteur viticole de la vallée du Layon a permis de détecter d'importants contrastes climatiques spatiaux à des échelles très fines (Fig. 4.3.4).

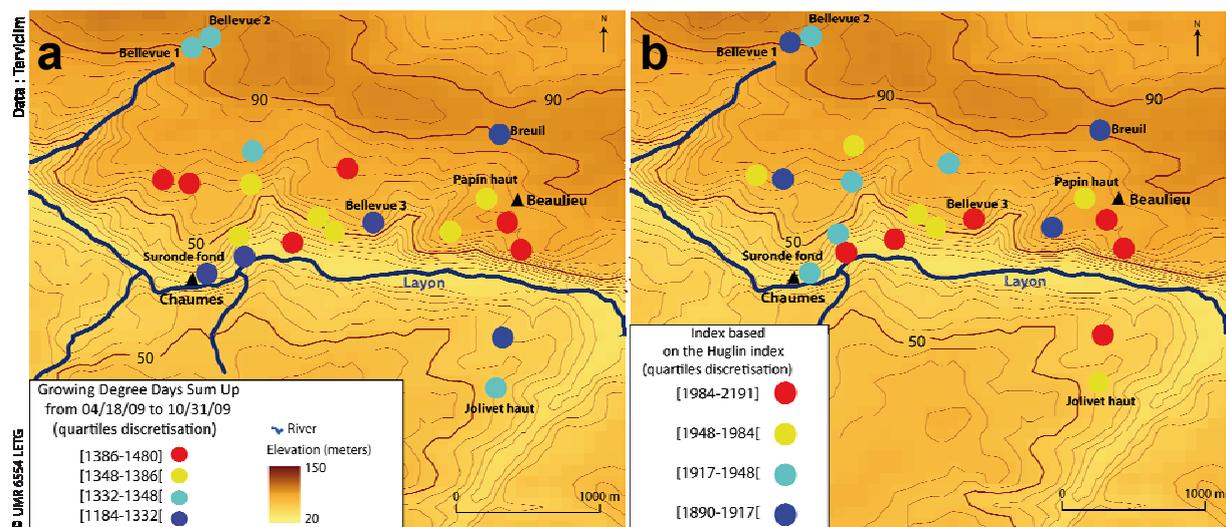


Figure 4.3.4. Indices bioclimatiques basés sur l'indice des degrés jours de Winkler (a) et l'indice d'Huglin (b) dans les coteaux du Layon (Bonnefoy *et al.*, 2010a).

Initialement adaptés à l'échelle régionale, les indices de Winkler¹ et Huglin² ont été calculés dans les Coteaux du Layon afin de souligner les différences thermiques à l'échelle locale. La figure montre les deux indices calculés pour les 21 capteurs. Les degrés jours varient entre les capteurs de 1184 à 1481. En se référant à la classification de Winkler la plupart des capteurs seraient classés dans la région I, ce qui correspond à la zone climatique viticole la plus fraîche dans le monde (850-1389 Dj). Cependant six des 21 capteurs seraient

¹ Winkler index = $\sum T_{mj} - 10$ avec T_{mj} (Température moyenne journalière) > 10 et somme réalisée du 1^{er} Avril au 31 Octobre (Winkler *et al.*, 1974)

² Huglin index = $\sum [(T_{mj}-10)+(T_x-10)/2] * k$ (avec T_{mj} la température moyenne journalière, T_x la température maximale journalière et k le coefficient de durée du jour)

classés dans la région II (1389-1667 Dj). Ceci montre à quel point le climat peut varier à l'échelle locale. Les indices les plus forts sont enregistrés à mi-pente sur les coteaux et/ou avec une exposition sud et les indices les plus faibles sont soit enregistrés en haut ou en bas de pente et/ou avec une exposition nord. Concernant l'indice de Huglin, il varie de 1953 à 2191 et pratiquement tous les capteurs sont ainsi classés dans la catégorie « *climat tempéré* » et un dans la catégorie « *climat tempéré chaud* » (2100-2400). Une différence de 200 unités pour une si petite aire cultivée (environ 600 ha) est remarquable. Les indices les plus faibles se trouvent en général en haut de pente et les plus élevés en bas de pente et/ou avec une exposition sud. En effet les températures maximales les plus élevées sont régulièrement observés dans les bas fonds et l'indice de Huglin, selon sa formule, donne un poids plus important aux températures maximales que l'indice de Winkler qui est simplement basé sur les températures moyennes journalières.

Autre méthode utilisée pour l'étude des relations climat-vigne, l'indice de fraîcheur des nuits correspond selon la bibliographie à la température minimale moyenne du mois de Septembre dans l'hémisphère nord (Fig. 4.3.5.). Cependant, étant donné la précocité des stades phénologiques de la vigne associé au réchauffement climatique, la maturité a été avancée d'environ 15 jours dans le Val de Loire en 30 ans. L'indice de fraîcheur des nuits a donc été calculé sur la période 15 Août-15 Septembre pour mieux coller avec la réalité de ce début de siècle. Cet indice permet de classer les nuits des plus froides ($<12^{\circ}\text{C}$) aux plus chaudes ($>18^{\circ}\text{C}$). Des températures fraîches durant la maturation du raisin, favorisent la synthèse des anthocyanes, ce qui donne la couleur de la peau des grappes et la qualité du vin. Cet indice est ainsi significativement corrélé avec l'altitude ($R^2=0,72$), en partie à cause des fréquentes nuits à inversions thermiques. En conséquence, l'indice le plus faible ($9,6^{\circ}\text{C}$) a été enregistré à l'altitude la plus basse (28 mètres) et sur une pente orientée au nord. A l'opposé, les nuits sont plus douces en haut des parcelles avec des indices supérieurs à 12°C à une altitude supérieure à 65 mètres. Ainsi, les conditions nocturnes peuvent être classées dans deux catégories différentes dans ces vignobles : « nuits froides » dans les bas fonds et « nuits très fraîches » en haut des pentes. Cette fraîcheur des nuits, généralisée au secteur même si des nuances sont observées, est très bénéfique pour la vigne et particulièrement pour la maturation des grappes.

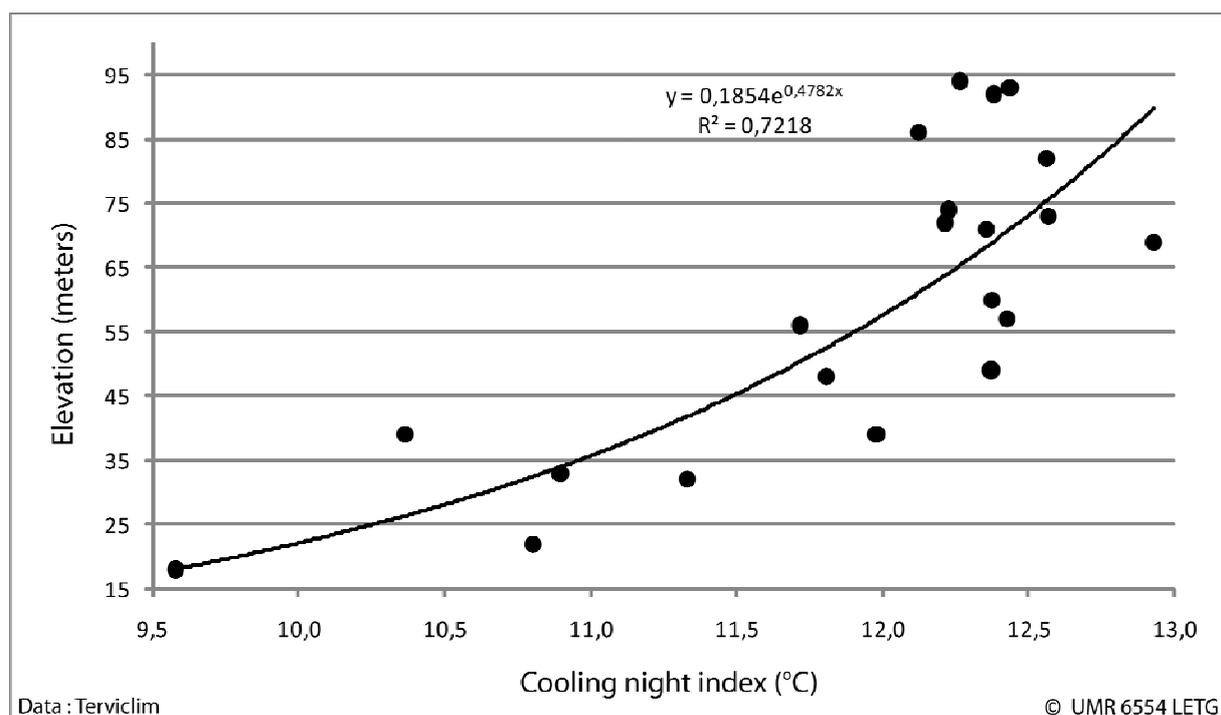


Figure 4.3.5. Indice de fraîcheur des nuits dans les Coteaux du Layon (à paraître dans *International Journal of Climatology* : Bonnefoy *et al.*, 2011).

