



Section Etudes et Climatologie

BP 49139
35091 RENNES Cedex 9

Réalisation :

Karine BELLEGUIC
Catherine CONSEIL
Thierry EVENO
Sébastien LORGE
et Franck BARAER



*Etude réalisée
par Météo-France
pour
le Conseil Régional
de Bretagne*

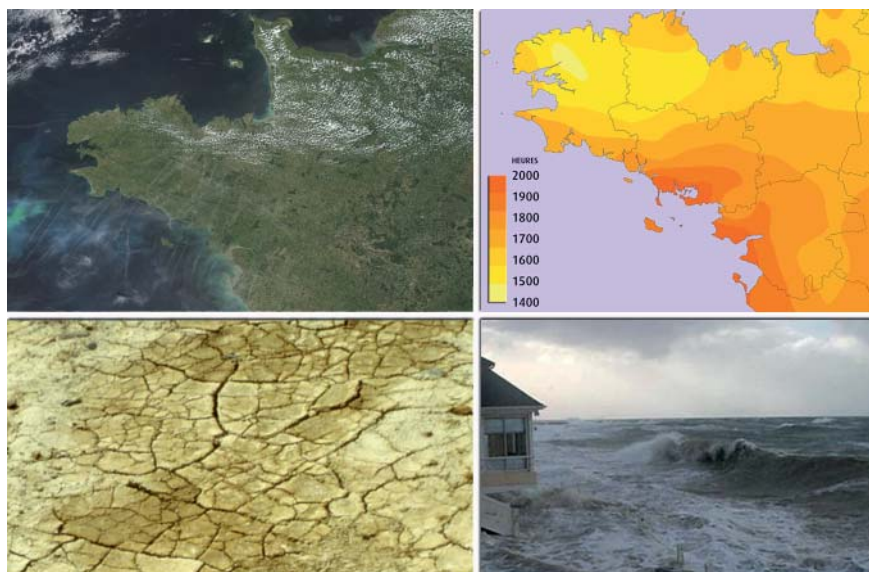
Le **CHANGEMENT CLIMATIQUE** en **BRETAGNE**

PARTIE I

Le climat actuel

PARTIE II

L'histoire récente du climat breton



PARTIE III

Le changement climatique Global

PARTIE IV

Quel climat futur en Bretagne ?

Mars 2012

Table des matières

Table des matières.....	1
1. Climatologie de la Bretagne	3
1.1. Géographie physique et effets sur le climat.....	3
1.2. Précipitations	4
1.2.1. Répartition spatiale	4
1.2.2. Variabilité interannuelle	5
1.2.3. Nature des précipitations	6
1.3. Températures.....	7
1.3.1. Variations diurnes.....	7
1.3.2. Répartition spatiale	8
1.3.3. Variabilité interannuelle	9
1.4. Vent	10
1.4.1. Le phénomène de brises	11
1.4.2. Variabilité spatiale	12
1.4.3. Le vent en Bretagne par rapport à l'Europe de l'ouest	13
1.4.4. Mise en évidence du gisement éolien	14
1.4.5. Variabilité du vent sur 30 ans	14
1.5. Insolation et Rayonnement	15
1.5.1. Variabilité mensuelle.....	15
1.5.2. Variabilité interannuelle	16
1.5.3. Le rayonnement global : quelques chiffres sur le gisement solaire	16
2. Histoire récente du climat breton et évènements extrêmes	17
2.1. Introduction.....	17
2.2. Premiers relevés météorologiques bretons et constitution des séries climatologiques	19
2.3. Évolution des températures	21
2.3.1. Evolution générale.....	21
2.3.2. Les épisodes de froid	24
2.3.3. Les épisodes de fortes chaleurs.....	25
2.4. Évolution des pluies.....	27
2.4.1. Evolution générale des précipitations	27
2.4.2. Les périodes de sécheresse	29
2.4.3. Les inondations.....	30
2.5. Quelques événements extrêmes	32
2.5.1. Les orages.....	32
2.5.2. Les tempêtes	34
2.5.3. Les submersions marines et fortes vagues	36
2.5.4. Neige et verglas	38
3. Le changement climatique global	40
3.1. L'évolution du climat global	41
3.1.1. Le lien avec les gaz à effet de serre (GES).....	41
3.1.2. Evolution récente du climat du globe	43
3.1.3. Evolution récente du climat en France	45
3.1.4. La part des Gaz à Effet de Serre	46
3.2. Des impacts déjà visibles	47
3.2.1. Températures de l'atmosphère et de l'océan	47
3.2.2. Le niveau des océans	48

3.2.3. Le recul de la banquise	49
3.2.4. Neige et glaciers	49
3.2.5. Phénomènes climatiques.....	50
3.2.6. Les écosystèmes	51
3.2.7. La santé.....	51
3.2.8. Les pratiques agricoles	51
3.2.9. Résumé des principales conséquences.....	52
3.3. <i>Le réchauffement climatique et la Bretagne</i>	53
3.3.1 Caractéristiques fondamentales	53
3.3.2. Variabilité temporelle et spatiale	54
3.4. <i>Les modèles de climat et leurs incertitudes</i>	56
3.4.1. Les modèles climatiques.....	56
3.4.2. Le GIEC et les scénarios	57
3.4.3. Vers de nouveaux scénarios.....	61
3.4.4. Les limites des modèles	61
4. Quel climat futur en Bretagne : régionalisation des résultats des simulations climatiques.....	63
4.1. Rappel de la méthode des « Deltas » utilisée dans le cadre de l'étude Datar	63
4.2. Analyse des résultats	66
4.3. Effets attendus sur la température.....	68
4.4. Effets attendus sur les pluies	69
4.4.1. Contexte.....	69
4.4.2. Le projet SCAMPEI	70
4.5. Incertitude sur les autres effets attendus	72
4.6. Les progrès de la modélisation attendus ces prochaines années	73
5. Conclusion générale	74

Annexe : planches de simulations ARPEGE climat
Glossaire

1. Climatologie de la Bretagne

1.1. GEOGRAPHIE PHYSIQUE ET EFFETS SUR LE CLIMAT

La Bretagne, bordée par la Manche au nord et l'océan Atlantique à l'ouest et au sud, est sous l'influence d'un régime « océanique tempéré ».

Ses 2 730 kilomètres de côtes représentent un tiers du linéaire côtier de la France métropolitaine.

En son centre, le Massif Armoricaïn est un vestige érodé de montagnes hautes de 2 000 à 3 000 mètres il y a 300 millions d'années.

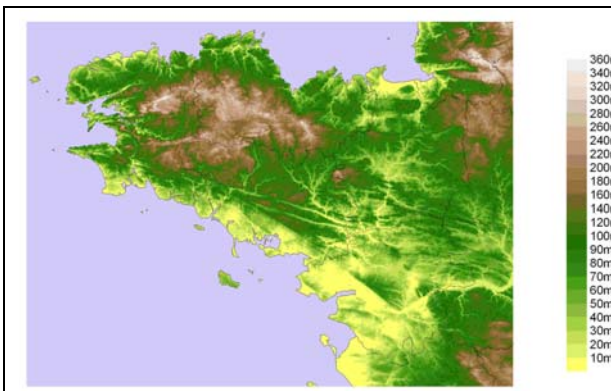


Figure 1.1 :
relief de la Bretagne

Au nord, les Monts d'Arrée culminent avec les « rocs » à l'ouest (Roc'h Ru – 385 m, Roc'h Trévél, Tuchen Cador – 384 m, Roc'h Trédudon – 383 m) et s'étendent jusqu'au Menez Bré (302 m). Ils sont prolongés vers l'est par les Monts du Méné (Mont du Bel-Air – 339 m).

Plus au sud, les Montagnes Noires s'étendent de leur point le plus élevé (330 mètres), le Menez Hom, jusqu'aux environs de Glomel.

La présence de l'océan et la position particulière de la péninsule bretonne sur le rail des perturbations lui confèrent un ciel changeant, des températures douces, une certaine humidité, des pluies généreuses et des vents souvent soutenus. Cependant, la description de son climat est plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord.

Des contrastes importants apparaissent en effet sur la répartition des températures, des précipitations, du vent ou de la durée d'insolation. Des phénomènes d'échelles différentes en sont la cause :

- à grande échelle, on observe une influence océanique de moins en moins forte à mesure qu'on se déplace vers l'est ;
- une différence Nord-Sud joue également, surtout pour les paramètres liés à l'insolation et aux températures ;
- à échelle plus fine, l'effet côtier se fait sentir sur le littoral et les îles et celui du relief sur les collines des Monts d'Arrée et des Montagnes Noires.

1.2. PRECIPITATIONS

La Bretagne est sous un régime de pluies océaniques régulières dont les cumuls les plus importants sont répartis d'octobre à mars et liés aux passages de perturbations venant de l'Atlantique. Celles-ci génèrent des pluies régulières aux passages des fronts, de faibles bruines et crachins dans les zones de secteurs chauds et des précipitations plus irrégulières sous forme d'averses, parfois orageuses, dans les zones de traîne. En période estivale, la trajectoire de ces perturbations est décalée vers le nord. Celles-ci sont moins nombreuses, atténuées et les pluies sont plus souvent instables et orageuses.

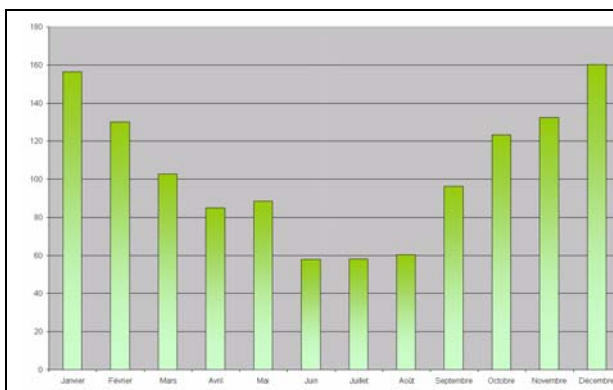


Figure 1.2 :
précipitations moyennes mensuelles à Quimper
en millimètres (normales 1971 – 2000)

1.2.1. Répartition spatiale

Le cumul annuel des précipitations varie de 600 mm dans le bassin rennais à plus de 1 600 mm au cœur des Monts d'Arrée. La partie ouest de la Bretagne est globalement plus arrosée, les zones vallonnées l'étant par ailleurs bien plus que le littoral. Cette répartition spatiale des précipitations est valable quelle que soit la période de l'année étudiée : année complète, période hivernale propice aux recharges des cours d'eau et nappes phréatiques ou période estivale.

Les cumuls annuels sont répartis pour deux tiers sur la saison de recharge (d'octobre à mars) et pour le tiers restant sur la saison d'étiage (d'avril à septembre).

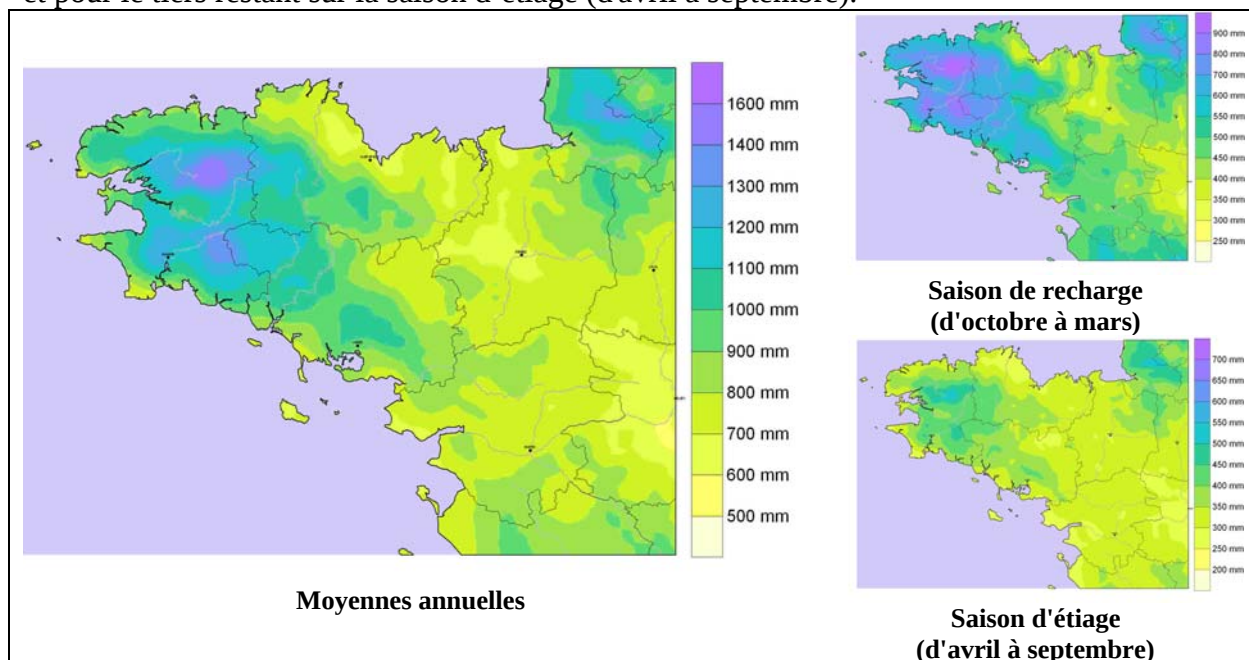


Figure 1.3 :
précipitations moyennes - Normales 1971-2000

1.2.2. Variabilité interannuelle

Les lames d'eau varient d'une année à l'autre faisant succéder aléatoirement des années très humides à des années plus sèches.

On observe beaucoup de saisons « proches de la normale » et quelques années vraiment inhabituelles.

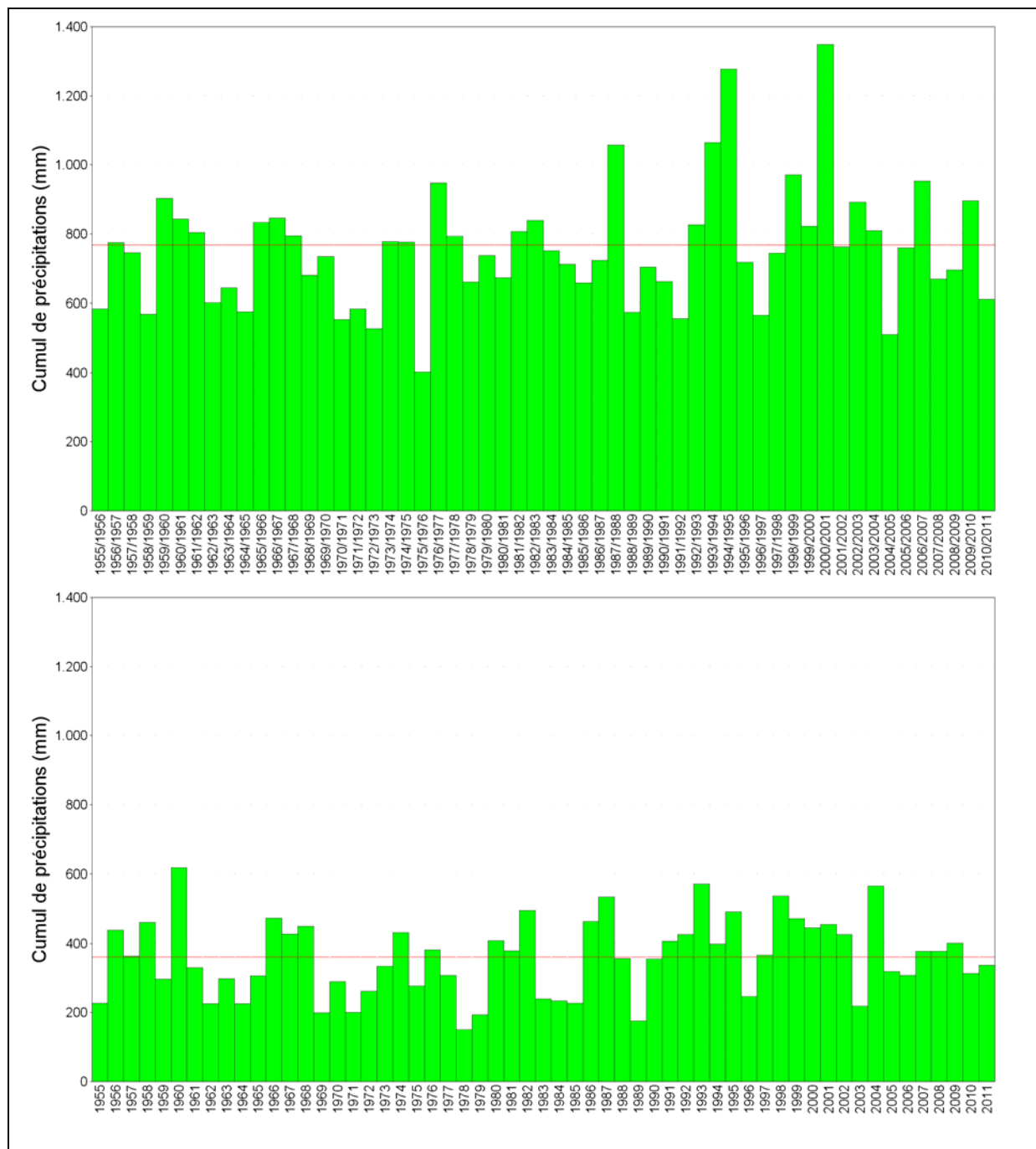


Figure 1.4 : cumuls sur la saison de recharge (en haut) ou la saison d'été (en bas) à Rostrenen depuis le début des mesures

Sur les graphiques représentant les précipitations à Rostrenen sur les saisons de recharge (d'octobre à mars) et d'été (d'avril à septembre), on remarque pour les périodes hivernales une normale voisine de 800 mm et pour les périodes estivales une moyenne approchant 400 mm (traits horizontaux rouges).