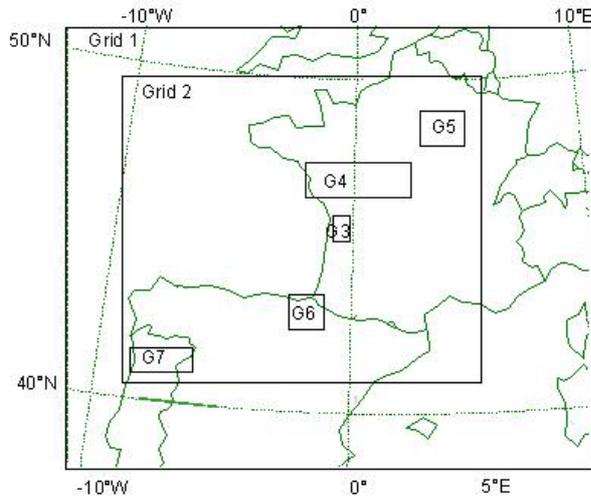
Cette étude montre déjà très clairement la variabilité spatiale des températures à l'échelle des Coteaux du Layon. Les zones plus « chaudes » ont été mises en évidence par les indices bioclimatiques et correspondent en général aux mi-coteaux alors que les températures minimales descendent de façon plus conséquente en bas de coteau et près de la rivière, notamment lors de nuits à inversion thermique. Les plateaux quant à eux connaissent des températures maximales plus faibles donc des indices bioclimatiques moins élevés. Les amplitudes thermiques journalières sont plus élevées dans le bas des parcelles, près du Layon, ce qui est favorable au développement de la pourriture noble à l'origine des vins liquoreux produits dans ce secteur. L'indice de fraîcheur des nuits apporte des informations complémentaires très utiles, car celui-ci est important pour estimer la maturité du raisin. Enfin, prochainement des simulations climatiques avec le modèle méso-échelle RAMS ont commencé à être réalisées et permettront d'évaluer les futurs effets du réchauffement climatique sur le climat actuel des Coteaux du Layon.

4.3.5. Recherches en cours en région bordelaise

4.3.5.1. Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles : Projet d'étude sur le Domaine viticole de Château Dauzac

Les autres travaux conduits parallèlement sur les autres régions viticoles françaises impliquées dans le programme ANR-JC 07194103 TERVICLIM sont susceptibles d'aider à l'avancement des travaux menés dans le cadre du programme soutenu par la Fondation MAIF. Ainsi, suite aux discussions engagées à l'occasion de la réunion du 14 avril 2010 à Rennes, une proposition d'étude impliquant les deux programmes de recherche a ainsi pu être formulée auprès de la Fondation MAIF. Dans le cadre du programme TERVICLIM, une première modélisation atmosphérique a été réalisée sur l'ensemble des sites viticoles français

et européens étudiés (Fig. 4.3.6.) avec une résolution de 1 km, comprenant le vignoble bordelais (Fig. 4.3.7.) lors des épisodes gélifs (avril) et caniculaires (août) de l'année 2003.



G1 :51°N, 38°N ; -13°W,+11°E - grille synoptique – Nx = 70, Ny= 60
 G2: 50°N, 42°N ; -11°W, +5°E - grille intermédiaire – Nx = 237, Ny = 187
 G3: 45.2°N, 44.8°N ; -1°W, -0.4°W - domaine Bordeaux – Nx = 47, Ny= 47
 G4: 47.6°N, 46.7°N ; -2.4°W, +1.5°E - domaine Val de Loire – Nx= 297, Ny=107
 G5: 49.4°N, 48.5°N ; +3.2°E, +4.7°E - domaine Champagne – Nx= 107, Ny=107
 G6: 43.1°N, 42.1°N ; -2.3°W, -1.1°W - domaine de Navarre – Nx= 107, Ny= 107
 G7: 42.3°N, 41.6°N ; -9.1°W, -7.8°W – domaine du Vinho Verde – Nx= 107, Ny= 97

Figure 4.3.6. Localisation des grilles imbriquées pour les simulations atmosphériques dans les vignobles étudiés.



Figure 4.3.7. Localisation du domaine pour les simulations atmosphériques sur le vignoble bordelais. Le cadre blanc représente la grille avec des mailles horizontales de 1 km (46.7°N, 44.2°N ; -2.4°W, +0.5°E). Le cadre rouge représente une grille avec une résolution plus fine de 200 m centrée sur l'Appellation Margaux et le Domaine du Château DAUZAC.

A une échelle plus fine, c'est-à-dire à l'échelle du vignoble, aucun vignoble dans le Bordelais n'avait encore été choisi et équipé en stations et capteurs météorologiques. La méthodologie de mesures déjà adoptée dans les autres vignobles du réseau TERVICLIM sera appliquée sur le domaine de Château Dauzac (pose de capteurs dans les 40 ha du vignoble du Château Dauzac). Une modélisation climatique méso-échelle sera réalisée sur l'Appellation Margaux (cadre rouge de la Fig. 2) afin d'étudier le climat actuel de ce vignoble en prenant en compte les spécificités locales. L'objectif final est de réaliser des simulations d'adaptation au changement climatique à l'échelle du domaine viticole.

L'extension du programme TERVICLIM dans l'Aire d'Appellation Margaux constituerait une référence de renommée mondiale parmi les sites étudiés.

La partie modélisation atmosphérique est déjà mise en place sur le vignoble bordelais à une résolution 1 km, il resterait à mettre en place une grille à résolution de 200 m centrée sur le Château DAUZAC en zone d'Appellation Margaux.

Outre les données météorologiques disponibles de Météo-France, nous disposons également de données anciennes (Annales du BCM) pour la station de Bordeaux depuis 1894 (également données quotidiennes de la base ECA&D depuis 1920 pour Bordeaux) qui pourront être mises en relation avec les types de circulations atmosphériques (Hess-Brezowsky / version « PIK » de la classification).

Sur le site de Château Dauzac, des capteurs ont été installés en juin 2010 (Fig. 4.3.8.).

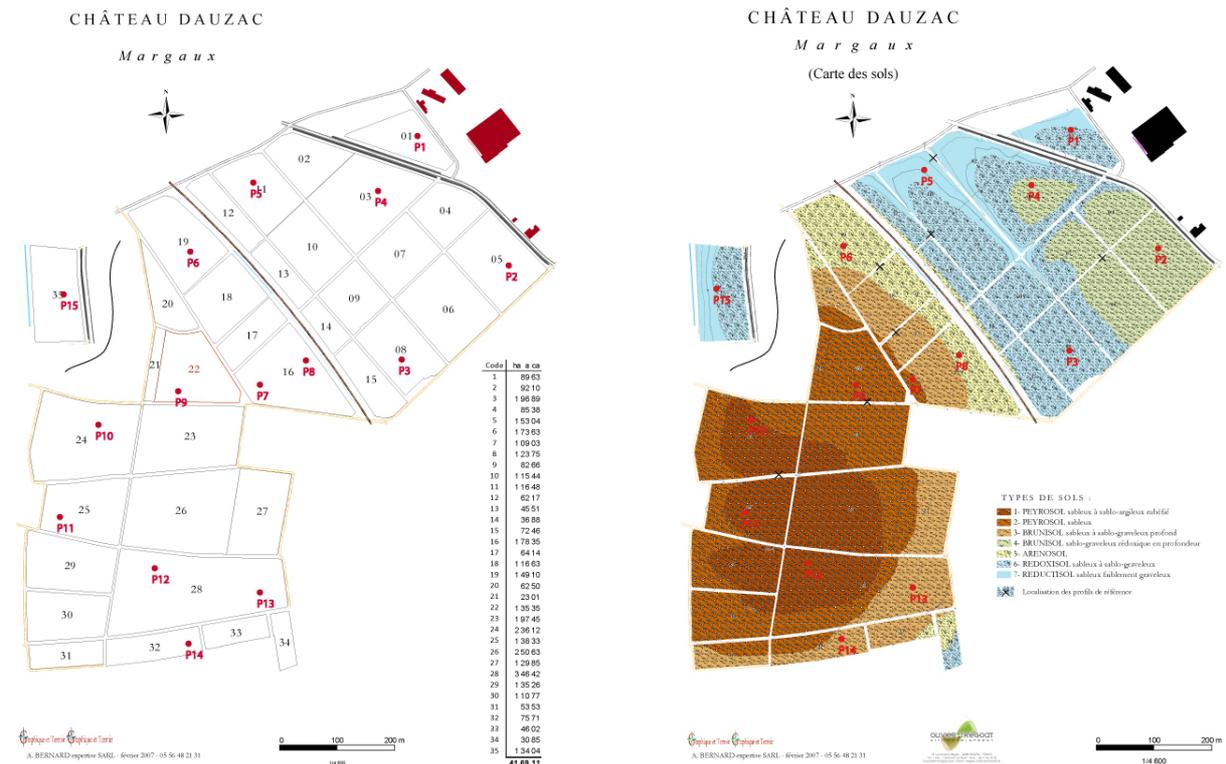


Figure 4.3.8. Mise en place du réseau de capteurs à Château-Dauzac (juin 2010).

Les dénivellations sont très faibles (quelques mètres), mais la diversité des types et textures de sols permettront de mesurer, à une échelle très fine, les effets du substratum sur la température et d'en calculer les impacts en termes d'indices bioclimatiques. Les premières mesures effectuées le 14 août 2010 illustrent déjà l'intérêt de l'installation de ce réseau de mesure localisé (Fig. 4.3.9.).

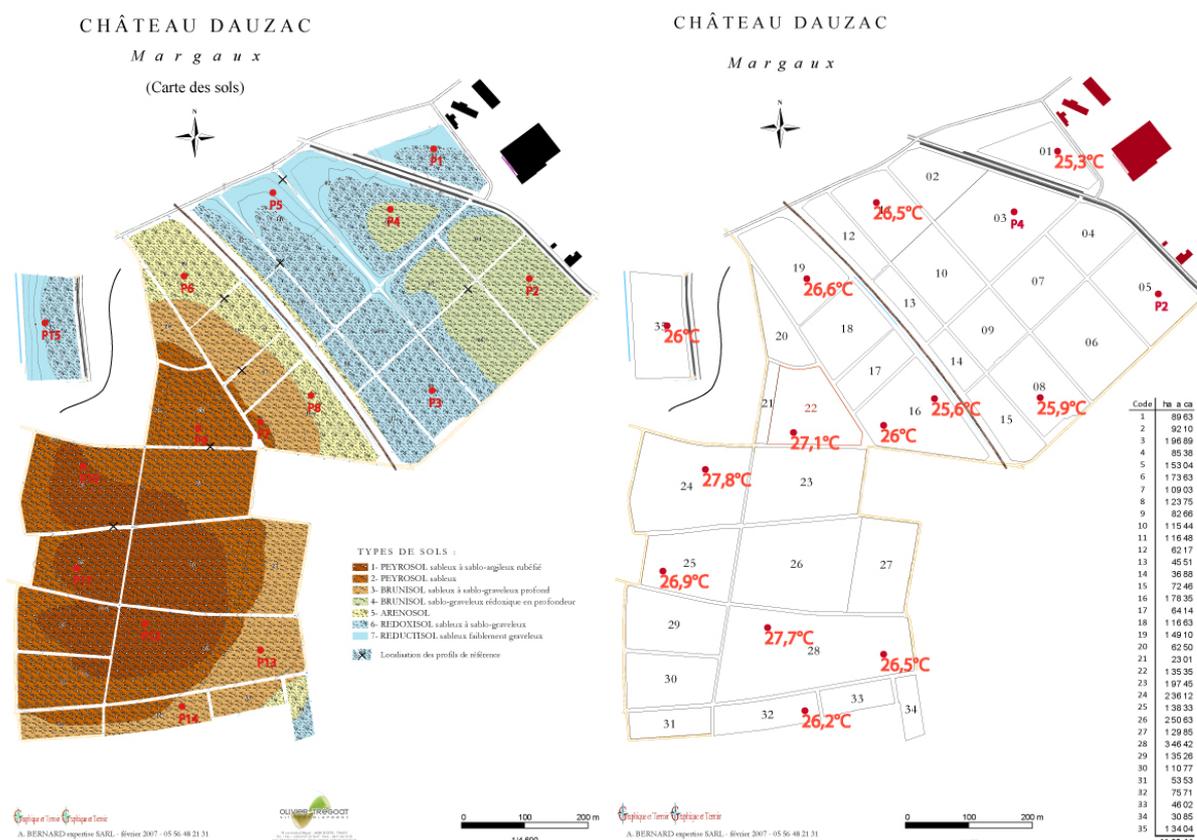


Figure 4.3.9. Température maximale mesurée par les capteurs « TERVICLIM-TERADCLIM » le 14 août 2010.

Les premiers résultats obtenus entre juin 2010 et Janvier 2011 montrent déjà une forte variabilité spatiale des températures en relation avec le type de sol et la topographie même si l’amplitude altitudinale est peu importante (moins de 5 m).

Au mois d’août 2010, la moyenne des températures maximales varient de plus de 1°C suivant les points de mesures et à l’échelle d’une journée relativement chaude, ces écarts peuvent dépasser 2,5°C degrés (Fig. 4.3.9.). Cette variabilité thermique est un facteur très important dans cette période de maturation du raisin. Cela apporte un indicateur très intéressant pour le viticulteur notamment pour définir les dates de vendange.

Le suivi thermique durant la période de croissance de la vigne en relation avec les données phénologiques de la vigne et les caractéristiques du vin permettra de mettre en évidence la variabilité spatio-temporelle du climat à l’échelle de l’exploitation viticole de Château Dauzac. Ces mesures seront ensuite intégrées dans un modèles permettant de simuler l’impact du changement climatique à l’échelle de l’exploitation en fonction des scénarios plus ou moins optimistes du GIECC.

Du reste Savignac disposait d'un précieux thermomètre (de type inconnu), qu'il relevait avec application en avril, au moment critique du débourrement de la vigne et des risques de gelées. Les dates de début et de fin des vendanges au château sont soigneusement indiquées, ainsi que le volume de la récolte (90% de vin blanc) ; mais aucune corrélation ne s'établit entre le calendrier et la quantité (Fig. 4.3.9.).