Les saisons de recharge 1994-1995 et 2000-2001 apparaissent très pluvieuses avec des excédents de l'ordre de 500 à 600 mm et la saison 1975-1976 très sèche avec un déficit de 400 mm.

Les précipitations estivales varient dans les mêmes proportions. On peut noter les étés 1978 et 1989 comme très secs avec moins de 200 mm et l'été 1960 comme très pluvieux avec plus de 600 mm.

Les phénomènes engendrant les pluies sont très différents : perturbations actives venant de l'Atlantique en hiver, zones d'averses ou perturbations atténuées pendant la période d'été.

1.2.3. Nature des précipitations

Les précipitations en Bretagne revêtent plusieurs formes. Si la pluie et la bruine en sont les plus fréquentes, le grésil et la grêle ont la part belle lors des giboulées de printemps.

Surprenant souvent la population, plutôt acclimatée aux douces pluies, la neige est pourtant régulière, en particulier dans les terres. La douceur du climat du littoral lui permet d'être plus épargné, avec des occurrences de chutes de neige ou des épaisseurs mesurées bien plus faibles.

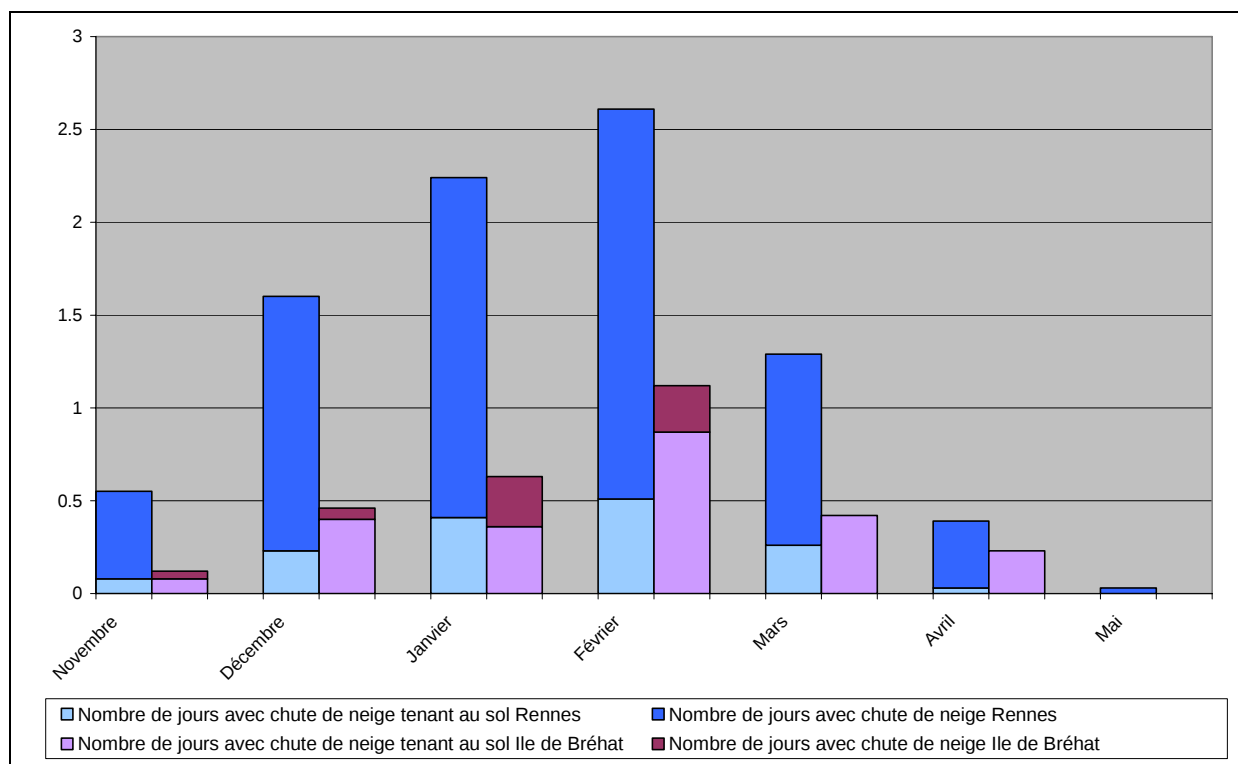


Figure 1.5 :
occurrences moyennes de neige à Rennes Saint-Jacques et à l'Île de Bréhat

1.3. TEMPERATURES

Grâce à la proximité de l'océan Atlantique et de la Manche, les températures en Bretagne sont généralement clémentes, sans excès ni de froid ni de chaleur, et cela quels que soient le moment de l'année et le lieu.

Les températures moyennes sont voisines de 7 degrés l'hiver et de 17 degrés l'été.

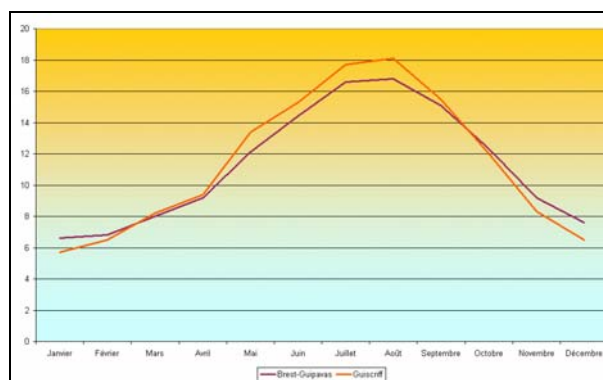


Figure 1.6 :
températures moyennes mensuelles à Brest-Guipavas (en violet) et à Guiscriff (en orange)

1.3.1. Variations diurnes

Au cours d'une même journée, la température peut rester très stable, notamment dans les périodes de temps perturbé, où se conjuguent un ciel gris et bas, un ensoleillement faible et un vent bien présent. Ceci a pour effet de limiter les variations de température liées au rayonnement. La Bretagne bénéficie par ailleurs pendant ces journées d'un apport d'air doux et humide océanique.

L'amplitude thermique quotidienne peut, en d'autres occasions, avoisiner les 15 à 20 degrés, par exemple lors de belles journées dégagées de printemps. Pendant ces périodes, les éclaircies nocturnes associées à des vents faibles ou nuls favorisent les refroidissements en fin de nuit. En journée, l'absence de nuages et de vent permet au soleil de réchauffer l'atmosphère jusqu'à des températures très agréables.

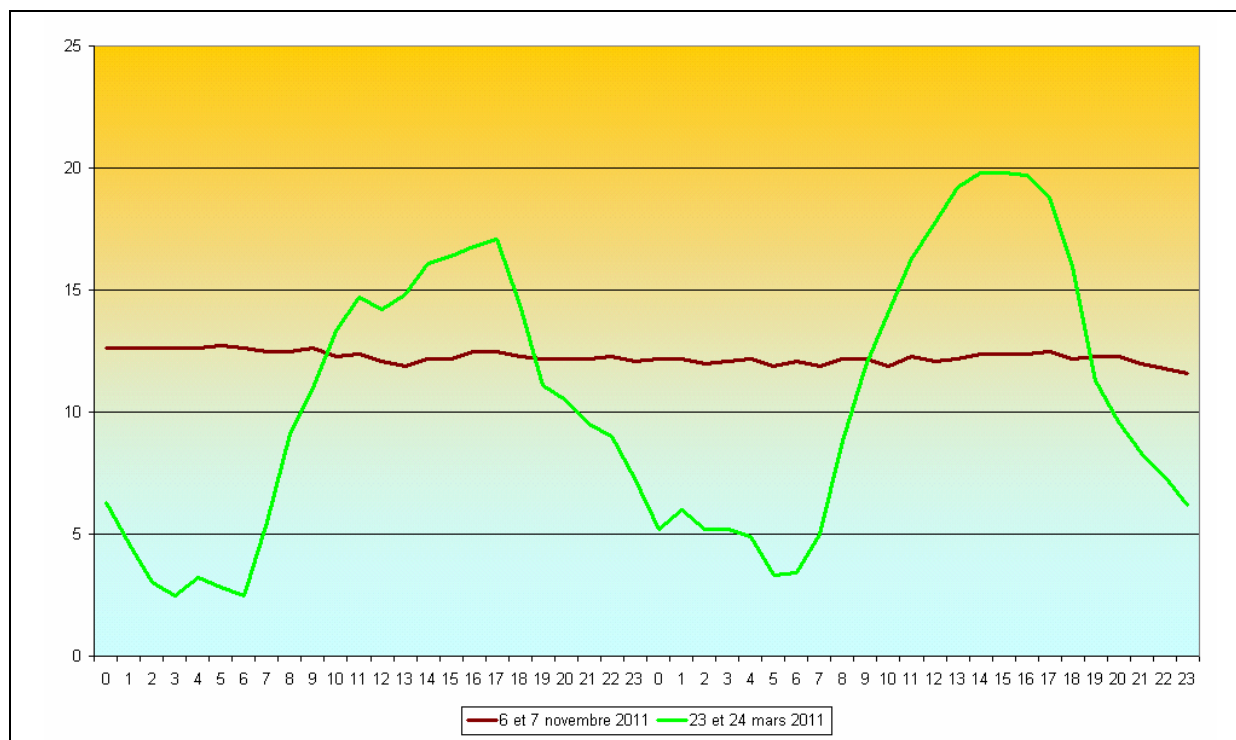


Figure 1.7 :
variation à Dinard-Pleurtuit des températures au cours d'une période ensoleillée de printemps (les 23 et 24 mars 2011) et d'une période de temps perturbé en automne (les 6 et 7 novembre 2011)

1.3.2. Répartition spatiale

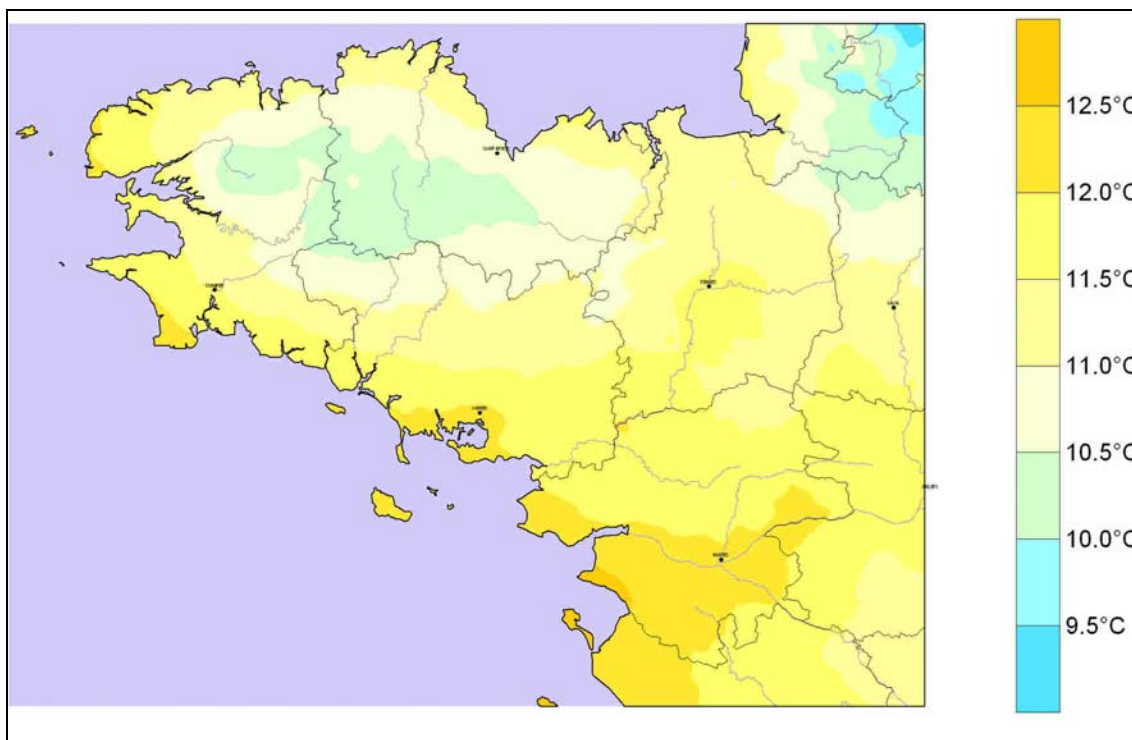


Figure 1.8.a :
températures moyennes annuelles (1971 – 2000)

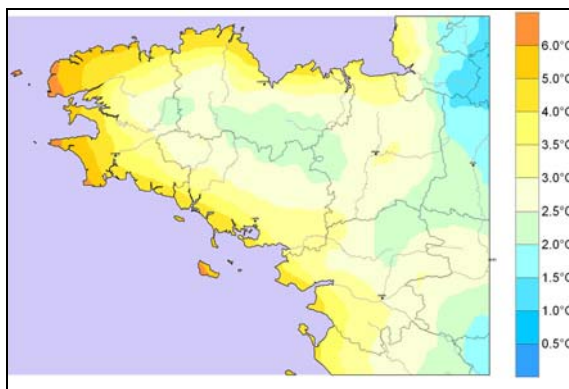


Figure 1.8.b :
moyenne des températures minimales
quotidiennes d'hiver
(1971-2000)

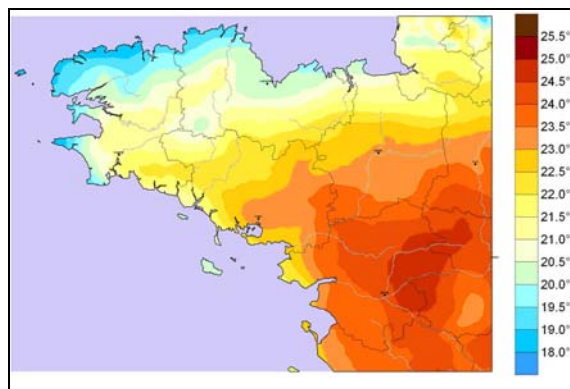


Figure 1.8.c :
moyenne des températures maximales quotidiennes
d'été
(1971-2000)

Plusieurs facteurs viennent nuancer la douceur légendaire du climat breton selon que l'on se trouve en bord de mer, dans les collines, plus près du plateau continental, au nord ou au sud de la péninsule.

L'effet côtier, d'une part, se traduit par des températures sur le littoral plus douces en hiver et plus fraîches en été (surtout sur les côtes nord et ouest).

L'effet du relief, d'autre part, se fait surtout sentir par des températures hivernales plus froides sur les Monts d'Arrée, les Montagnes Noires et les Monts du Méné.

La latitude enfin, en lien direct avec l'ensoleillement, fait croître les températures maximales quotidiennes en été à mesure qu'on se déplace vers le sud.

1.3.3. Variabilité interannuelle

Les températures bretonnes connaissent malgré tout des variations importantes d'une année sur l'autre. Si la plupart du temps, elles sont proches des normales, une vague de froid hivernale ou une vague de chaleur estivale sont possibles. Celles-ci sont toutefois d'ampleur modérée comparées à celles que peuvent connaître les régions plus continentales comme l'Alsace, le Massif Central ou le Midi toulousain par exemple.

La Bretagne a ainsi connu des hivers froids mémorables en 1954, 1963 ou plus récemment en 1985. Les étés 1976, 1989 ou 2003 restent également dans les souvenirs pour leur chaleur inhabituelle.

Aucun lien n'apparaît sur la température d'une saison à une autre. Ainsi, un hiver froid peut être suivi aléatoirement d'un été frais, proche de la normale ou chaud. De même, un été chaud n'entraînera pas une catégorie d'hiver particulière.

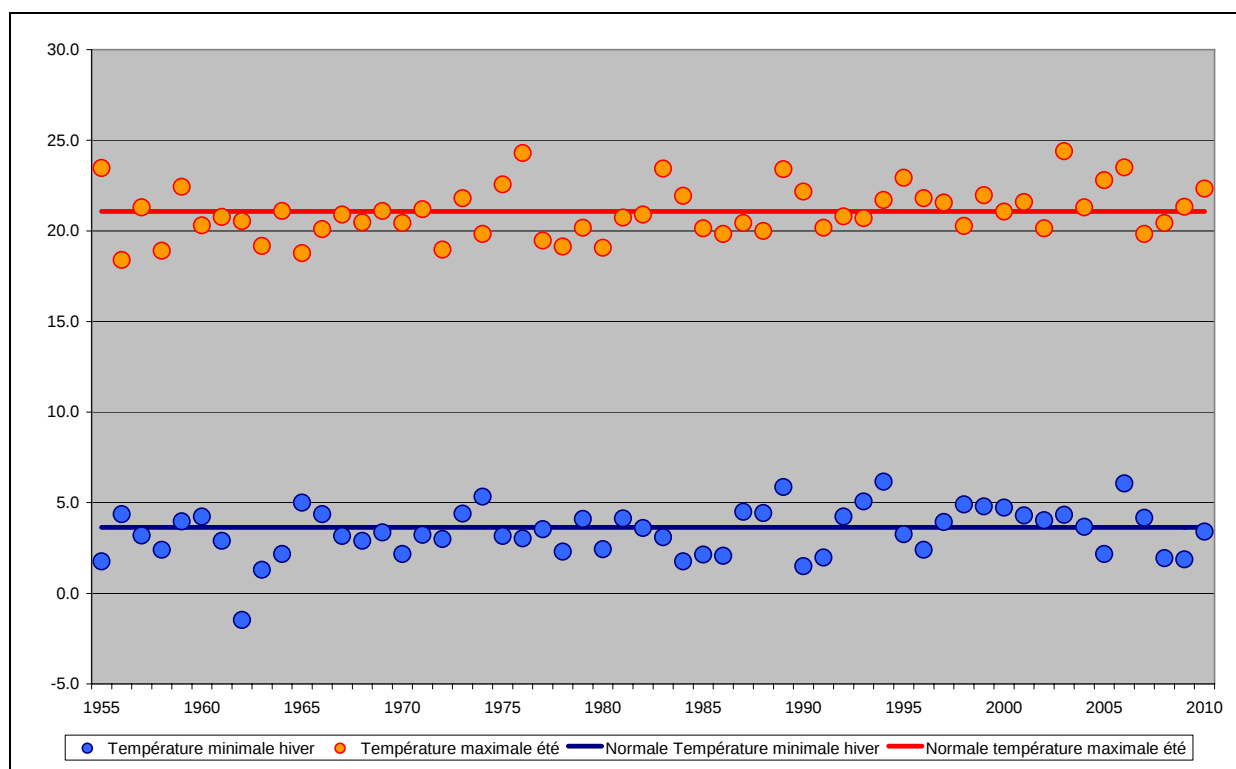


Figure 1.9 :
températures minimales en hiver et températures maximales en été à Rennes
(moyennes annuelles, données homogénéisées sur la période 1955-2010)

1.4. VENT

En Bretagne, les vents proviennent pour la plupart d'un très large secteur ouest à sud-ouest. Bien que ceux-ci soufflent toute l'année, ils sont les plus forts en période hivernale.

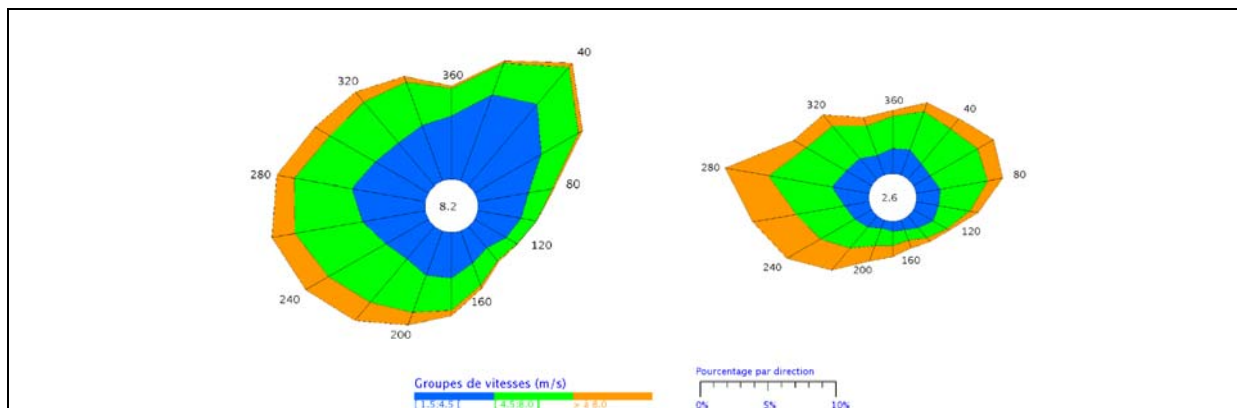


Figure 1.10 : roses des vents normales de Belle-Île (à gauche) et Quimper (à droite) – période 1981-2000

Typiquement, on observe ces vents d'ouest soutenus (sur la rose des vents : en vert les vents modérés dont le module est compris entre 4,5 et 8 m/s et en orangé les vents forts dépassant 8 m/s en force) en situation météorologique perturbée. Le schéma suivant présente la coupe verticale d'une perturbation.

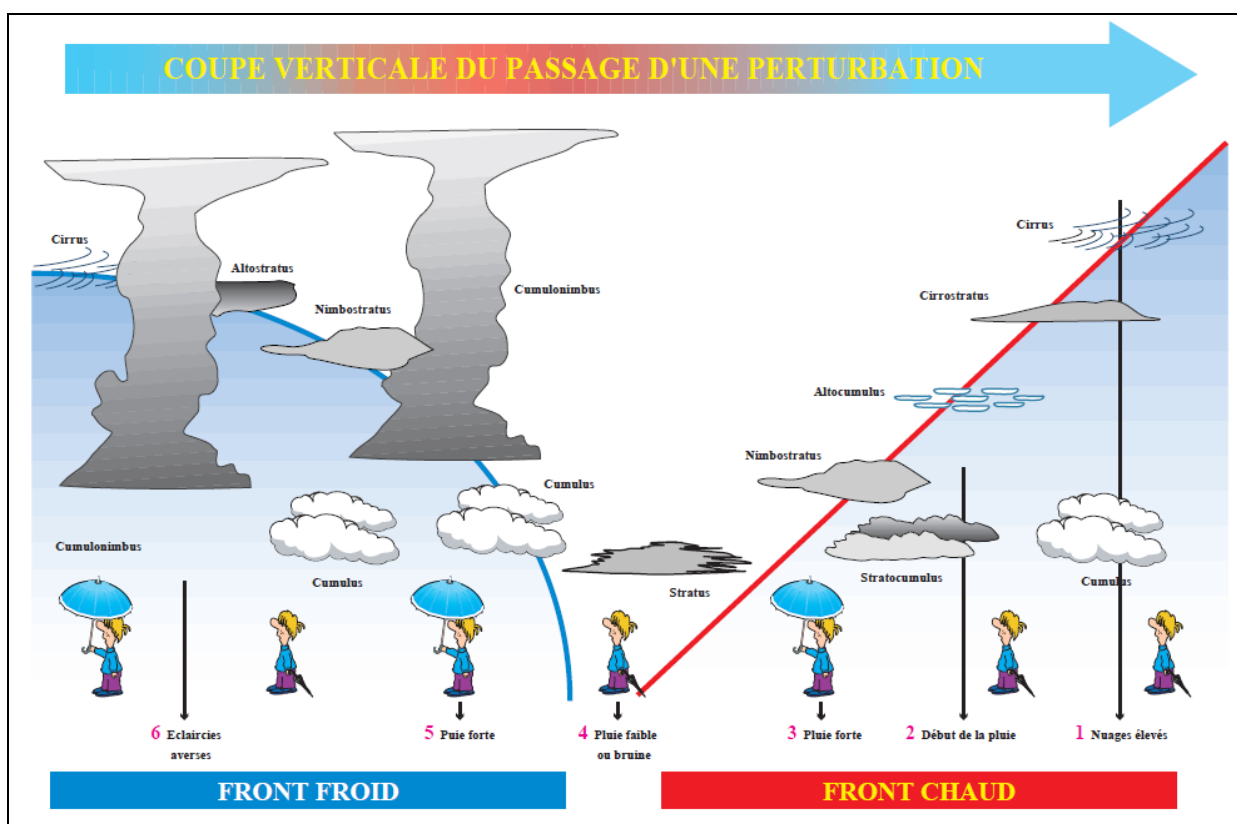


Figure 1.11 : coupe verticale d'une perturbation

- dans un premier temps, le front chaud passe :
 - ✓ un courant de sud-ouest précède le passage du front ;
 - ✓ puis le vent tourne à l'ouest dans le secteur chaud traditionnellement associé à un temps doux et humide, avec un ciel nuageux accompagné de petites pluies ou bruines ;
- dans un second temps, le front froid passe :
 - ✓ le vent et les précipitations se renforcent au passage du front ;
 - ✓ il tourne ensuite au nord-ouest dans la traîne, liée à un temps plus instable fait de successions d'éclaircies et de passages nuageux souvent générateurs d'averses.

L'autre secteur dominant est le secteur nord-est qui représente environ 20 % des vents. Observés le plus souvent au printemps, les vents de nord-est sont dans l'ensemble plus faibles que les vents d'ouest à sud-ouest ; ils sont accompagnés d'un temps froid et sec.

Enfin, environ 10 % des vents sont de force très faible, voire nulle. Ces vents se rencontrent dans les situations anticycloniques.

1.4.1. Le phénomène de brises

L'été, en journée et par temps calme, la terre et l'air qui la surmonte s'échauffent plus que la mer. De la convection apparaît, avec formation de nuages de type cumulus. Un déplacement d'air se crée alors de la mer vers la terre pour rétablir un équilibre thermique. Ce déplacement est appelé brise de mer.

La nuit, la terre et l'air qui la surmonte se refroidissent plus vite que la mer et le courant d'air s'oriente alors de la terre vers la mer : c'est la brise de terre.

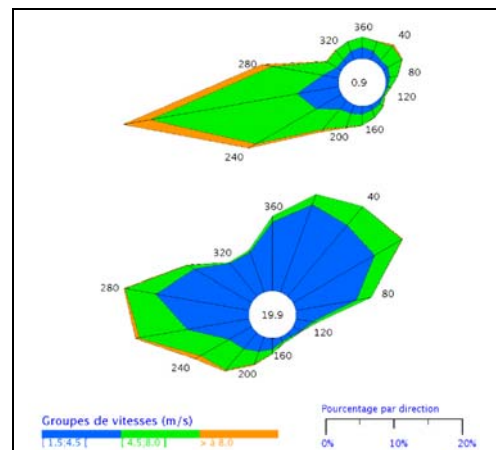


Figure 1.12 :
roses des vents l'été (juin, juillet, août)
à Lorient - période 1981-2011
à 15 UTC en haut (brise de mer) et
à 6 UTC en bas (brise de terre),

Dans ces situations de brise de mer, le littoral est dégagé, les formations nuageuses n'apparaissent qu'à quelques kilomètres de celui-ci, dans les terres. Les températures dans cette bande côtière restent fraîches, car l'air est sans cesse renouvelé par le courant venant de la mer.



Figure 1.13
image du satellite Terra illustrant le phénomène de brise de mer en Bretagne le 4 juin 2001

La frange littorale est dégagée, des nuages cumuliformes apparaissent à quelques kilomètres de celle-ci.

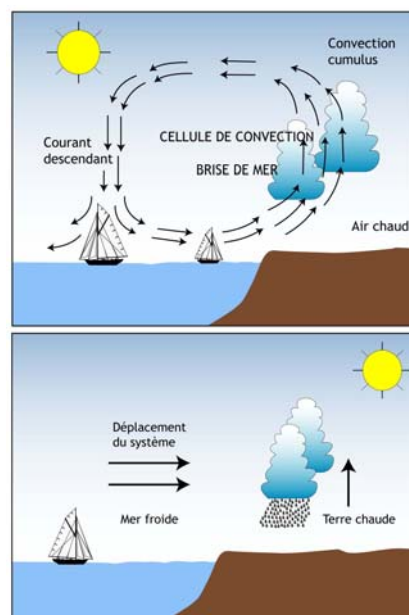


Figure 1.14 :
schémas expliquant le phénomène de brise de mer

1.4.2. Variabilité spatiale

Le vent varie en force comme en direction suivant l'endroit où l'on se trouve. Les forces de vent les plus importantes (plus de 8 m/s, en orangé sur la carte ci-dessous) sont rencontrées sur la côte ou en mer, les plus faibles (entre 1,5 et 4,5 m/s, en bleu clair) dans les terres. En s'approchant du plateau continental, les vents sont de moins en moins soutenus. En effet, le relief terrestre freine les courants d'air, bien plus que la mer plane et lisse, et ce frottement ralentit la vitesse du vent.

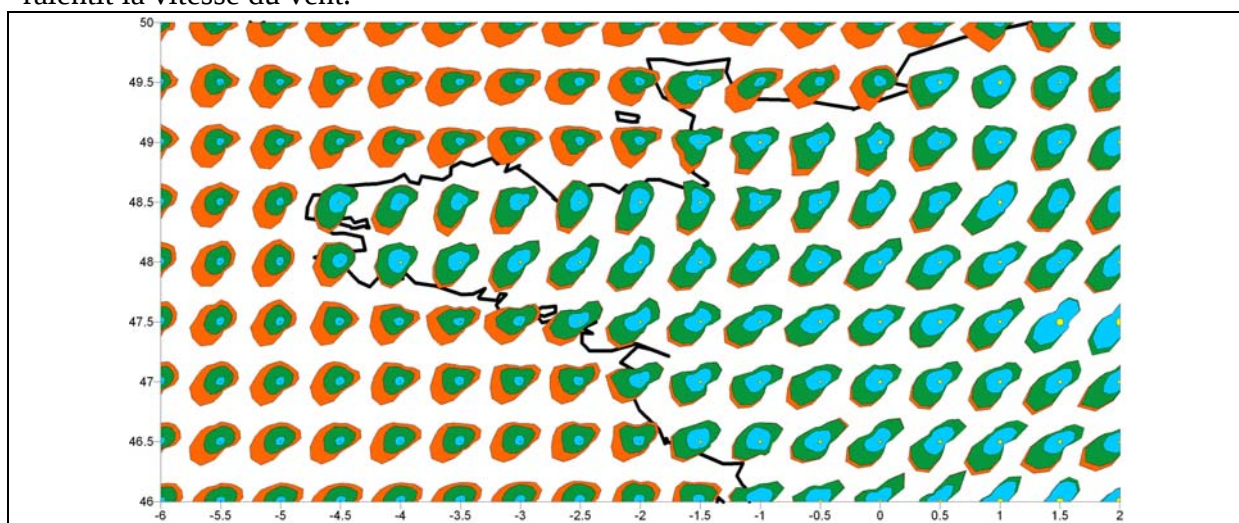


Figure 1.15 :
roses des vents à 10 mètres issues de la climatologie du modèle numérique ALADIN sur la période 1999-2008

1.4.3. Le vent en Bretagne par rapport à l'Europe de l'ouest

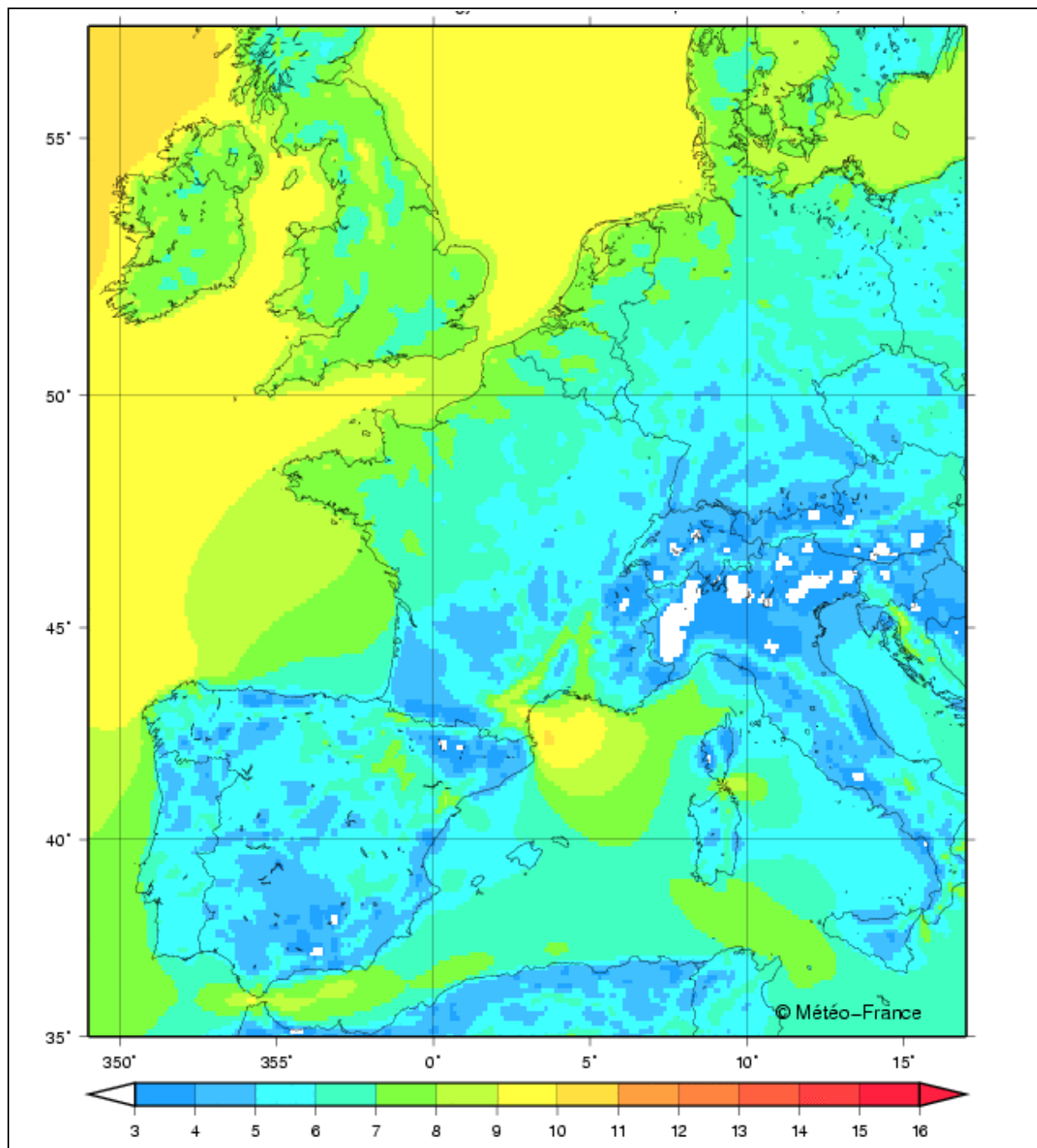


Figure 1.16 :
vent moyen à 100 m sur l'Europe de l'ouest (en m/s), climatologie Aladin (1999-2008)

En raison de sa position particulière, très à l'ouest, en première ligne lorsque les perturbations océaniques arrivent, la Bretagne connaît, sur toute l'étendue de son territoire, des vents en moyenne bien plus importants que la plupart des autres régions françaises ou même d'autres pays européens. Seules les Îles Britanniques subissent des vents comparables.