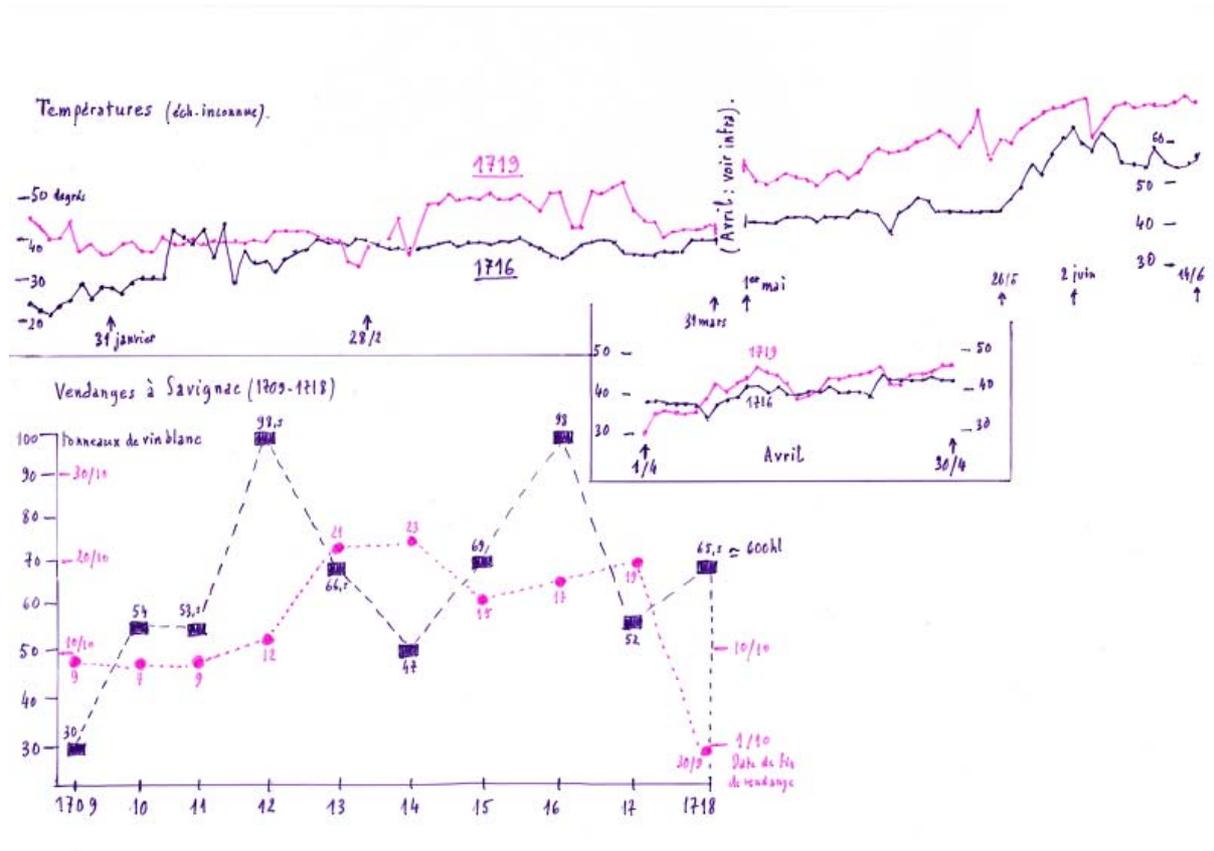


Figure 4.3.9. Mesure de la température et informations sur les vendanges d'après le « Mémorial de Savignac ».

Dans une phase ultérieure de la recherche, je me propose de convertir le fichier graphique en fichier type GWL, en retenant seulement les principaux types de circulation. Plusieurs périodes semestrielles semblent pouvoir se prêter à une telle interprétation, avec une marge d'erreur limitée. A cet égard, l'exemple du mois de janvier 1709 est satisfaisant. Ce mois de « grand hiver » fut très froid, comme on sait ; mais il comporta aussi plusieurs épisodes neigeux, tout comme le mois de janvier 2010. Il est donc utile d'exploiter à fond des documents historiques de valeur comme le *Mémorial de Savignac* pour tenter de mieux cerner la « variabilité naturelle » de nos climats.

4.3.6. Publications

Bonnefoy, C, Quénot, H, Barbeau, G, Madelin, M., 2010a : Analyse climatique à l'échelle des coteaux du Layon. Actes du *VIII International Terroir Congress*, 14-18 Juin, Soave (Italie), 109-114.

Bonnefoy, C., Quénot, H., Planchon, O., Barbeau, G., 2010b : Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique. *EchoGéo*, 14, 13 p.

Quénol, H., Planchon, O., Wahl, L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 51, 127-137.

Autres références citées

Le Mao, C., 2004 : *Chronique du Bordelais au crépuscule du Grand Siècle : le Mémorial de Savignac*. Presses Universitaires de Bordeaux, Société des bibliophiles de Guyenne, coll. « Mémoires Vives », Bordeaux, 653 p.

Winkler, A.J., Cook, J.A., Kliewer, W.M., Lider, L.A., 1974 : *General Viticulture*. Berkeley, University of California, 710 p.

4.4. Conception et réalisation d'un logiciel pour la détermination automatique des types de temps

Dans le cadre d'une recherche météo-climatique à l'échelle de la France, une interface logicielle a été conçue afin d'accéder rapidement à une classification libre et/ou supervisée des *types de temps*. Baptisé « Types de Temps Sensibles et à Risques » (TTSR), ce programme permet d'automatiser des suites d'opérations longues, voire impossibles sous simple tableur. Développé sous Visual Basic, ce logiciel offre la possibilité de traiter de très grands ensembles de données au pas de temps journalier grâce à la sélection de requêtes prédéfinies et/ou à la création de requêtes personnalisées selon les besoins de chaque utilisateur.

4.4.1. Détermination de la base de données météorologiques de référence

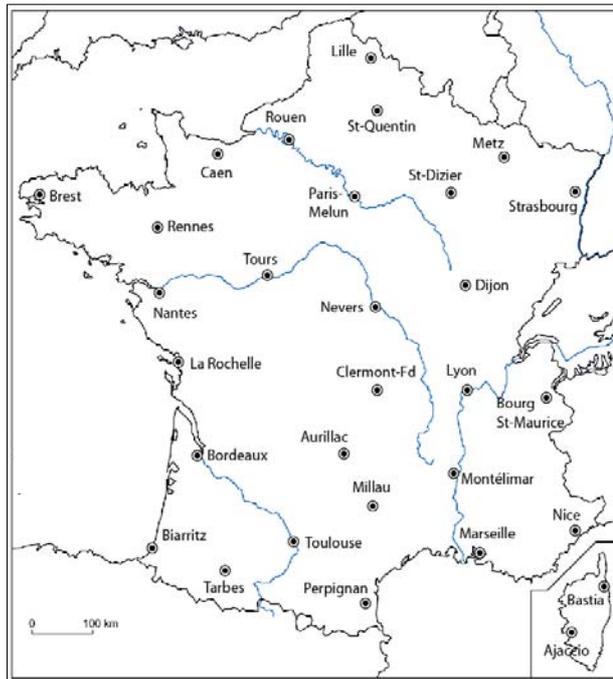
La base de données sur laquelle fonctionne le logiciel prend en compte à la fois les aspects thématiques pour répondre à tout type de demande (choix des paramètres), la disponibilité des paramètres caractérisant le temps sensible (longues séries homogènes et continues) et la représentativité géographique et climatique des stations correspondant aux deux critères précédents. Pour couvrir la diversité des domaines d'application potentiels, cet outil a été pensé de manière à s'appliquer aussi bien au milieu rural (agriculture, foresterie...) ou urbain (îlot de chaleur, pollution, risques sanitaires et routiers...), au domaine littoral (tempêtes, submersions...) ou encore montagnard (avalanches, glissements de terrain...). A cet effet, la base de travail est constituée d'une matrice comportant en colonnes 12 paramètres révélateurs du temps sensible et autant de lignes que de jours à analyser. Les paramètres météorologiques retenus se répartissent sous la forme de 9 valeurs mesurées et de 3 occurrences observées (Tab. 4.4.1.).

		description	unité	codage
mesurés	1	fraction d'insolation	%	SIGMA
	2	température minimale	°C	TN
	3	température maximale	°C	TX
	4	température moyenne	°C	TM
	5	précipitations	mm	RR
	6	ETp	mm	ETP
	7	vent moyen	m/s	FFM
	8	vent maxi	m/s	FXI
	9	pression atmosphérique	hPa	PMERM
observés	10	neige	nbj	NEIG
	11	orage	nbj	ORAG
	12	brouillard	nbj	BROU

Tableau 4.4.1. Les 12 paramètres météorologiques retenus pour la classification des types de temps en France (Bensaïd *et al.*, 2010).

Dans la plupart des cas, la profondeur temporelle a été volontairement limitée à une vingtaine d'années (1991-2010) pour disposer de données homogènes d'un point de vue instrumental. En effet, pour certains paramètres comme le vent et le rayonnement solaire, par exemple, l'évolution des appareils et des normes de mesure pourrait occasionner des ruptures artificielles dans les séries et altérer de ce fait l'interprétation des données. Au-delà d'un premier tri selon des aspects météorologiques et thématiques, le choix des stations de référence s'est ensuite fondé sur des considérations quantitatives en raison de l'inégale disponibilité des données dans les stations de Météo-France. Pour garantir la fiabilité des mesures (code qualité

maximum pour le site et les instruments) et pour disposer d'observations sur les phénomènes atmosphériques (exemples de la neige, du brouillard et de l'orage), seules les stations de « type 0 » (stations synoptiques professionnelles, avec observations sur place) ont été présélectionnées. En final, après inventaire et analyse des informations de la Climathèque, 31 stations ont été retenues pour rendre compte au mieux de la diversité météo-climatique du territoire métropolitain (Fig. 4.4.1).