A l'occasion de violentes tempêtes, des vents puissants ont été relevés.

1.4.4. Mise en évidence du gisement éolien

Le gisement éolien est important, en mer notamment mais aussi sur l'ensemble de la péninsule. La côte nord est davantage favorisée. Le potentiel décroît en Ille-et-Vilaine car les vents y sont freinés à l'abord du plateau continental.

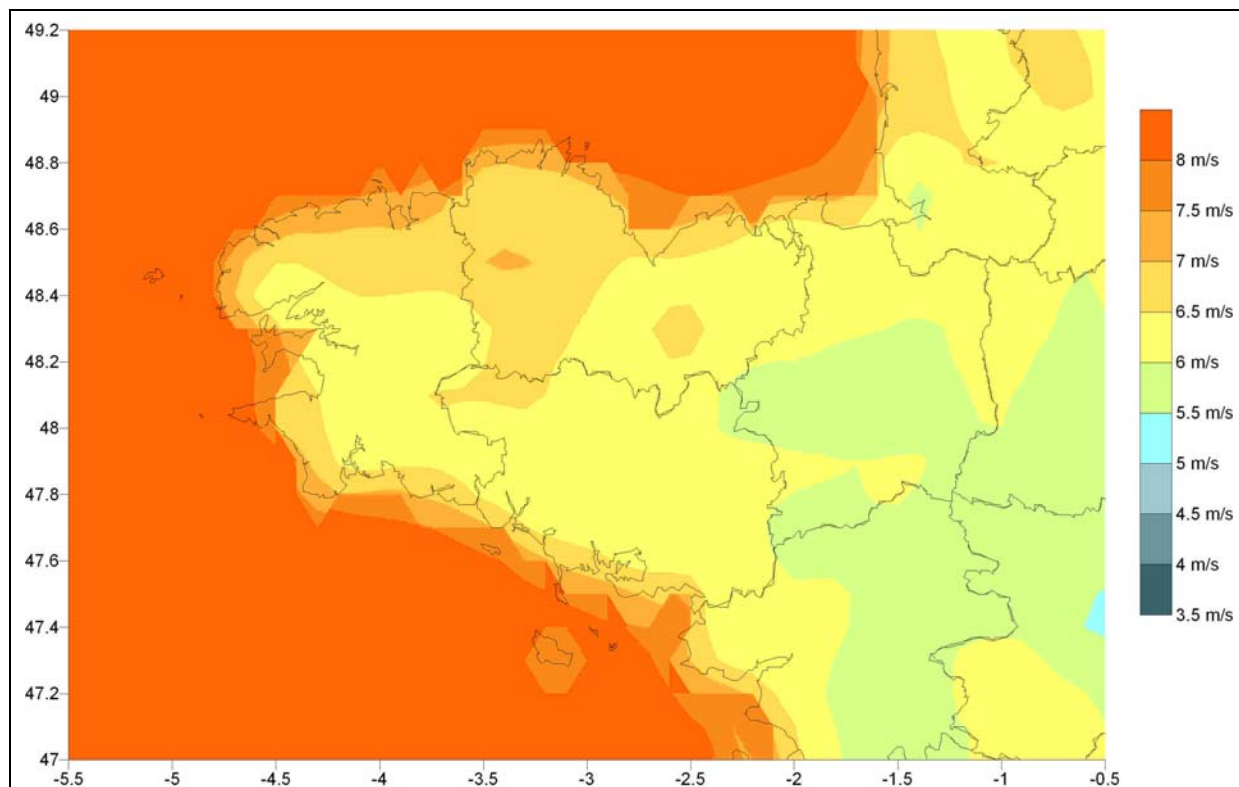


Figure 1.17 :
gisement éolien issu du modèle numérique ALADIN, altitude 50 mètres sur terre, 100 mètres sur mer, période 1999-2008

1.4.5. Variabilité du vent sur 30 ans

Certaines années, le vent souffle fortement et fréquemment, alors que d'autres années sont beaucoup plus calmes.

Ainsi, le nombre de jours avec fortes rafales peut varier du simple au double suivant les années.

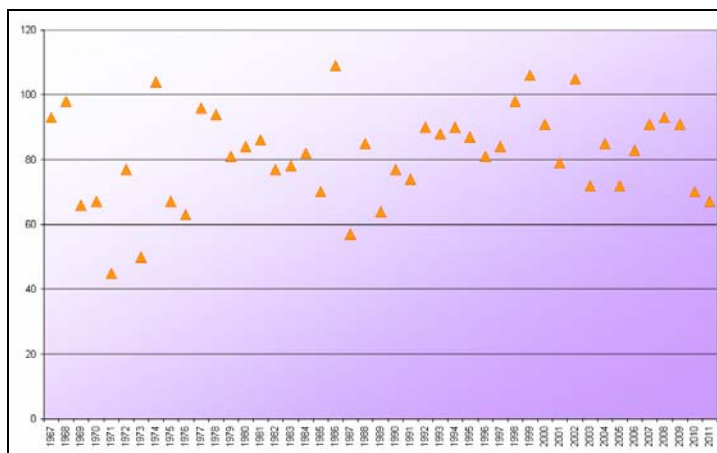


Figure 1.18 :
nombre de jours par année où les rafales de vent ont dépassé 60 km/h à Landivisiau

1.5. INSOLATION ET RAYONNEMENT

La Bretagne est plus célèbre pour sa pluviométrie que pour son ensoleillement. Cependant, ce dernier est loin d'être négligeable et est comparable à celui des régions de même latitude.

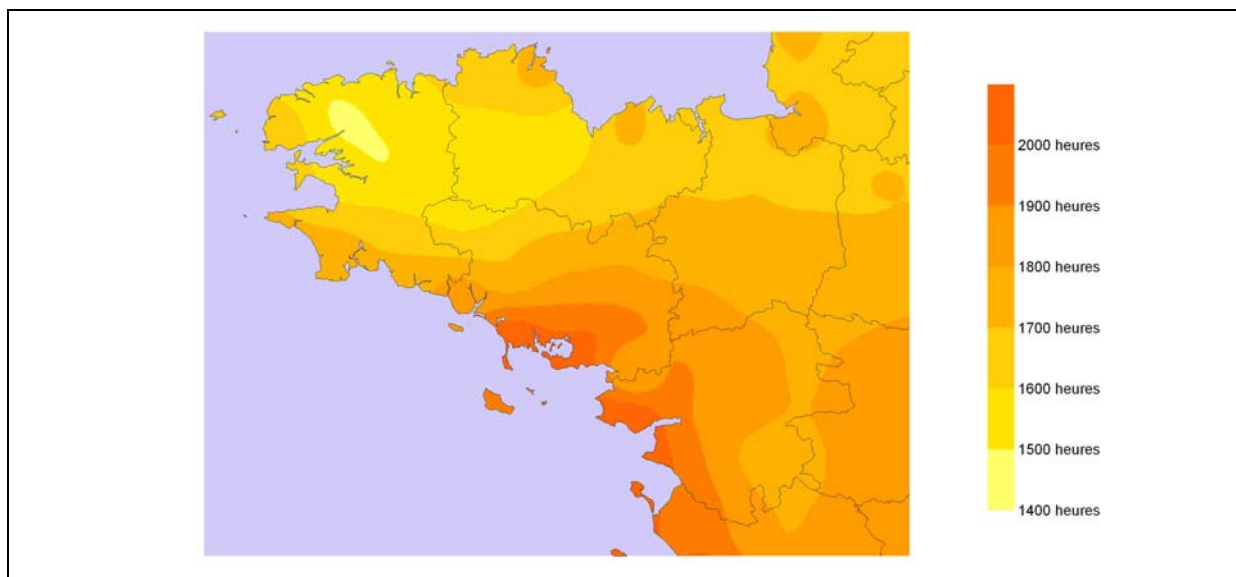


Figure 1.19 :
insolation moyenne annuelle spatialisée
(mesures au sol et données des satellites METEOSAT sur la période 1997-2006)

La durée d'insolation moyenne annuelle croît au fur et à mesure qu'on se déplace vers le sud de la Bretagne. Elle est aussi plus importante sur le littoral, en partie en raison des phénomènes de brises estivales.

La zone la moins ensoleillée, avec une durée d'insolation annuelle entre 1 400 et 1 600 heures est celle des Monts d'Arrée, des Montagnes Noires et des Monts du Méné. Les nuages sont en effet plus nombreux dans cette région de relief, même si l'altitude y est faible.

Le golfe du Morbihan bénéficie de plus de 2 000 heures d'insolation moyenne annuelle et rivalise ainsi avec certains coteaux ensoleillés de Bourgogne ou de Gascogne.

1.5.1. Variabilité mensuelle

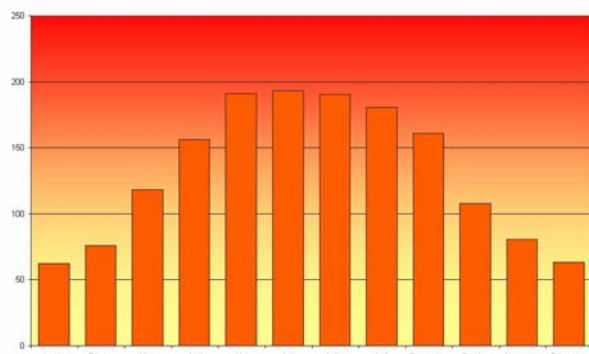


Figure 1.20 :
durées moyennes mensuelles d'insolation (en heures)
à Saint-Brieuc (1986-2011)

Les heures de soleil sont bien plus nombreuses en période estivale qu'en période hivernale. Les raisons sont multiples : la position de la Terre par rapport au Soleil permet des journées plus longues en été qu'en hiver, les types de temps sont également différents suivant les saisons.

Ainsi à Saint-Brieuc, les moyennes mensuelles d'avril à septembre sont comprises entre 150 et 200 heures. Celles d'octobre à mars sont dans une fourchette de 60 à 120 heures.

1.5.2. Variabilité interannuelle

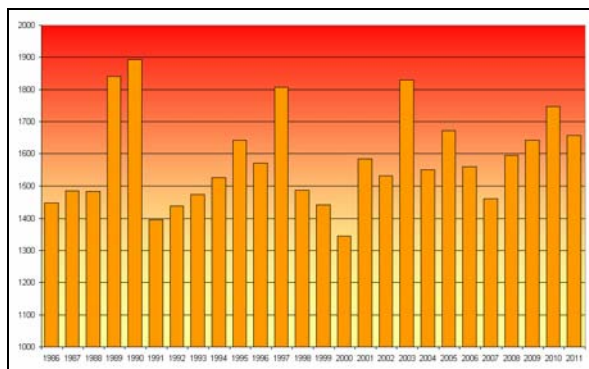


Figure 1.21 :
durées d'insolation annuelles (en heures)
à Saint-Brieuc - période 1986-2011

La durée d'insolation, comme les autres paramètres météorologiques, connaît des variations importantes d'une année sur l'autre.

Ainsi, la station de Saint-Brieuc voit le soleil en moyenne 1 500 heures par an. Certaines années, comme l'année 2000 avec 1 345 heures seulement, sont très peu lumineuses. D'autres, comme l'année 1990 avec 1 892 heures, sont beaucoup plus ensoleillées.

1.5.3. Le rayonnement global : quelques chiffres sur le gisement solaire

Le rayonnement global présente la même répartition spatiale que la durée d'insolation. Sa valeur annuelle est voisine de 1 100 kWh/m² sur le Finistère et les Côtes d'Armor et peut atteindre 1 300 kWh/m² dans le golfe du Morbihan.

Mois	Sarzeau	Rennes	Perros-Guirec	Brest
Janvier	34	31	28	28
Février	52	47	41	42
Mars	99	86	85	77
Avril	139	121	123	112
Mai	178	159	162	150
Juin	192	172	168	156
Juillet	190	164	164	155
Août	167	151	146	142
Septembre	119	112	106	108
Octobre	68	64	59	60
Novembre	42	38	33	33
Décembre	29	25	22	23
Année	1 309	1 172	1 137	1 088

Tableau 1.1 :
rayonnement global moyen en kWh/m² à Sarzeau, Rennes, Perros-Guirec et Brest (période 1991-2000)

2. Histoire récente du climat breton et événements extrêmes

2.1. INTRODUCTION

La rotation de la Terre autour du Soleil ordonne le rythme des saisons. A une fréquence bien différente, tous les 100 000 ans environ, des inflexions de l'orbite terrestre entraînent l'alternance de périodes glaciaires et interglaciaires : c'est la théorie astronomique des climats de Milankovitch. Nous vivons actuellement le versant chaud du cycle. Lors du dernier maximum glaciaire, vers -18 000 ans, la température à la surface de la Terre était de 3 à 5 °C inférieure à celle d'aujourd'hui. La Bretagne, située en marge des glaciers qui recouvraient une bonne partie du nord de l'Europe, subissait un climat froid et aride, avec une végétation rase de toundra, telle qu'on peut la rencontrer de nos jours en Alaska, dans le Grand Nord canadien ou en Sibérie. En raison des énormes quantités d'eau stockées par les glaciers, le niveau des mers était quelques 120 mètres plus bas et la Manche était un fleuve qui se déversait dans l'Atlantique.

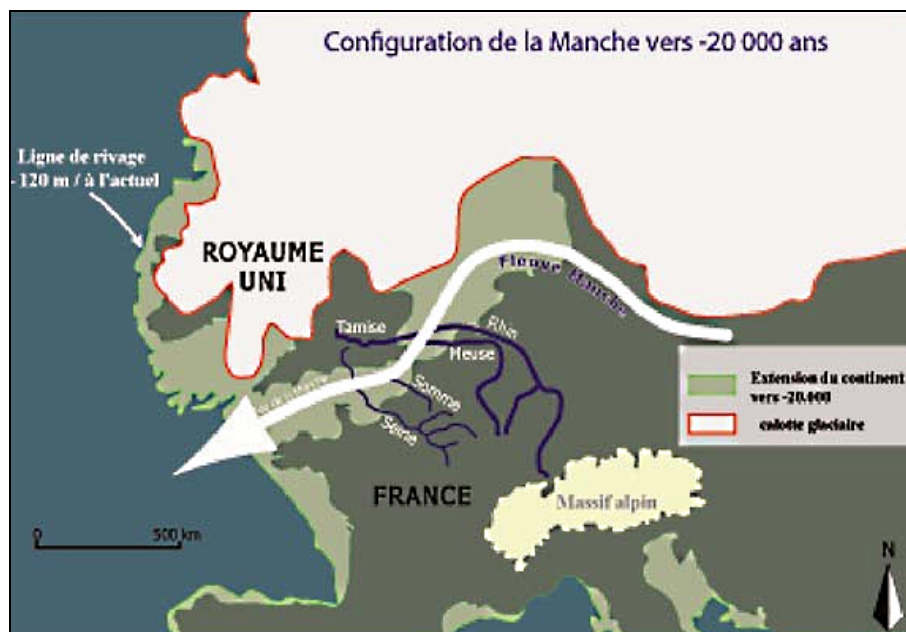


Figure 2.1 :

extension de la calotte glaciaire et limites des surfaces continentales lors du dernier maximum glaciaire

La flèche blanche figure le tracé du paléofleuve Manche qui collectait les eaux des principaux cours d'eau qui se jettent aujourd'hui dans la mer du Nord et la Manche.

A l'opposé, la phase de radoucissement entamée vers -10 000 ans a entraîné le retrait des glaciers et la remontée du niveau de la mer jusqu'à retrouver à peu près les contours actuels de la Bretagne. **Ce réchauffement a donc été lent (sur plusieurs milliers d'années) sans commune mesure avec celui qui s'amorce aujourd'hui dont les effets sont attendus sur une période de l'ordre du siècle.**

Outre les modifications du trait de côte, l'entrée dans cette nouvelle période interglaciaire a bouleversé la composition de la flore et de la faune. La Bretagne s'est couverte d'épaisses forêts de chênes et de noisetiers qui ont abrité de nouveaux venus : cerfs, sangliers et aurochs. L'aurochs a depuis disparu, tandis que le noisetier a perdu de son importance dans les peuplements forestiers.



Figure 2.2 :

un paysage de toundra telle qu'a pu en connaître la Bretagne lors de la dernière période glaciaire

L'idée que nos contrées aient pu connaître une période de glaciation de grande ampleur remonte au XIX^e siècle avec la démonstration par Agassiz, à partir de témoignages géologiques et géomorphologiques.