Sélection de **31** stations Météo France parmi les 101 de « **type 0** » disponibles en métropole sur la période **1991-2010**.

→ sélection en fonction de :

1 - leur représentativité géographique et climatique à l'échelle de la France ;

2 - la disponibilité de séries de données fiables, complètes et homogènes sur les 12 paramètres choisis.

Inventaire réalisé d'après la base de données Climathèque de Météo France et pour les contours de la

Figure 4.4.1. Les 31 stations de références retenues pour étudier la diversité des types de temps en France (Bensaïd *et al.*, 2010).

4.4.2. Le logiciel « TTSR » : une approche des Types de Temps Sensibles et à Risques

Le logiciel TTSR a été développé dans le cadre d'une collaboration entre les laboratoires GEOSYSCOM (Géographie des systèmes de communication) et GEOPHEN (Géographie physique et environnement) de l'Université de Caen Basse-Normandie.

Lors de la phase de réflexion méthodologique, il est apparu nécessaire de suivre une approche simple et conviviale pouvant prendre en compte simultanément un volume considérable d'informations concernant différents types de données météorologiques. A cet effet, le logiciel TTSR procède à l'automatisation de suites d'opérations menant à une classification automatique libre et/ou supervisée des *types de temps*. Le développement de ce logiciel est fondé sur le principe du double prototypage (Bédard Y., Prince J., 1989) : un prototype rapide, qui présente des démonstrations sous la forme de simulations en montrant les différentes fonctionnalités des systèmes ; et un prototype évolutif, pour réaliser le futur système par modules successifs.

Dans une première étape, le programme s'appuie sur un algorithme qui définit les fréquences et la date pour chaque *type de temps* choisi au préalable par un utilisateur. La seconde étape permet d'ordonner le fichier par ordre décroissant selon la durée maximale des *types de temps*. Pour la convivialité, TTSR est doté d'une interface graphique développée *via*

le langage Visual Basic dont la structure est représentée par la figure 4.4.2., et les principales fonctionnalités mentionnées par les numéros en surimpression (explications dans la légende).

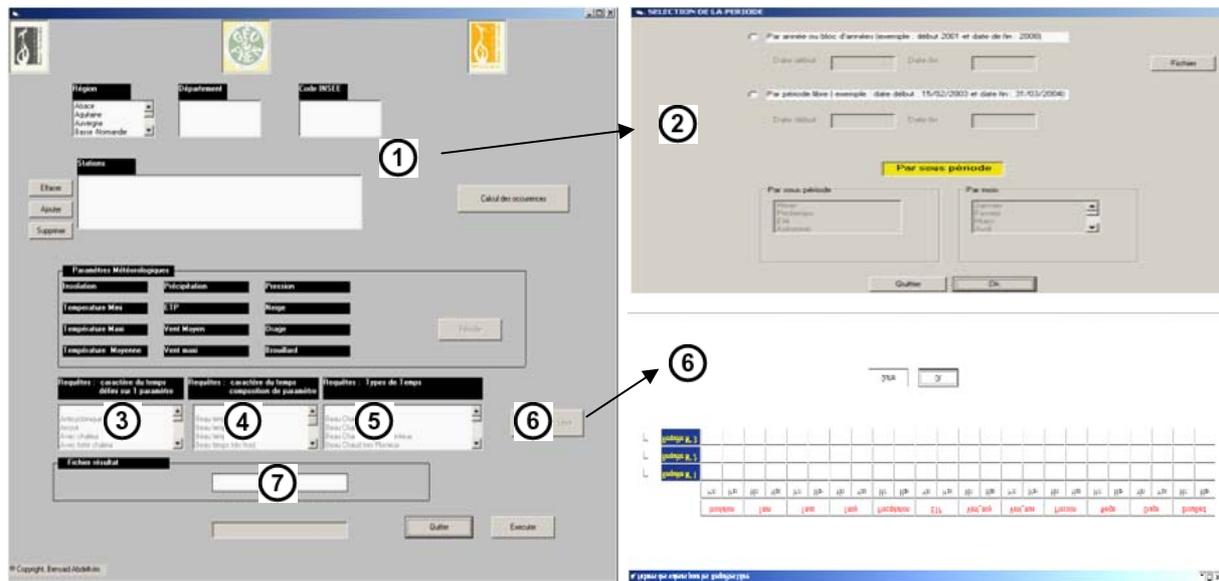


Figure 4.4.2. Interface graphique du logiciel TTSR : (1) choix des stations ; (2) choix des dates ; (3) (4) (5) requêtes prédéfinies ; (6) requêtes libres (composition personnalisée des types de temps) ; (7) nom du fichier résultat (Bensaïd *et al.*, 2010).

Ces interfaces permettent de lancer différents calculs de manière simple et rapide. Le progiciel est structuré en boîtes de dialogue hiérarchisées qui assurent l'exécution des divers sous-programmes relatifs à chaque étape. L'utilisateur peut choisir la station météorologique, la période d'analyse et un ou plusieurs *types de temps* prédéfinis. Toutefois, un bouton « Requête libre » a été créé pour ceux qui souhaitent définir leur propre *type de temps* avant de lancer l'exécution du programme. De même, les utilisateurs peuvent accéder directement à la connaissance immédiate de la durée et de la fréquence des *types de temps* étudiés grâce au bouton « Calcul des occurrences » qui évite de relancer toutes les opérations à partir du fichier brut des données météorologiques (Fig. 4.4.3.).

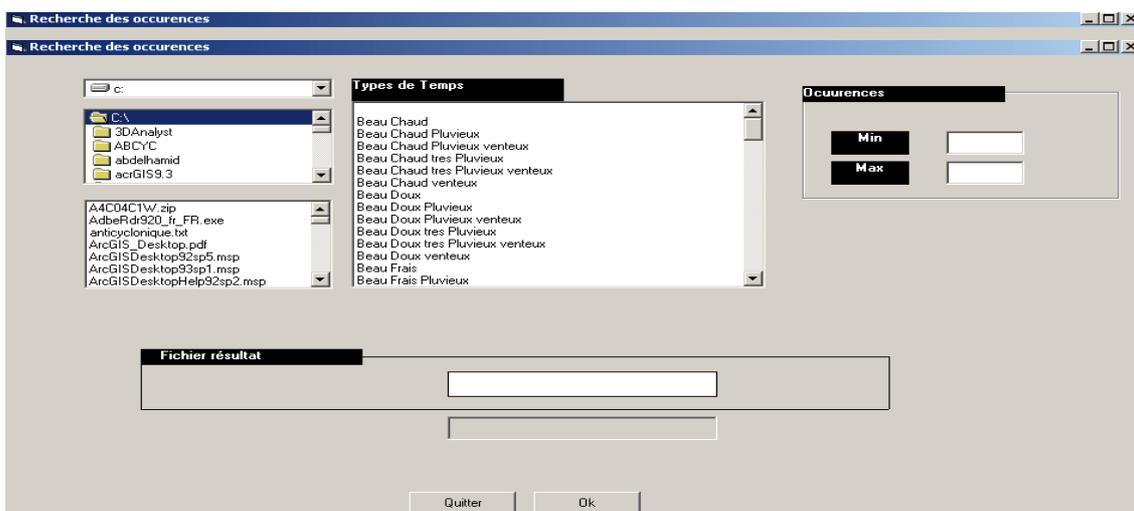


Figure 4.4.3. Interface graphique du logiciel TTSR : recherche des occurrences (Bensaïd *et al.*, 2010).

4.4.3. Exemples de résultats

Le module de classification simplifiée des *types de temps* permet d'accéder à une vue d'ensemble de l'enchaînement des séquences atmosphériques, en fonction du recoupement de quatre principales composantes météo-climatiques (ensoleillement, température, précipitations et vent), elles-mêmes subdivisées en 2, 3 ou 4 niveaux (Tab. 4.4.2.).