Pendant longtemps, ce sont des éléments qualitatifs qui ont permis de caractériser le climat de ce lointain passé. Les données instrumentales de températures, de pression etc. ne couvrent que les 150 dernières années. Le thermomètre et le baromètre, fondements de la science météorologique, n'apparaissent en effet qu'au XVII^e siècle. Il faut encore attendre les premières décennies du XVIII^e siècle pour qu'avec les échelles de Fahrenheit, Réaumur ou Celsius, les thermomètres « *parlent le même langage* ». Pour des périodes antérieures à l'invention des instruments météorologiques, on dispose, depuis quelques dizaines d'années, de reconstitutions de températures fournies par des méthodes indirectes.

A partir des années cinquante des scientifiques ont découvert la possibilité de retranscrire en des valeurs de températures les variations des rapports entre les isotopes ¹⁸O et ¹⁶O de l'oxygène contenu dans la glace de carottages glaciaires ou des carbonates issus de forages sédimentaires. Des carottes de glace extraites en Antarctique ont ainsi permis de reconstituer près de 740 000 ans d'archives climatiques. Outre la glace et les sédiments, les paléoclimatologistes tirent des indications climatiques de l'analyse des pollens conservés dans les tourbières, des cernes des arbres, des coraux, des stalactites et de bien d'autres éléments de même nature ayant gardé la trace des conditions climatiques de leur époque (on parle de « proxies »). Ce sont les températures ainsi reconstituées qui viennent conforter les témoignages historiques relatant l'existence sous nos latitudes d'une période de relative douceur : « l'Optimum climatique médiéval » (du X^e au XIV^e siècle) et d'une période plus fraîche : « le Petit âge glaciaire » (XIV^e-XIX^e siècle).

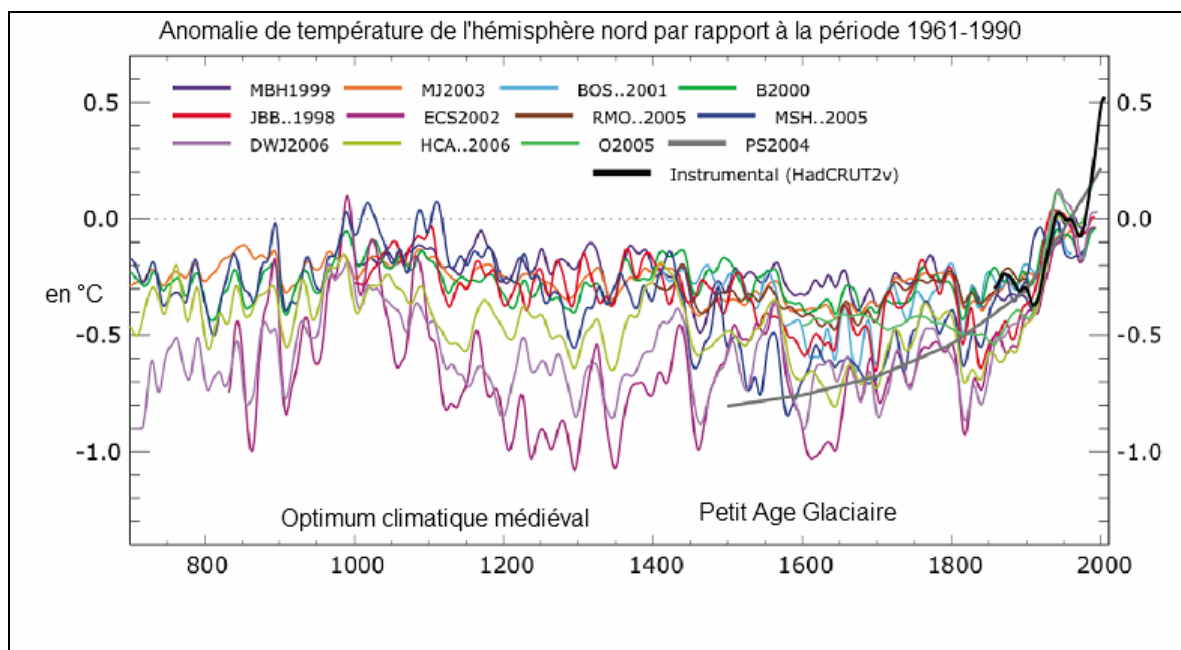


Figure 2.3 :
évolution de la température moyenne au cours du dernier millénaire dans l'hémisphère Nord,
à partir de travaux utilisant différents indicateurs climatiques

La courbe en noir figure la reconstruction effectuée à partir de valeurs instrumentales. Les données ont été lissées pour supprimer les fluctuations d'échelles de temps inférieures à 30 ans.

Jusqu'au début du XX^e siècle, on observe une grande stabilité de la température, en dépit de fluctuations rapides et de faible amplitude : optimum du moyen âge, petit âge glaciaire vers 1650, période froide vers 1850...

L'étude de ces températures révèle que la croissance de 0,6 °C observée au cours du XX^e siècle dépasse de très loin l'amplitude des fluctuations qui précèdent.

Le climat se définit sur la longue durée. Les « normales » climatologiques qui décrivent le climat d'une région sont les valeurs moyennes de températures, précipitations et autres, calculées sur une période de 30 ans. La description du climat d'une région ne saurait toutefois être complète, sans que ne soient évoqués les écarts à la moyenne. Le graphique ci-dessus est la représentation de l'évolution de la température moyenne pour tout un hémisphère, lissée sur des périodes de plusieurs dizaines d'années. L'étude et les diagnostics sur l'évolution du climat récent en Bretagne sur lesquels porte ce chapitre s'appuient sur les données météorologiques instrumentales effectuées dans la région.

2.2. PREMIERS RELEVES METEOROLOGIQUES BRETONS ET CONSTITUTION DES SERIES CLIMATOLOGIQUES

En Bretagne, la Société d'Agriculture de Commerce et des Arts entreprend, dès 1760, d'effectuer des relevés quotidiens de températures, pression, direction du vent et temps sensible. «Ces observations, qui n'exigent que de la patience et de l'exactitude, ne sont pas moins importantes pour diriger l'Agriculture générale, que l'Agriculture particulière. [...] On saura, par des résultats exacts, qu'il serait inutile de tenter dans la Province des cultures qui demandent un degré et une durée de chaleur qui ne s'y rencontrent jamais».

La Société Royale de Médecine lance, dès ses débuts, une vaste enquête sur les maladies épidémiques qui affectent le royaume. Conformément aux théories de l'époque qui lient climat et morbidité, un réseau de médecins, dont fait partie à Saint-Brieuc le docteur Bagot, adressa de 1774 à 1793 des observations météorologiques à côté de relevés épidémiologiques. C'est toutefois en 1855, suite à la destruction par une violente tempête d'une partie de la flotte engagée dans la guerre de Crimée, que le directeur de l'Observatoire de Paris, Urbain Le Verrier, proposa à Napoléon III d'organiser le réseau de surveillance et d'avertissement des tempêtes qui donnera naissance au service météorologique national. Ce réseau, dont fait partie l'Observatoire de la Marine de Brest, est complété à partir de 1865 par un service d'observations météorologiques davantage destiné à la description du climat, qui mobilise, en particulier, les écoles normales primaires. La Première, puis la Seconde Guerre Mondiale vont sérieusement compromettre la pérennité de ces réseaux, qu'il a fallu à chaque fois remettre sur pied.

Au final, les incidents et accidents de l'histoire limitent la profondeur et le nombre de séries de données disponibles pour l'analyse de l'histoire récente du climat breton.

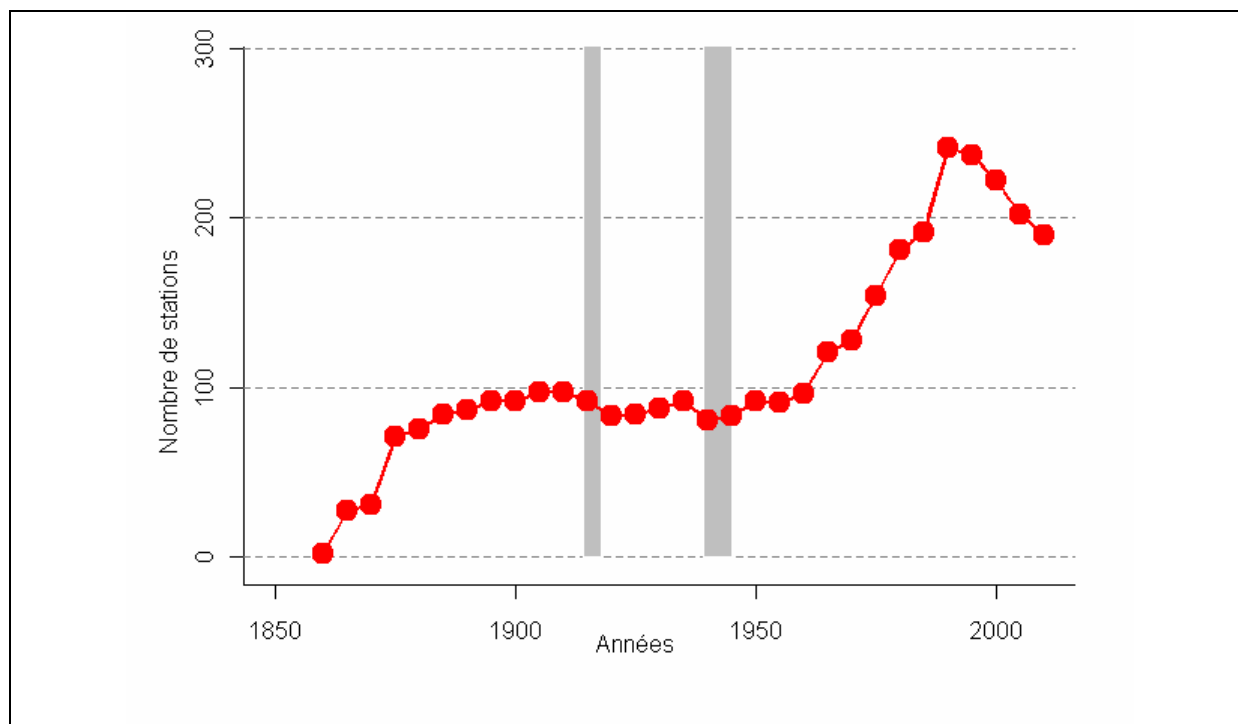


Figure 2.4 :
évolution du nombre de stations météorologiques présentes en Bretagne, par pas de 5 ans, décrites dans les bases de données climatologiques de Météo-France.

Les deux barres verticales en gris représentent les deux guerres mondiales. Les données transmises par les stations avant 1949 n'ont pas encore toutes été numérisées. Les données du XVIII^e siècle et du début du XIX^e siècle sont difficilement exploitables sans les métadonnées qui permettent de les qualifier et font l'objet de programmes de recherche spécialement dédiés.

La constitution de longues séries climatiques se fait généralement par agrégation des données de plusieurs stations proches et après correction des biais consécutifs à ces changements de poste et aux changements de capteurs. On obtient alors des séries « homogénéisées » à partir desquelles on peut étudier le signal climatique. Ces méthodes d'homogénéisation ne sont actuellement applicables qu'à des données mensuelles. Ce sont elles qui ont permis de constituer, sur une période de cent ans, des séries de températures et de précipitations. Les séries de données quotidiennes ne sont quant à elles disponibles que sur des périodes plus courtes pour lesquelles on estime qu'il n'y a pas eu de rupture d'homogénéité.

2.3. ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES

2.3.1. Evolution générale

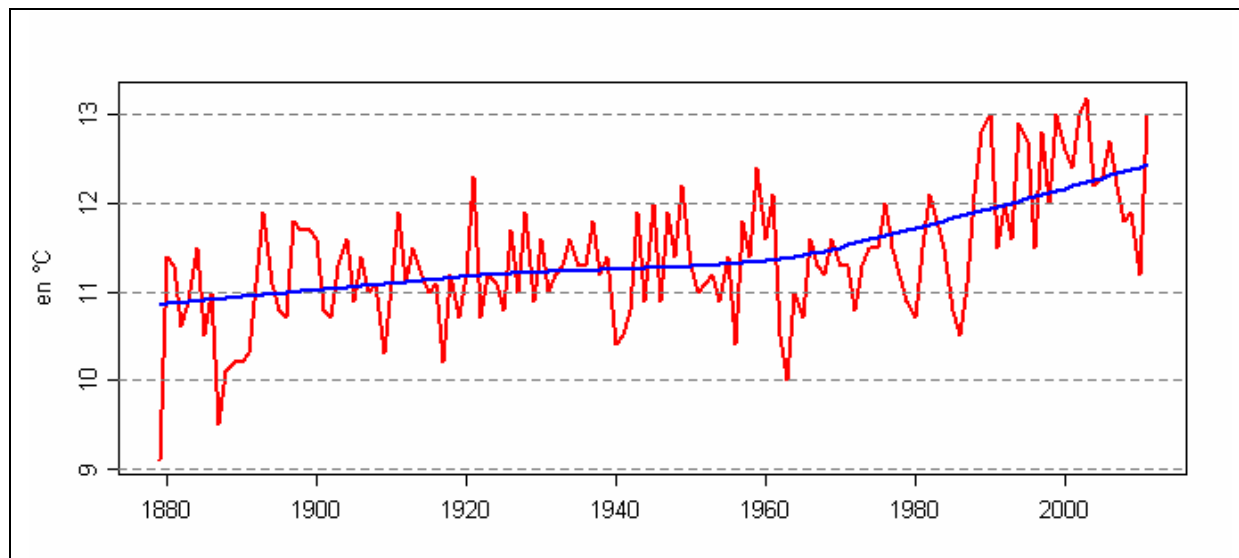


Figure 2.5 :
évolution des températures moyennes annuelles (en °C) à Rennes sur la période 1879-2011

Courbe rouge : évolution des températures moyennes annuelles (en °C) à Rennes entre 1879 et 2011 (série homogénéisée sur la période 1879-2000, prolongée par des données brutes jusqu'en 2011, ces dernières n'ont pu être introduites lors de l'opération d'homogénéisation conduite antérieurement). Courbe bleue : évolution des températures après lissage par régression LOWESS.

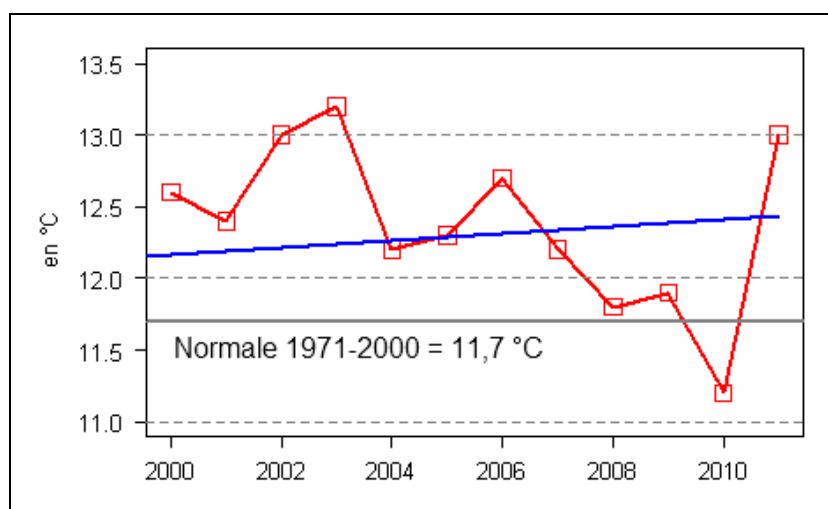


Figure 2.6 :
détail de la courbe précédente sur la période 2000-2011

Le trait continu horizontal gris représente la température moyenne (11,7 °C) sur la période 1971-2000.

L'année 2010 apparaît en rupture par rapport aux années qui précèdent : elle s'écarte nettement de la tendance et c'est la seule année depuis l'an 2000 à afficher des températures inférieures à la normale.

Les deux graphiques précédents illustrent la principale manifestation à ce jour du changement climatique : la tendance à la hausse générale des températures. Les années les plus chaudes se situent pour la plupart au cours des années les plus récentes, mais la variabilité naturelle reste forte et l'emporte sur le signal climatique. Clairement, le réchauffement climatique est bien loin de nous assurer que l'année prochaine sera plus chaude que celle en cours ; la variabilité naturelle des températures d'une année sur l'autre demeure prépondérante. C'est dans le long terme que s'observe le réchauffement climatique.

A Rennes, alors que la température moyenne annuelle en 2011 est supérieure de +1,8 °C à celle de 2010, on mesure un réchauffement moyen de l'ordre de +0,9 °C entre 1901 et 2000 ! La hausse des températures, qu'on peut entrevoir sur la série rennaise dès le début du vingtième siècle, ne se fait pas non plus de manière uniforme : elle semble marquer une pause entre 1940 et 1960 avant de s'accélérer au milieu des années 1970. On considère en effet qu'au cours des années 1950 et 1960, la température moyenne mondiale s'est stabilisée suite à l'accroissement de la concentration atmosphérique en particules fines, à l'effet refroidissant. Ce surcroît de particules était pour partie lié à la combustion d'énergies fossiles riches en soufre mais avait également une origine naturelle, et ponctuelle, avec l'éruption, en 1963, du Mont Agung qui a projeté de grandes quantités de poussières réfléchissantes dans la haute atmosphère (effet parasol).

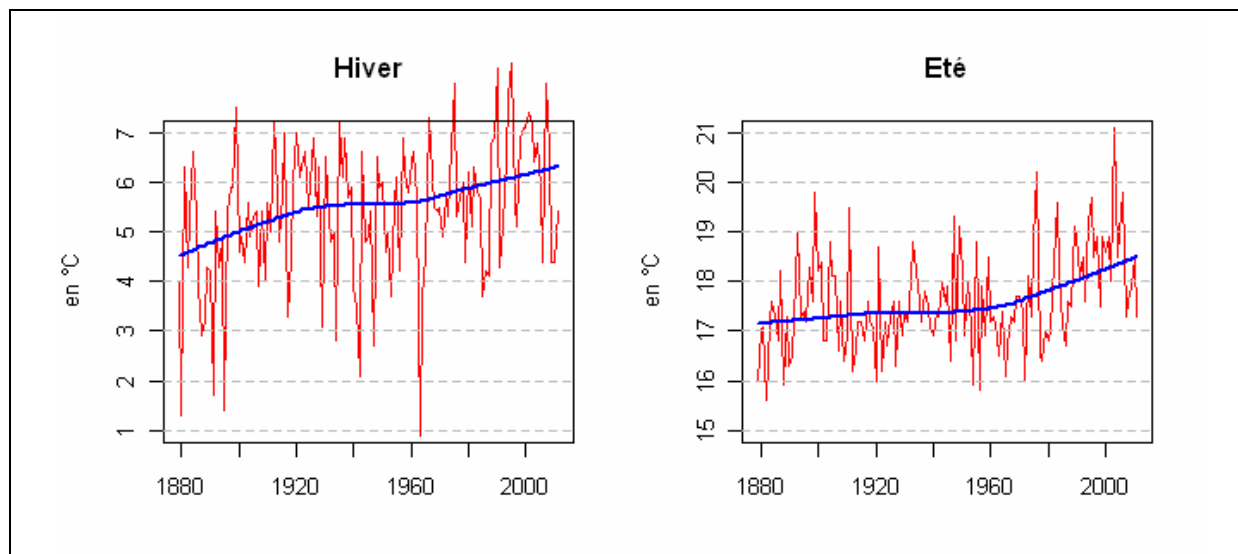


Figure 2.7 :
évolution des températures moyennes (en °C) à Rennes sur la période 1879-2011,
pour les saisons d'hiver (à gauche) et d'été (à droite).

En rouge, évolution des températures moyennes (en °C) à Rennes sur la période 1879-2011, pour les saisons d'hiver (décembre-janvier-février) et d'été (juin-juillet-août).

En bleu, courbe d'évolution des températures après lissage par régression LOWESS.

L'hiver est la saison où les températures ont la plus large amplitude de variation d'une année à l'autre : 7,5 °C séparent l'hiver 1962-63, le plus froid de tous, de l'hiver 1994-95, le plus doux.

La hausse des températures est perceptible en toute saison, mais, là non plus, elle ne s'effectue pas au même rythme. La tendance est plus affirmée en automne, ainsi que pour les températures minimales quotidiennes par rapport aux températures maximales quotidiennes. Ceci est une particularité de l'Ouest par rapport à d'autres régions françaises.

Saisons	Températures minimales quotidiennes	Températures maximales quotidiennes	Températures moyennes quotidiennes
Printemps	+1.18 °C	-0.04 °C	+0.57 °C
Eté	+1.46 °C	+0.16 °C	+0.81 °C
Automne	+1.64 °C	+0.60 °C	+1.12 °C
Hiver	+0.88 °C	+0.66 °C	+0.77 °C
Moyenne sur l'année	+1.29 °C	+0.35 °C	+0.82 °C

Tableau 2.1 :
évolution moyenne des températures sur un siècle (calculs sur la période 1901-2000)
à partir des séries de températures homogénéisées de l'île de Groix.

A Groix, le réchauffement moyen est un peu inférieur à celui observé à Rennes : +0,82 °C en cent ans. Les températures minimales quotidiennes (plutôt observées en fin de nuit) augmentent plus fortement que les températures maximales quotidiennes (plutôt observées en journée).

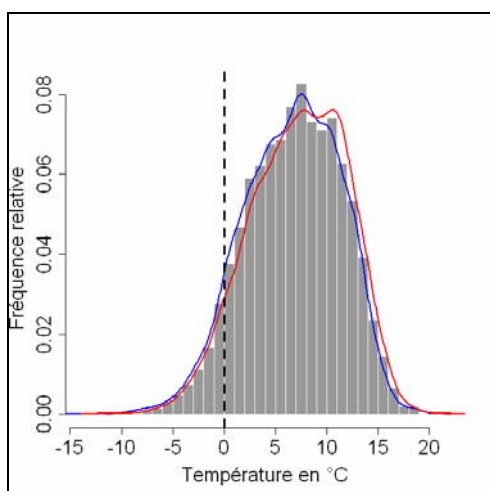


Figure 2.8.a :
températures minimales quotidiennes

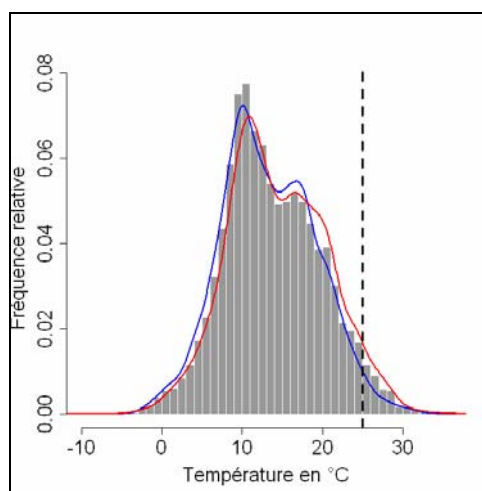


Figure 2.8.b :
températures maximales quotidiennes

En gris, histogrammes des valeurs quotidiennes de températures (minimales et maximales) de Rostrenen sur la période 1971-2000.

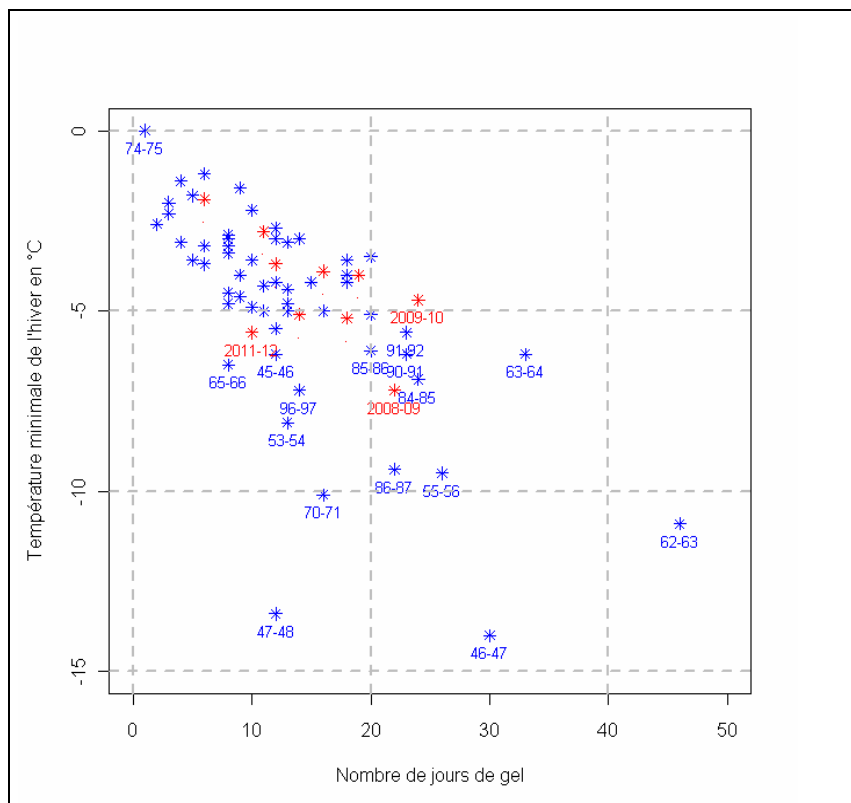
En bleu, un analogue de l'histogramme calculé sur la période 1961-1985, et en rouge, celui calculé sur la période 1986-2010.

Le trait tireté vertical marque la limite des valeurs 0°C et 25 °C.

L'enveloppe des courbes reste à peu près similaire. En première analyse, on note un glissement, « en bloc », vers la droite, vers des valeurs de températures plus élevées.

2.3.2. Les épisodes de froid

Les hivers les plus rigoureux semblent appartenir au passé : on assiste à une raréfaction des épisodes froids en intensité comme en durée.



Le nombre de jours de gel, en abscisses, et la température minimale atteinte au cours de l'hiver (les hivers postérieurs à l'an 2000 sont pointés en rouge), en ordonnées, permettent de caractériser les épisodes de froid lors des différents hivers à Brest entre 1945 et 2011.

En dépit de la vague de froid du mois de février, l'hiver 2011-2012 ne compte que 10 jours de gel (8 en février) avec une température minimale de -5,6 °C.

Figure 2.9 :
caractérisation du froid lors de différents hivers à Brest,
sur la période 1945-2011

Rares sont ceux qui se souviennent de la quasi-absence de gel (températures négatives) à Brest lors de l'hiver 1974-75.

Trois hivers : 1946-47, 1947-48 et 1962-63 se distinguent par leur extrême rudesse. L'hiver 1962-63 est un hiver d'exception qui a marqué les mémoires.

C'est toutefois l'hiver 1956-57 qui détient le record du plus grand nombre de jours consécutifs de gel à Brest avec des gelées observées 17 jours d'affilée, du 10 au 26 février 1956.

Le nombre de jours de gel au cours des trois mois d'hiver, à Brest, est passé en moyenne de 14, sur la période 1951-1980, à 13, sur la période 1981-2010.

Rang	Hivers les plus froids	Température moyenne	Hivers les plus doux	Température moyenne
1	1962-1963	3.0 °C [-4.0 °C]	1989-1990	8.8 °C [+1.8 °C]
2	1946-1947	4.1 °C [-2.9 °C]	1994-1995	8.8 °C [+1.8 °C]
3	1952-1953	5.3 °C [-1.7 °C]	2006-2007	8.7 °C [+1.7 °C]

Tableau 2.2 :
hivers les plus remarquables à Brest sur la période 1945-2011 :

Dans ce tableau, on trouve la température moyenne (décembre-janvier-février) et entre crochets l'écart à la normale 1971-2000.

Les hivers les plus froids s'écartent d'avantage de la normale que les hivers les plus doux.

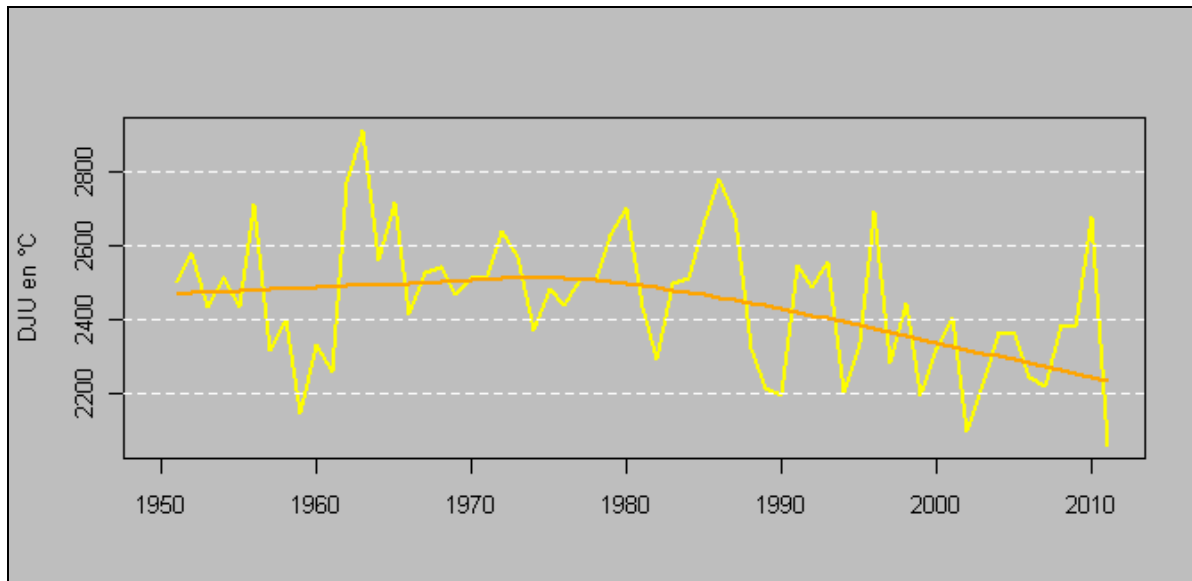


Figure 2.10 :
Evolution des degrés jours unifiés (base 18 °C) à Ploërmel, sur la période 1951-2011

En jaune , évolution des degrés jours unifiés (base 18 °C) à Ploërmel, sur la période 1951-2011.

En orange, courbe montrant la tendance après lissage par régression LOWES.

Les degrés jours unifiés (DJU) base 18 °C sont à la mesure de la rigueur des mois les plus froids. Ils mesurent le déficit de température entre l'air extérieur et une valeur cible de 18 °C. La somme des DJU est un paramètre entrant dans le calcul des estimations de consommation de chauffage.

2.3.3. Les épisodes de fortes chaleurs

Même si la chaleur n'est pas l'élément le plus caractéristique du climat breton, notre région a connu des épisodes remarquables durant les dernières décennies.

Le nombre de jours dans l'année, où la température a dépassé 25 °C à Brest, est passé en moyenne de 6, sur la période 1951-1980, à 11, sur la période 1981-2010. Cet accroissement du nombre de journées au caractère estival ne peut toutefois pas toujours garantir de beaux étés, comme cela a été le cas ces dernières années. Contrairement aux tendances qui se dessinent sur de longues périodes, des « anomalies » climatiques aussi spectaculaires que la canicule d'août 2003 ne peuvent pas être clairement et strictement désignées comme seul signe du changement climatique.

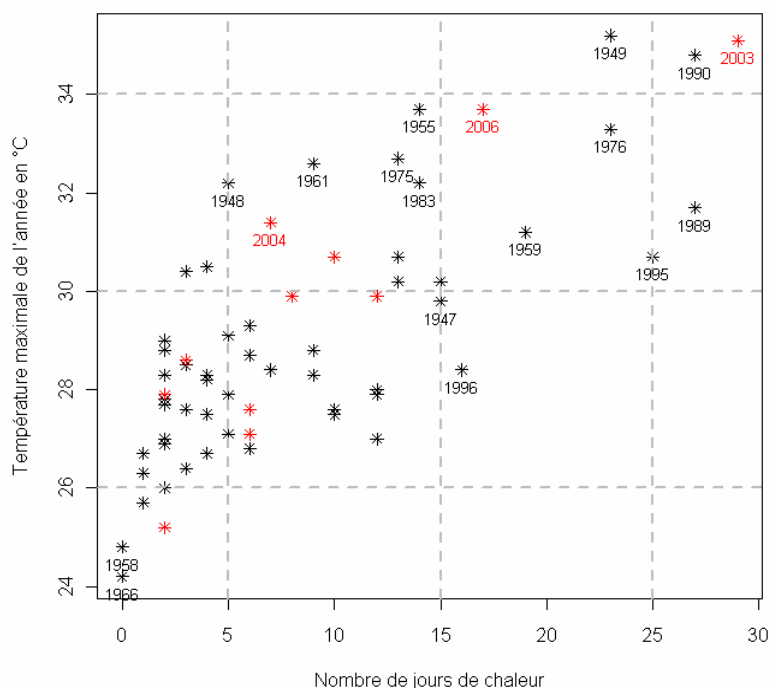


Figure 2.11 :
chaleur à Brest, sur la période 1945-2011

Les périodes de chaleur sont caractérisées par le nombre de jours de chaleur (température maximale quotidienne supérieure ou égale à 25 °C), en abscisses, et la température maximale atteinte au cours de l'année (les années depuis l'an 2000 sont pointées en rouge), en ordonnées.

Rang	Étés les plus chauds	Température moyenne	Étés les plus frais	Température moyenne
1	2003	17.8 °C [+1.9 °C]	1954	13.8 °C [-2.1 °C]
2	1976	17.7 °C [+1.8 °C]	1956	14.0 °C [-1.9 °C]
3	1983	17.6 °C [+1.7 °C]	1972	14.0 °C [-1.9 °C]

Tableau 2.3 :
étés les plus remarquables à Brest sur la période 1945-2011

Dans ce tableau figurent la température moyenne (mois de juin, juillet et août) et entre crochets l'écart à la normale 1971-2000.

La plus longue séquence de journées consécutives, à Brest, avec des températures supérieures à 25 °C appartient à l'année 1976, avec 11 journées chaudes entre le 24 juin et le 4 juillet.