INSOLATION		TEMPERATURE		PRECIPITATIONS		VENT	
SIGMA (% insolation)		TM (temp. Moyenne)		RR (précipitations)		FXI (rafales maximale)	
identif.	classe	identif.	classe	identif.	classe	identif.	classe
G	<20%	K	<4°C	-	<1mm	-	<16m/s
N	[20% ; 50%[	F	[4°C ; 12°C[	P	[1mm ; 10mm[	W	>=16m/s
V	[50% ; 80%[	D	[12°C ; 20°C]	R	>=10mm		
B	>=80%	C	>=20°C				

Tableau 4.4.2. La classification simplifiée des types de temps en France. Détermination des 96 combinaisons possibles à partir de 4 paramètres du temps sensible décomposés en 2, 3 ou 4 niveaux ($96 = 4 \times 4 \times 3 \times 2$) (Bensaïd *et al.*, 2010).

La suite de quatre lettres traduit les principaux paramètres du temps sensible. Par exemple, le code « B C - - » correspond au « beau temps chaud », c'est-à-dire à la combinaison d'une fraction d'insolation élevée ($\geq 80\%$) et d'une température moyenne agréable ($T_x \geq 20^\circ\text{C}$), sans pluie significative ($RR < 1 \text{ mm}$) et sans forte rafale de vent ($FXI < 16 \text{ m/s}$). Pour la station de Caen, entre 1951 et 2008, cette combinaison est très rare (174 j en 57 ans, soit 0,8%), conformément à l'appartenance de cette région au climat océanique, marqué par une nébulosité fréquente et des températures rafraîchies par la proximité des eaux de la Manche en période estivale (Fig. 4.4.4.).

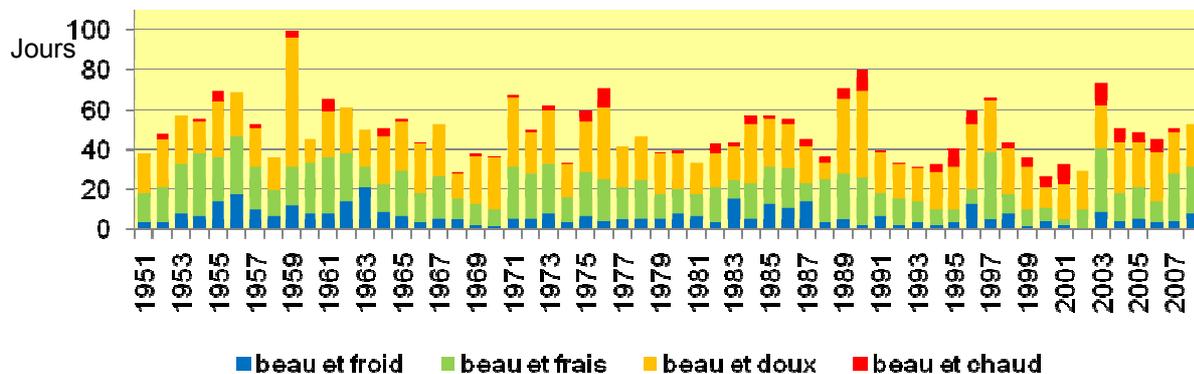


Figure 4.4.4. Le « beau temps » en Normandie et la faible occurrence du « beau temps chaud » entre 1951 et 2008 (Bensaïd *et al.*, 2010).

A partir de requêtes personnalisées (voir seuils choisis sous les figures), la diversité du climat en France peut être aussi matérialisée sous forme de chroniques. Ci-dessous, par exemple, la comparaison du « beau temps » et du « mauvais temps » à Caen et Marseille en 2008 (Fig. 4.4.5.). Ces quatre « codes barres » confirment clairement une appartenance à des climats bien différenciés, tant en terme de fréquence que de saisonnalité...

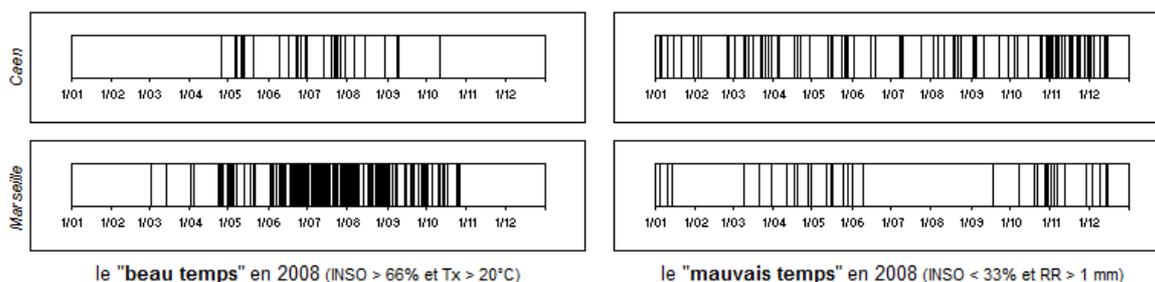


Figure 4.4.5. L'occurrence du « beau temps » et du « mauvais temps » à Caen et Marseille en 2008 (Bensaïd *et al.*, 2010).

Il est également possible de procéder à une analyse comparative de la fréquence de tous les *types de temps* observés sur une période donnée (tableau 3). En prenant l'état du ciel comme facteur discriminant principal, les dominantes climatiques régionales apparaissent clairement : le « beau temps » caractérise logiquement le domaine méditerranéen (50,4% contre 17,8% dans l'Est du pays et seulement 13,6% à l'Ouest). Il convient toutefois de nuancer cet aspect positif par la fréquence des vents forts typiques des régions méditerranéennes (code avec W en quatrième position = 15,4%). Les temps gris et nuageux sont eux l'apanage des régions océaniques de l'Ouest (64,1%) et continentales de l'Est (65,7%).

	BEAU TEMPS				TEMPS VARIABLE				TEMPS NUAGEUX				TEMPS GRIS		
	Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.
BC--	0.8%	3.7%	14.2%	VC--	1.0%	3.4%	5.1%	NC--	0.9%	2.1%	2.3%	GC--	0.1%	0.4%	0.5%
BCP-	0.1%	0.1%	0.1%	VCP-	0.4%	0.5%	0.3%	NCP-	0.2%	1.4%	0.4%	GCP-	0.1%	0.5%	0.2%
BCPW		0.1%	0.1%	VCPW	0.1%	0.3%	0.2%	NCPW	0.2%	0.4%	0.3%	GCPW			0.1%
BCR-				VCR-	0.1%	0.1%	0.1%	NCR-	0.1%	0.2%	0.1%	GCR-		0.1%	0.1%
BCRW	0.1%			VCRW		0.1%	0.1%	NCRW		0.1%	0.1%	GCRW			0.1%
BC-W			5.8%	VC-W		0.1%	1.5%	NC-W		0.1%	0.8%	GC-W	0.1%	0.1%	0.1%
BD--	6.0%	6.7%	10.1%	VD--	8.1%	5.6%	6.2%	ND--	8.0%	5.3%	3.6%	GD--	6.0%	4.2%	2.3%
BDP-	0.1%	0.1%	0.1%	VDP-	0.8%	0.5%	0.1%	NDP-	3.1%	2.5%	0.4%	GDP-	4.4%	6.0%	1.2%
BDPW	0.1%			VDPW	0.4%	0.1%	0.2%	NDPW	1.3%	0.5%	0.2%	GDPW	1.4%	0.4%	0.6%
BDR-			0.1%	VDR-	0.1%	0.1%	0.1%	NDR-	1.1%	0.3%	0.1%	GDR-	1.4%	1.9%	1.0%
BDRW				VDRW		0.1%	0.1%	NDRW	0.3%	0.1%	0.1%	GDRW	0.3%	0.2%	0.9%
BD-W			4.7%	VD-W	0.4%	0.1%	1.6%	ND-W	0.6%	0.6%	0.6%	GD-W	0.6%	0.5%	0.5%
BF--	4.9%	4.7%	8.5%	VF--	5.7%	2.8%	3.6%	NF--	4.6%	4.9%	2.8%	GF--	7.3%	7.5%	2.3%
BFP-		0.1%		VFP-	1.3%	0.2%	0.1%	NFP-	2.1%	1.3%	0.3%	GFP-	3.6%	5.8%	1.4%
BFPW				VFPW	0.9%	0.2%	0.3%	NFPW	2.1%	0.7%	0.1%	GFPW	3.8%	1.4%	0.5%
BFR-			0.1%	VFR-			0.1%	NFR-	0.3%			GFR-	0.8%	0.5%	0.2%
BFRW			0.1%	VFRW	0.1%			NFRW	0.1%		0.1%	GFRW	1.0%	0.1%	0.3%
BF-W	0.2%		4.0%	VF-W	0.9%	0.3%	2.5%	NF-W	0.8%	0.3%	0.5%	GF-W	1.2%	0.8%	0.8%
BK--	1.4%	2.3%	1.6%	VK--	1.9%	2.1%	0.4%	NK--	1.1%	2.3%	0.2%	GK--	2.5%	7.7%	0.3%
BKP-		0.1%	0.1%	VKP-	0.1%	0.1%		NKP-	0.6%	0.3%		GKP-	1.3%	2.8%	0.1%
BKPW				VKPW			0.1%	NKPW	0.1%	0.1%		GKPW	0.2%	0.1%	
BKR-				VKR-				NKR-				GKR-	0.2%	0.1%	
BKRW				VKRW				NKRW	0.1%			GKRW		0.1%	
BK-W	0.1%		0.7%	VK-W			0.3%	NK-W		0.2%		GK-W		0.2%	
total	13.6%	17.8%	50.4%	total	22.3%	16.8%	22.9%	total	27.7%	23.8%	13.0%	total	36.4%	41.7%	13.7%