2.4. ÉVOLUTION DES PLUIES

2.4.1. Evolution générale des précipitations

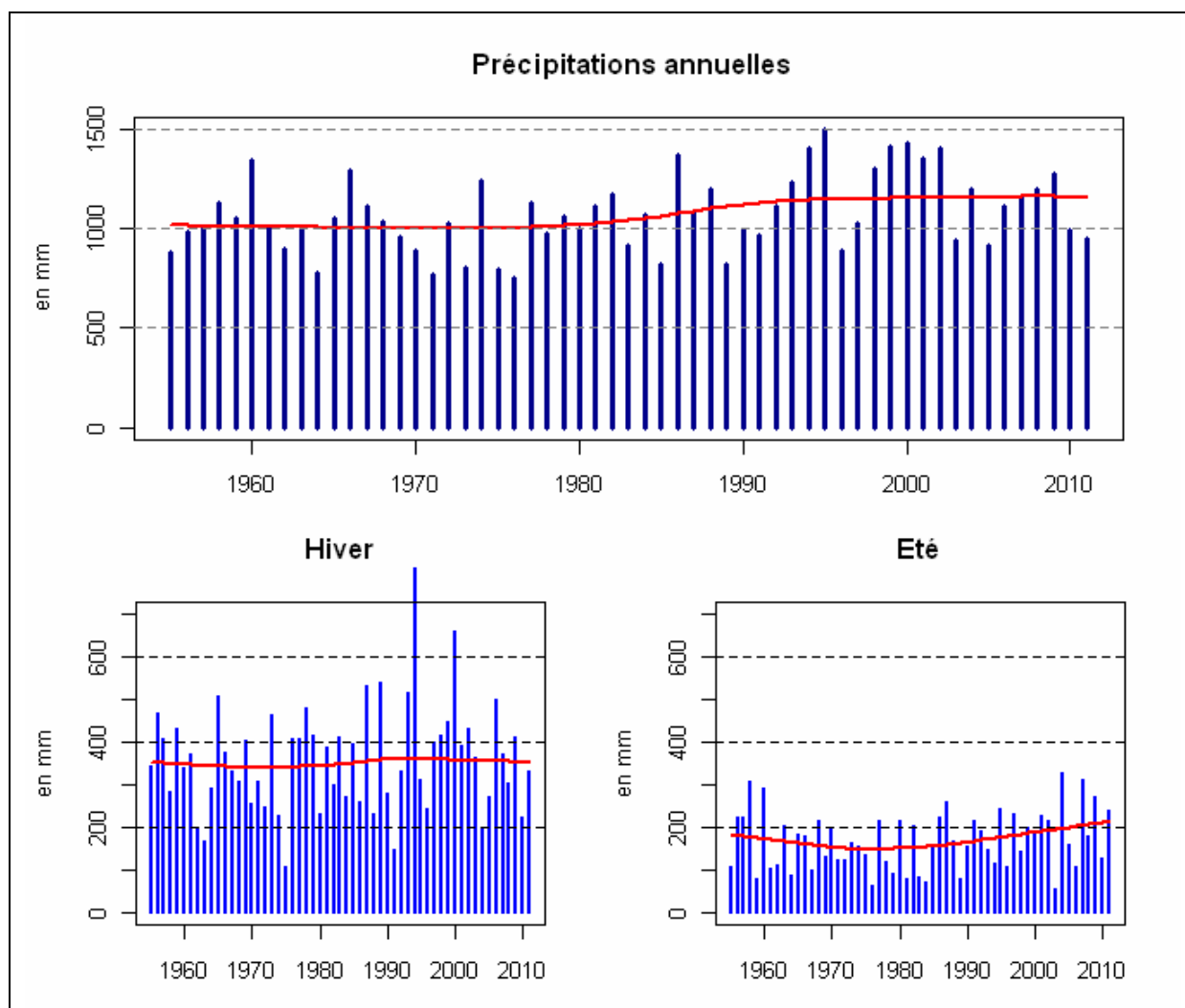


Figure 2.12 :
évolution des précipitations (en mm) à Rostrenen sur l'année (en haut) et pour les deux saisons d'hiver (en bas à gauche) et d'été (en bas à droite), sur la période 1955-2011

En bleu, évolution des précipitations (en mm) à Rostrenen sur l'année et pour les deux saisons d'hiver (mois de décembre, janvier et février) et d'été (mois de juin, juillet et août), sur la période 1955-2011.

La courbe rouge montre l'évolution après lissage par régression LOWESS.

Dans cette région de relief, les précipitations hivernales contribuent bien plus largement que les pluies d'été au bilan annuel.

Contrairement aux températures, la tendance concernant l'évolution des précipitations est encore peu détectable et quelques années hors norme sont susceptibles de l'infléchir.

On attribue l'éventuel accroissement des cumuls pluviométriques annuels généralement à une accélération du cycle hydrologique : évaporation-condensation, ainsi qu'à une augmentation du nombre d'épisodes de fortes précipitations.

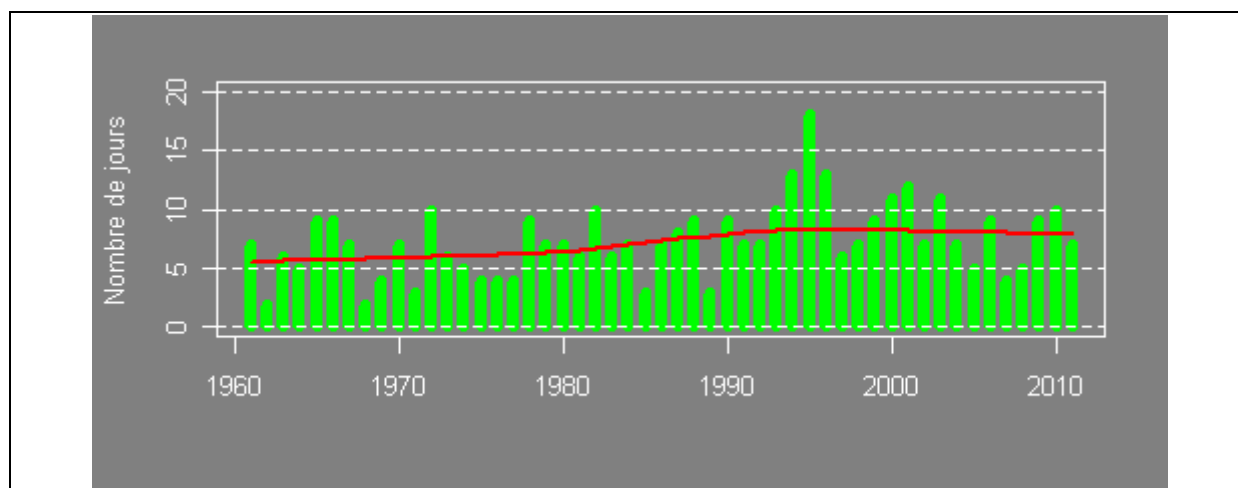


Figure 2.13 :
évolution du nombre de jours annuels d'épisodes de fortes pluies (plus de 20 mm en 24 heures)
à Auray, sur la période 1961-2011

En vert, évolution du nombre de jours annuels d'épisodes de fortes pluies (précipitations en 24 heures supérieures à 20 mm) à Auray, sur la période 1961-2011.

La courbe en rouge montre l'évolution après lissage par régression LOWESS.

Toutes les stations bretonnes ne montrent pas la même tendance.

Rang	Années les plus sèches	Quantité de pluie	Années les plus arrosées	Quantité de pluie
1	1953	627 mm [68 %]	1960	1 307 mm [141 %]
2	1973	638 mm [69 %]	1994	1 205 mm [130 %]
3	1989	646 mm [70 %]	1952	1 170 mm [127 %]

Tableau 2.4 :
pluviométrie annuelle, années les plus remarquables à Lorient sur la période 1951-2011

Les valeurs entre crochets correspondent aux écarts à la normale 1971-2000.

L'année 1953 apparaît souvent comme l'année la plus sèche de l'après-guerre en Bretagne.

A l'inverse, 1982, 1999 et 2000 sont souvent les années les plus arrosées - ce n'est pas le cas ici pour la station de Lorient.

A Lorient, la plus longue séquence de jours de pluie (supérieures à 1 mm) est de 22 jours, entre le 23 janvier et le 13 février 1988. A l'inverse, on a dénombré, en 1976, deux épisodes particulièrement longs n'offrant pas la moindre goutte d'eau : le premier, de 29 jours, s'étirant entre le 1^{er} et le 29 juin, et le second, de 23 jours, entre le 1^{er} et le 23 août.

2.4.2. Les périodes de sécheresse

La Bretagne connaît un climat océanique avec des pluies réputées se répartir assez régulièrement dans l'année. Les phénomènes de sécheresse peuvent néanmoins se révéler critiques. Lors de la grande sécheresse de 1976, on a pu voir des assecs que l'on croyait réservés à des contrées plus méridionales. Ainsi, le lit mineur de la Vilaine était pratiquement asséché en amont de la ville de Rennes.

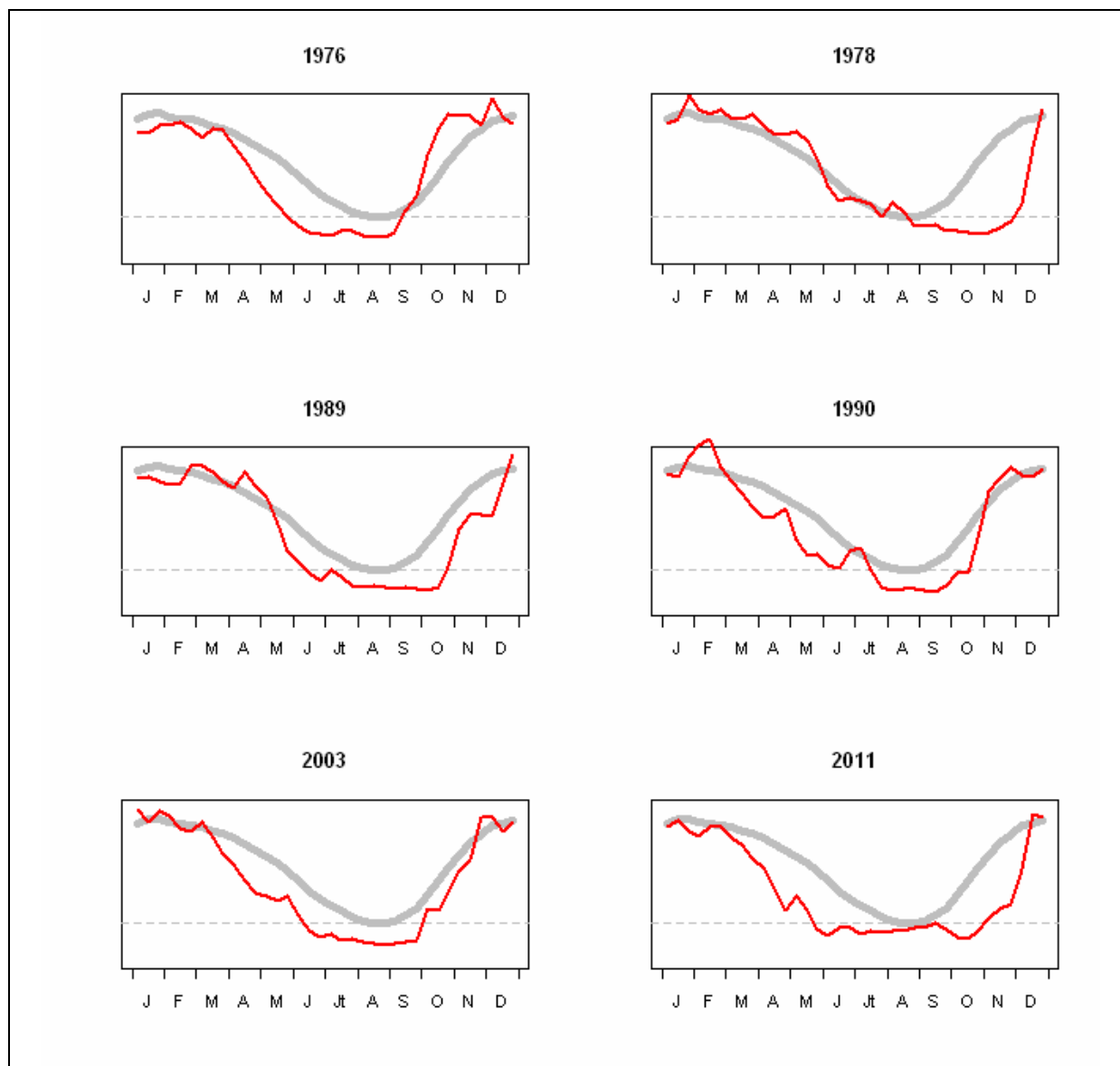


Figure 2.14 :
variation de l'humidité des sols à Rostrenen
lors de différents épisodes de sécheresse rencontrés entre 1958 et 2011

En rouge, variation de l'humidité des sols (SWI : Soil Wetness Index) à Rostrenen lors de différents épisodes de sécheresse rencontrés au cours de la période 1958-2011.

La courbe grise représente la trajectoire normale d'assèchement des sols au cours de l'année (moyenne 1971-2000) et le trait gris discontinu souligne le minimum annuel (traditionnellement observé en août).

En 1976, comme en 2011, on observait dès le mois de mai une situation comparable à un plein été. En 1978, la typologie de la sécheresse est tout autre : elle ne s'est manifestée qu'en automne avec des conséquences radicalement différentes. Il existe donc différentes modalités en termes d'intensité, de durée, de saisonnalité, même si tous les épisodes de sécheresse ont pour origine un manque d'eau que viennent éventuellement exacerber des conditions desséchantes comme des températures anormalement élevées, un vent fort, ou un bel ensoleillement.

Parmi les sécheresses les plus remarquables, celle de 1976 reste gravée dans les mémoires. Celle de l'année 1921, année de « sécheresse du siècle » en Europe, semble avoir relativement épargné la Bretagne, où la pluviométrie a cependant quand même, là aussi, été très nettement déficitaire. Avec 1976, 1949 est l'autre grande année de sécheresse à avoir marqué les esprits. Elle présente la particularité d'avoir été précédée de plusieurs années de pluies déficitaires. On avait alors observé des étiages particulièrement bas des principaux cours d'eau, le tarissement de certaines sources et de puits et, comme en 2003, des phénomènes de dépérissements forestiers liés au stress hydrique, renforcé par des températures caniculaires.

Si les sécheresses résultent de pluies parcimonieuses, des précipitations excessives peuvent quant à elles conduire à de forts ruissellements et à des inondations. Le risque d'inondations est le premier risque naturel auquel la Bretagne est exposée, tant en termes de populations concernées que de dommages potentiels.

2.4.3. Les inondations

Les cours d'eau bretons sont à l'étiage au cours des mois d'août et septembre et connaissent leur débit maximum en janvier ou février. Les crues ont donc principalement lieu dans la seconde moitié de l'hiver quand des conditions plus particulièrement humides viennent se surajouter à un débit de base déjà important.

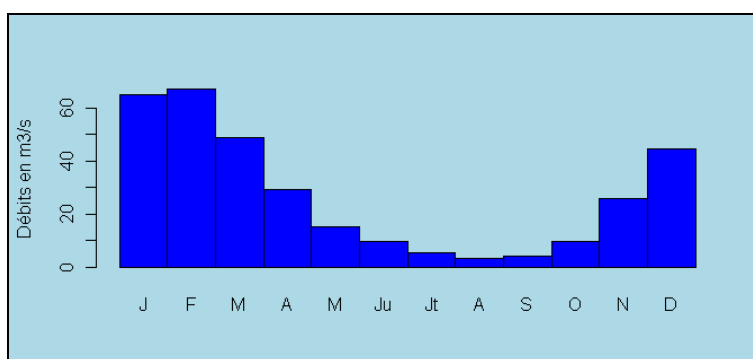


Figure 2.15 :
débits mensuels moyens de la Vilaine à Guipry (en m³/s) calculés sur la période 1934-2000
(source DREAL Bretagne)

Des grandes marées ou des phénomènes de surcote liés aux tempêtes peuvent venir aggraver l'importance des inondations quand les crues impliquent des cours d'eau qui débouchent en mer (ex : crues de la Laïta et du Trieux lors du passage de la tempête Xynthia, le 28 février 2010).

Lors d'hivers rigoureux, des inondations peuvent se produire, en période de redoux, lorsque des pluies soutenues tombent sur des sols rendus imperméables par le gel ou quand ces pluies viennent brusquement activer la fonte d'une importante couche de neige (ex : crues de la Rance et du Gouessant des 25-26 février 1933 ou plus près de nous, mais plus modestement, les inondations dans la région de Perros-Guirec et Lannion des 4-5 décembre 2010).

Rang hiver	Hivers	Guingamp (Trieux)	Morlaix (Laïta)	Pontivy (Blavet)	Redon (Vilaine)
4	1987-1988	15 jan. au 15 fév.	-	15 jan. au 25 fév.	25 jan. au 16 fév.
3	1989-1990	-	12 au 17 fév.	-	-
1	1994-1995	17 au 31 jan.	17 au 31 jan.	17 au 31 jan.	17 au 31 jan.
8	1999-2000	25 au 29 déc.	25 au 29 déc.	25 au 29 déc.	25 au 29 déc.
2	2000-2001	12 déc.	12-13 déc. + 5 au 6 jan.	12-13 déc.	12-13 déc. + 4 au 7 jan.
10	2009-2010	28 fév. au 1 ^{er} mars.	28 fév.	-	-

Tableau 2.5 :

Inondations ayant conduit, depuis 1982, à un arrêté de reconnaissance de catastrophe naturelle pour quelques communes bretonnes

Entre parenthèses figure le cours d'eau à l'origine de la crue inondante et dans la première colonne du tableau le rang de l'hiver en terme de pluviosité (rang sur la période 1982-2011 de la pluviométrie des mois de décembre, janvier et février de trois stations : Brest, Rostrenen et Rennes).