Tableau 4.4.3. Comparaison de la fréquence annuelle des types de temps à Caen, Strasbourg et Marseille entre 2005 et 2008, par croisement de 4 paramètres du temps sensible. Légende : en blanc : absence de cas ; en grisé clair : [0,1% ; 2,9%] ; en grisé moyen : [3,0% ; 7,4%] ; en noir : $\geq 7,5\%$ (Bensaïd *et al.*, 2010).

Un découpage saisonnier permet alors de mieux cerner les configurations synoptiques responsables de ces caractères tranchés (tableau 4). Alors que le « beau temps » est très présent à Marseille en toutes saisons, surtout l'été quand règnent les hautes pressions subtropicales sur le domaine méditerranéen (BC-- + BC-W = 62%), la grisaille des plaines de l'Est est principalement la marque des temps stables de la période froide en Alsace et pour la Normandie des temps calmes et froids ou perturbés cycloniques. Ces tableaux permettent également d'apprécier la variabilité du temps par le nombre de types différents (ligne *nb TT*) : à Marseille, sur 96 combinaisons possibles seules 73 se sont réellement produites, avec seulement 25 présentes en été contre 50 en automne. A Strasbourg, *a contrario*, les valeurs sont identiques en été et en automne (38 types) mais le contraste apparaît net entre les persistances hivernales (30) et les fréquentes sautes printanières (51).

PRINTEMPS 2005-2008				ETE 2005-2008				AUTOMNE 2005-2008				HIVER 2005-2008				ANNEE 2005-2008			
	Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.		Caen	Stras.	Mars.
BD--	4%	13%	19%	BC--	2%	12%	44%	BD--	6%	6%	19%	GK--	9%	25%	1%	BD--	6%	7%	10%
VD--	7%	7%	13%	BC-W	0%	0%	18%	GF--	5%	12%	1%	BF--	4%	4%	24%	VD--	8%	6%	6%
BD-W	0%	0%	10%	VD--	16%	7%	1%	ND--	10%	9%	5%	GF--	16%	12%	7%	BF--	5%	5%	8%
VF--	10%	4%	3%	ND--	15%	9%	1%	VD--	10%	8%	9%	GFPW	10%	4%	1%	BC--	1%	4%	14%
ND--	7%	3%	7%	VC--	4%	11%	14%	NF--	5%	9%	1%	VF--	5%	3%	10%	ND--	8%	5%	4%
BF--	8%	8%	4%	BD--	14%	8%	1%	BC--	1%	1%	9%	BF-W	1%	0%	9%	GF--	7%	8%	2%
GDP-	4%	8%	2%	GDP-	9%	11%	0%	BF--	6%	7%	5%	GFP-	4%	8%	4%	GDP-	4%	6%	1%
GFP-	5%	8%	1%	GD--	11%	6%	0%	GD--	9%	7%	4%	NF--	6%	6%	8%	GD--	6%	4%	2%
GF--	8%	6%	1%	NDP-	8%	6%	0%	GDP-	5%	4%	2%	BK--	4%	7%	6%	NF--	5%	5%	3%
NF--	8%	4%	2%	NC--	3%	5%	4%	VF--	7%	5%	2%	GKP-	3%	7%	0%	VF--	6%	3%	4%
%	60%	61%	61%	%	81%	76%	84%	%	63%	68%	57%	%	64%	77%	71%	%	56%	51%	55%
<i>nb TT</i>	43	51	44	<i>nb TT</i>	33	38	25	<i>nb TT</i>	46	38	50	<i>nb TT</i>	32	30	36	<i>nb TT</i>	65	69	73

Tableau 4.4.4. Fréquence des 10 principaux types de temps par saison et à l'année sur la France entre 2005 et 2008. Légende : en blanc [0% ; 4,9%] ; en grisé [5% ; 14,9%] ; en noir >= 15% (Bensaïd *et al.*, 2010).

4.4.4. Conclusion

Par sa capacité à traiter rapidement d'importants volumes de données et par la possibilité de sélectionner et/ou de définir simplement ses propres requêtes, le logiciel TTSR apparaît comme un outil susceptible d'appréhender, selon différentes thématiques, la dimension atmosphérique des atouts et des contraintes en chaque lieu. De plus, sa conception fondée sur la technique des doubles prototypages n'est pas rigide : l'introduction de nouveaux paramètres à partir d'un fichier de données brutes et l'incorporation d'autres fonctionnalités sont toujours possibles. A moyen terme, à partir des techniques du web mapping, nous souhaitons développer cet outil pour l'établissement de cartes dynamiques des risques météorologiques pour toute la région Ouest, puis à l'échelle de la France.

4.4.5. Publications

Bensaïd, A., Cantat, O., Saint-Gerand, T., Savouret, E., 2010 : Conception et réalisation d'un logiciel pour la détermination automatique des types de temps. *Actes du 23^{ème} colloque de l'AIC*, Rennes (1-3 septembre), 71-76.

Autres références citées

Bédard, Y., Prince, J., 1989 : Information engineering for the development of spatial information systems. *Conférence nationale sur les SIG*. Ottawa, Canada, 2009.

Bensaïd, A., 2006 : *SIG et télédétection pour l'étude de l'ensablement dans une zone aride : le cas de la wilaya de Naâma (Algérie)*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble 1, France, 318 p.

Carrega, P., 2004 : Avant-propos sur les types de temps. *Norois*, 191, 17-28.

Douguedroit, A., 2004 : Quelle exception française en matière de « types de temps » ? *Norois*, 191, 33-39.

Durand-Dastès, F., 1973 : A propos des notions de types de temps et de types de circulation. Note rédigée à la suite des discussions de la commission de climatologie du CNG, 4p. (publiée dans *Norois*, 191, 29-32).

Fadil, A., 2004 : *Visual Basic 6, les bases du développement*. Paris : Ellipses Editions, 304 p.

Mounier, J., 1977 : Le type de temps un choix pour le géographe : climatologie synoptique ou climatologie compréhensive. *Cahiers du Centre de Climatologie de Dijon*, 7, 99-117.

Pédélaborde, P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien*. Paris, Génin, 539 p. et atlas 232 p.

Vigneau, JP., 2004 : Un siècle de types de temps : épistémologie d'un concept ambigu. *Norois*, 191, 17-28.

5. Conclusion Générale

Soutenu par la Fondation MAIF pour la période 2008-2010, le programme consacré à l'étude des « *risques climatiques liés aux changements en cours dans la dynamique des masses d'air sur l'Europe Occidentale* » s'est inscrit plus précisément dans le contexte géographique du grand Ouest français, élargi à d'autres régions non méditerranéennes selon les cas étudiés de façon la plus détaillée, permettant ainsi des interactions et complémentarités avec d'autres programmes de recherches sur des problématiques voisines. Le choix des espaces étudiés et des points de mesures retenus (stations météorologiques en particulier) a été fixé aussi, bien entendu en fonction des données disponibles, mais aussi de l'intérêt de certaines stations pour des comparaisons inter-régionales.

L'objet de ce programme était de proposer une approche des risques climatiques fondée sur l'évolution des enchaînements des masses d'air depuis la fin du XIX^{ème} siècle, et analysée au moyen de la classification des types de circulations atmosphériques de Hess-Brezowsky. (version *objective* développée par P. James au *Met-Office*, Royaume-Uni). L'étude des types de circulations (identification, fréquence, évolution) générant les situations à risques a été menée en vue d'obtenir une régionalisation de ces risques. Les risques hydro-climatiques étudiés ont été les suivants :

- Précipitations / crues-inondations ;
- Gelées tardives (régions viticoles) ;
- Sécheresses.

Durant la première année d'existence du programme (2008-2009), L'effort de recherche s'est concentré sur l'analyse statistique des types de circulations et leurs effets, en termes de fréquence et d'intensité, sur les éléments climatiques sélectionnés à des périodes récentes, (puis quelques premiers essais sur des périodes séculaires : sécheresses) et à des échelles spatiales régionales et locales. Cette première partie du programme a donc permis de tester et vérifier la validité de la méthode de classification de Hess-Brezowsky sur les régions de l'Ouest de la France. Les quelques problèmes rencontrés, d'ordre méthodologique (adéquation entre les pas de temps : crues lentes et sécheresses) ont été bien identifiés et commentés, mais ces analyses demanderaient à être refaites dans d'autres cadres de recherches.

La deuxième étape du programme (2009-2010) a été consacrée à l'étude de la variabilité des types de circulations, sur la période totale disponible dans le catalogue des GWL produit par P. James (1850-2009). Quelques tendances statistiquement significatives sur la série 1850-2009 ont été observées au pas de temps saisonnier, mais si l'on ampute la série de ses 50 premières années, certaines de ces tendances se maintiennent tandis que d'autres ne sont plus détectées ou d'autres apparaissent. Ceci a montré la nécessité d'étudier les séries les plus longues possibles, puisque certaines tendances ont été décelées très tôt dans la série des GWL. Les tendances ont été observées aussi bien sur des situations faiblement que fortement représentées et peuvent donc avoir des impacts différents.

D'autre part, des oscillations irrégulières dans l'évolution de la fréquence des types de circulations permettent d'identifier des groupes d'années avec des caractéristiques particulières. Les résultats produits au cours de cette deuxième étape du programme nous ont amenés à nous demander si la fréquence et/ou l'intensité d'un type d'impact climatique lié à un type de circulation donné a pu varier au cours de la période d'étude.

La troisième et dernière étape du programme (2010-2011) a donc eu pour objectif de répondre à cette dernière question, tout en essayant de spatialiser les évolutions. L'analyse des impacts thermiques et pluviométriques des types de circulations atmosphériques a été effectuée sur un type de circulation principal ou GWL (circulations de Sud en hiver) et sur trois types de circulations individuels ou GWL (WW en hiver, HNFZ au printemps et NA en été), pour lesquels les analyses statistiques ont permis de détecter les tendances les plus significatives, avec des dates de rupture permettant la comparaison de stations (Rennes et Genève) pour lesquelles des longues séries de données quotidiennes de températures minimales (TN), de températures maximales (TX) et de précipitations étaient disponibles. Les séries de données plus récentes (depuis 1950) de quatre stations du Val de Loire ont aidé à affiner la spatialisation des impacts climatiques.

Si certains types de circulations influent différemment sur certains éléments climatiques entre le début et la fin du XX^{ème} siècle, les évolutions ne sont pas toujours significatives. De plus, la comparaison de la variabilité des impacts entre Rennes et Genève montre que, de part et d'autre de la France centrale, ces stations réagissent, selon les éléments climatiques analysés et les types de circulations étudiés, soit en phase (précipitations), soit différemment (température, avec plus forte variabilité à Genève), en fonction d'une part de leur position en longitude par rapport aux centres d'action et d'autre part du poids de la continentalité. La prise en compte dans l'analyse de quatre stations supplémentaires dans les régions du Centre-Ouest fait ressortir une homogénéité climatique d'ensemble, mais aussi certains gradients spatiaux liés à la continentalité, modulés par certains caractères climatiques locaux (en particulier à Saumur et à Romorantin).

Ainsi, malgré l'échelle spatiale large (synoptique) prise en compte par les GWL, la différenciation des impacts fait ressortir le poids de certains facteurs locaux, faisant intervenir le rôle des états de surface (topographie, occupation du sol, nature du substratum...) et leurs interactions complexes avec la couche limite atmosphérique.

Le problème des facteurs locaux du climat s'est posé à toutes les étapes de ce programme, et la synthèse des travaux spécifiques à cette préoccupation a été rappelée en dernière partie du présent rapport. Plusieurs pistes de recherche ont été explorées afin de trouver la (ou les) meilleure(s) connexion(s) possible(s) entre les types de circulations atmosphériques d'échelle synoptique (GWL) et leurs impacts climatiques en tenant compte des facteurs locaux. Ces recherches ont portées (et portent toujours) sur les sécheresses, la climatologie appliquée à l'échelle des terroirs viticoles et les types de temps.

Ainsi, des méthodes et outils ont été développées, ou sont en cours de développement et d'utilisation sur ces problématiques :

- modélisation spatiale à fine résolution des bilans hydriques (prise en compte de la diversité des sols et du relief à l'échelle de la parcelle), pour l'étude des sécheresses et de leurs impacts au niveau d'échelle local ;
- modélisation numérique à méso-échelle (intégrant les faits de circulation atmosphérique à différentes échelles) et modélisation géostatistique (développée au moyen d'un S.I.G.), pour l'étude des régions et terroirs viticoles ;
- réalisation d'un logiciel pour la détermination automatique des types de temps baptisé « *Types de Temps Sensibles et à Risques* » (TTSR). Cet outil pourrait être développé pour l'établissement de cartes dynamiques des risques météo-climatiques pour toute la région Ouest, puis à l'échelle de la France.

Le développement de ces outils et leur application met en jeu et produit une masse considérable de données incluant en particulier des mesures de terrain, pour lesquelles l'installation de réseaux de mesures ou les prélèvements in-situ, puis la collecte, implique une

veille permanente. Ces travaux prenant en compte le rôle des facteurs locaux du climat sont donc toujours en cours de développement. D'autre part, ils permettent de resserrer le lien avec le monde agricole déjà engagé grâce aux interactions entre le programme « *Dynamique des masses d'air et risques climatiques* » et les programmes CLIMASTER et TERVICLIM. Le programme CLIMASTER, dont les travaux portent sur quatre régions de l'Ouest de la France (Basse-Normandie, Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes), est entré dans sa dernière année en 2011. Le programme TERVICLIM s'achève aussi cette année, mais est dès à présent relayé par le programme **GICC-TERADCLIM** (2011-2013) : « *Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles* », qui poursuit et élargit le cadre international du précédent.

L'intégration, dans ce programme, des travaux sur les types de circulations et de temps, constitue un projet majeur pour les années à venir, combinant deux problématiques :

- interaction types de circulations / types de temps permettant de renouveler la question déjà ancienne des *saisons naturelles* et les *normes intra-saisonnières* (*singularities* des climatologues britanniques ; *Regelfälle* des climatologues allemands) ;
- étude combinée de la variabilité des types de circulations et de temps dans le contexte des oscillations climatiques contemporaines et du changement climatique.

Malgré le problème posé récemment par l'interdiction, de la part du Met-Office, d'utiliser la version objective de la classification de Hess-Brezowsky, ce projet pourra être engagé en réutilisant la méthode Hess-Brezowsky d'origine dont le catalogue des GWL est, non seulement, toujours diffusé en accès libre par le *Potsdam Institut für Klimafolgenforschung* (PIK), mais a aussi été récemment mis à jour jusqu'en 2009 :

<http://www.pik-potsdam.de/research/publications/pikreports/.files/pr119.pdf>