On peut vérifier que les principales inondations ont eu lieu lors des hivers les plus arrosés.

Si la plupart des crues ont lieu l'hiver, elles peuvent parfois se produire dès l'automne, en particulier quand elles affectent de petits bassins versants comme celui de la Laïta. Il suffit alors parfois d'un épisode pluvieux important sur des sols détrempés pour donner de forts ruissellements et des inondations des points bas comme ce fut le cas à Morlaix en octobre 1990.

Par contre, il faut la conjonction de pluies de forte intensité survenant après une période particulièrement humide pour engendrer une crue de la Vilaine comme en octobre 1966. On peut également connaître des crues tardives pour peu qu'un printemps excessivement pluvieux vienne, au sortir de l'hiver, entretenir le débit des rivières ; ce fut le cas en 1981, avec les débordements de l'Ille et de la Vilaine en plein milieu du mois de mai.

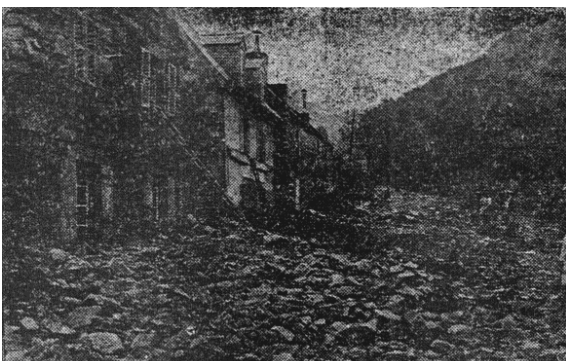
On a abordé dans cette partie les crues lentes mais les inondations peuvent survenir très brutalement dans le cas de pluies d'orages tombant sur des sols imperméabilisés, comme c'est souvent le cas en milieu urbain. Ces orages sont décrits dans le chapitre qui suit, traitant des événements extrêmes.

2.5. QUELQUES EVENEMENTS EXTREMES

Sont ici présentés certains événements météorologiques dont la probabilité d'apparition est faible et dont les conséquences ont été lourdement dommageables. Certains sont restés gravés dans les mémoires, d'autres ont laissé des souvenirs plus évanescents. Au début du 20^e siècle, les journaux faisaient fréquemment le récit de « formidables tempêtes » et d'« effroyables orages », démontrant la grande vulnérabilité des populations de marins pêcheurs et de paysans de l'époque aux coups de vent et aux orages. Quant aux épisodes neigeux, ils n'ont véritablement été relatés dans la presse qu'avec la démocratisation de l'automobile. Ces événements remarquables ont parfois donné lieu à des articles dans des revues spécialisées, ou à la rédaction de rapports dans le cadre de la procédure de reconnaissance des catastrophes naturelles instituée en 1982. Ils sont depuis quelques années systématiquement renseignés à Météo-France dans une « Base de donnée des événements marquants » (BDEM) d'où est tiré l'essentiel de la matière de ce chapitre.

2.5.1. Les orages

Ne sont retenus ici que les fortes précipitations qui peuvent accompagner les orages. Les exemples ci-dessous sont marquants car ils ont touché des zones fortement urbanisées (amplification des dégâts par rapport à un orage de rase campagne).

	Du 15 au 17 septembre 1929
Violents orages entre Saint-Brieuc et Dol-de-Bretagne	
	Selon les mesures météorologiques disponibles à cette époque, on recueille : • le 16 : 136 mm à Fréhel ; • le 17 : 87 mm à Dol-de-Bretagne et 247 mm à St-Malo. Les 247 mm recueillis à St-Malo constituent, à ce jour, ce qui serait le record absolu de précipitation en 24 heures pour le Grand Ouest.
	Dans la région de Dinan, plusieurs victimes sont ensevelies sous leur maison ou emportées par les eaux. La banlieue de St-Malo est inondée. La partie basse de la ville de St-Brieuc est submergée.
Figure 2.16 : pavés arrachés par les eaux en bas de la côte du Gouët à Saint-Brieuc (source : Ouest-Eclair du 19.09.1929).	



4 juillet 1973

Déluge sur Saint-Brieuc et sa région



Un orage très violent éclate en soirée.

On recueille en l'espace d'une à deux heures :

- 53 mm à Ploufragan
- 83 mm à Plaintel
- 124 mm à Bréhand

Des torrents d'eau et de boue dévalent St-Brieuc. Les pavés sont arrachés, les voitures emportées.

Le bilan est de deux morts, des dizaines de blessés et plusieurs centaines de sans-abri. Un peu plus loin, ces orages provoquent des glissements de terrain qui perturbent la circulation des trains.



20 mai 1990

Quimper sous des pluies diluviennes



Des orages éclatent qui donnent 112 mm à Quimper (29), en un peu moins de 6 heures.

Des torrents de boue envahissent la partie basse de la ville.



30 juin 2009

Inondation de la métropole rennaise



Des orages se développent l'après-midi. Les précipitations dépassent localement les 50 mm en une heure.

De nombreux dégâts (inondations, effondrement de la toiture d'un magasin) sont observés à Rennes et aux alentours.

Remarque : deux mois et demi après cet orage d'exception, les 19 et 20 septembre, la ville de Rennes est à nouveau affectée par de fortes pluies orageuses entraînant coupures d'électricité et inondations de certains quartiers. On relève 64 mm en l'espace de deux heures à Mézières-sur-Couesnon.

2.5.2. Les tempêtes

Sont ici recensées quelques unes des tempêtes mémorables qu'a subies la Bretagne. Les événements dus aux surcotes marines (pas forcément associés aux plus fortes tempêtes) sont traités au chapitre suivant.

On parle ici de phénomènes de vent violent de grande échelle. On ne retient pas les coups de vent d'une extrême violence : tornades ou trombes qui peuvent être observées sous certains orages. A la différence des tempêtes, ces phénomènes paroxystiques, localisés, ont une durée de vie de l'ordre de quelques minutes.



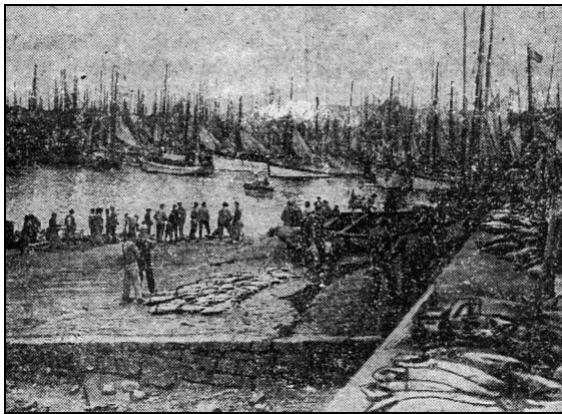
Du 18 au 20 septembre 1930

Tempête dramatique en Atlantique

En mer

La tempête surprend 600 bateaux et quelque 3 500 hommes d'équipage en campagne de pêche au thon.

Il s'agit de l'événement météorologique le plus dramatique de l'histoire récente à avoir meurtri la région.



Le vent et les paquets de mer entraînent la perte de plusieurs dizaines de dundees et la disparition de près de 207 marins, principalement des ports de Concarneau, Etel, Douarnenez, Groix et Port-Louis.

Figure 2.17 :
dundees dans le port de Concarneau
(source : Ouest-Eclair du 24.09.1930)



6 et 7 juillet 1969

Une tempête soudaine en plein été



Tempête tout à fait inhabituelle, au cœur de l'été.

On a relevé des rafales atteignant 120 à 150 km/h sur certains caps exposés et de l'ordre de 100 km/h dans les terres.

Des voiliers et leurs occupants sont portés disparus, des campings dévastés, des arbres et des toitures arrachés.



15 et 16 octobre 1987

Un ouragan majeur frappe la Bretagne



Le baromètre s'abaisse à Ouessant jusqu'à 948 hPa - pression minimale jamais enregistrée en France métropolitaine.

On relève des rafales de :

- 220 km/h à Penmarc'h et 176 km/h à Ouessant
- 176 km/h à Saint-Brieuc
- 166 km/h à Lorient

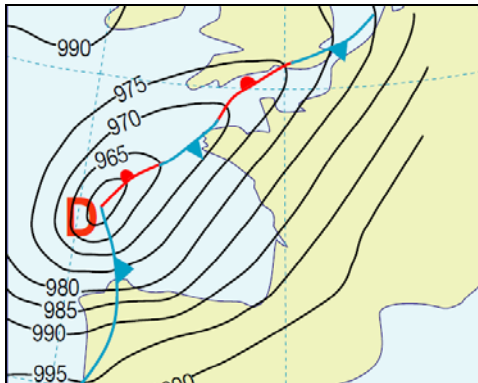


Figure 2.18 :
analyse du 15 octobre 1987 à 18 UTC

Le paroxysme de la tempête a eu lieu en milieu de nuit du 15 au 16, ce qui a permis de limiter le nombre de victimes. Les dégâts matériels sont immenses par leur ampleur comme par leur étendue.

Sous l'effet du vent et des fortes pluies, le quart de la forêt bretonne est jeté à terre.

Grâce à de faibles coefficients de marée, les vagues et les effets de surcote n'ont eu que des effets limités à la côte.



26 et 27 décembre 1999

Les tempêtes de Noël 1999



En l'espace de 36 heures, deux très violentes tempêtes balayent la France dont la première, dénommée « Lothar », dans la nuit du 25 au 26, avec un vent qui atteint :

- 173 km/h à St-Brieuc
- 158 km/h à Dinard
- 162 km/h à Groix

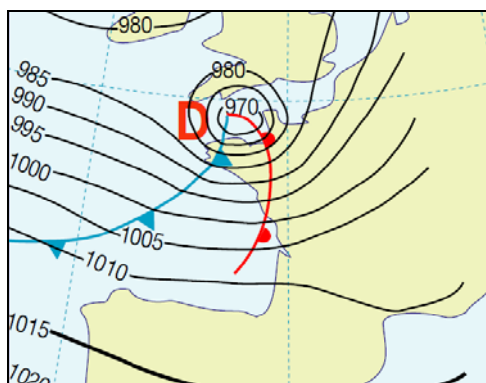


Figure 2.19 :
analyse du 26 décembre 1999 à 03 UTC

En Bretagne, 200 000 foyers sont privés d'électricité. On compte un grand nombre d'arbres déracinés et de toitures arrachées.

Les forêts bretonnes sont à peu près épargnées, sauf celle de Fougères.

Des inondations font suite aux fortes pluies qui accompagnent ces tempêtes.

2.5.3. Les submersions marines et fortes vagues

Submersions marines et fortes vagues sont des phénomènes générés par des vents soufflant à la fois longuement et violemment sur de grandes étendues d'eau. Ils se distinguent du tsunami qui fait suite à un tremblement de terre, une éruption volcanique ou à l'effondrement d'une falaise dans la mer. Ces phénomènes de submersion marine sont favorisés par les forts coefficients de marée, ce qui fait la réputation destructrice des tempêtes d'équinoxe.



Du 2 au 4 février 1904

Raz-de-marée sur les côtes de l'Atlantique



Tempête avec forts vents de Sud associée à des coefficients de marée de 108 à 114.

Des maisons de Roscoff, de Penmarc'h, du Conquet, de Loctudy, de Douarnenez, de Hennebont et de Groix sont envahies par les eaux. Des bateaux sont fracassés sur les quais. Des digues sont rompues et des prairies recouvertes d'eau.



9 Janvier 1924

Un vaste raz-de-marée ressenti d'Ouessant à l'Espagne



Au passage de la dépression, on enregistre à Lorient une pression de 972 hPa.

Coefficient de marée de 97.



Raz-de-marée dont les effets se sont fait sentir depuis Ouessant jusqu'à l'Espagne.

Des embarcations sont jetées à la côte ou détruites, même à l'abri des ports. Des jetées et des digues sont endommagées, des caves noyées. Les égouts refoulent et inondent certains quartiers de Vannes. A Carnac, les marais salants sont en partie submergés.

Figure 2.20 :
les brèches faites par la mer dans la digue de Batz lors
d'un événement de même nature en 1937
(source : Ouest-Eclair du 16.03.1937)



Du 11 au 13 janvier 1978

Raz-de-marée destructeur sur les côtes de Manche



Coup de vent de Nord coïncidant avec des coefficients de marée de 106.



Cette tempête a entraîné l'inondation de nombreux terrains littoraux dans la région de Plougrescant et de Saint-Brieuc.

Des jetées, des digues sont endommagées, des blocs de béton d'une tonne sont déplacés par les vagues.

Figure 2.21 :
pages du Télégramme de Brest du 13.01.1978



10 Mars 2008

Fortes vagues en Atlantique et raz-de-marée



Au passage d'une dépression 955 hPa sur les Iles britanniques, le vent souffle en tempête pendant une douzaine d'heures, levant de très grosses vagues. La conjonction du phénomène de surcote lié aux basses valeurs de pressions, de très fortes vagues et d'un fort coefficient de marée (coefficient de 106) provoque de gros dégâts à la côte.



Des paquets de mer inondent un grand nombre de communes du littoral compris pour l'essentiel entre Vannes et Paimpol ; des bateaux sont drossés à la côte, des portions de digues sont enfoncées par les vagues.

On déplore la mort d'un promeneur venu contempler la mer en furie.

Figure 2.22 :
les quais de Douarnenez envahis par la mer
(source : site internet Ouest-France)

2.5.4. Neige et verglas



Du 7 au 11 février 1983

Des chutes de neige record dans la région brestoise



Il neige abondamment sur le littoral du Finistère et le centre de la Bretagne. Le 11 au matin, on relève :

- 41 cm à Landivisiau
- 32 cm à Brest
- de 25 à 30 cm de neige par endroits dans les Côtes-d'Armor

Le sol à Brest est ensuite resté enneigé 13 jours consécutifs du 7 au 19 février.

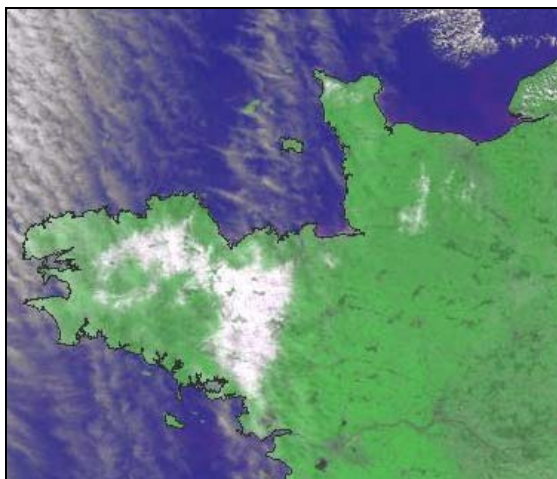


26 et 27 février 2004



Chutes de neige généralisées mais irrégulières. Les épaisseurs les plus remarquables sont observées dans le Morbihan et les Côtes-d'Armor :

- de 10 à 15 cm sur la Presqu'île de Rhuys et jusqu'à 40 cm dans l'intérieur du Morbihan
- de 15 à 20 cm sur l'est du département des Côtes-d'Armor et jusqu'à 30 cm à Caulnes



Ces chutes de neige ont provoqué de sérieuses difficultés de circulation, des coupures d'électricité (surtout dans le Morbihan) et des effondrements de bâtiments agricoles sous l'effet du poids de la neige.

Figure 2.23 :
sols enneigés, le 2 mars 2004 vers 13 UTC, tels qu'ils
apparaissent après traitement informatique d'une
image prise par un satellite de la NOAA
(source : Météo-France).



Du 5 au 10 janvier 2010



Dans un courant de Nord, passage le 5 d'un front neigeux, suivi d'un régime de giboulées neigeuses. Les Côtes-d'Armor et le nord du Morbihan sont plus particulièrement affectés.

On relève des épaisseurs de neige records avoisinant 50 cm vers Plésidy et Bulat-Pestivien, dans les Côtes-d'Armor, et de 35 cm vers Langoëlan et Ploerdut, dans le Morbihan. Le redoux du 12 est précédé de pluies verglaçantes. Les dernières traces de neige ne disparaissent que le 17.



Les conditions de circulation ont été longuement difficiles, provoquant l'arrêt du ramassage scolaire et de la collecte de lait dans plusieurs secteurs.

On relève là encore des effondrements de bâtiments agricoles sous le poids de la neige.

Figure 2.24 :
toiture d'un bâtiment agricole effondrée à Lanrodec
(source : site internet Ouest-France)



Du 1^{er} au 3 décembre 2010



Dans un courant de Nord, des giboulées neigeuses persistantes finissent par générer d'importantes épaisseurs de neige :

- de 15 à 20 cm sur une grande partie du département des Côtes d'Armor, 22 cm à St Brieuc, parfois plus de 30 cm dans le Trégor
- 15 cm à Brest, 23 cm à Landivisiau, 34 cm à Pleyber-Christ et jusqu'à 40 cm dans les Monts d'Arrée



Les épaisseurs de neige sont à nouveau remarquables. Les impacts, sur la circulation et les toitures, sont similaires à ceux de janvier 2010.

La fonte rapide de cette neige conjuguée à de fortes pluies a entraîné localement des inondations les 4 et 5 décembre.

Figure 2.25 :
des épaisseurs de neige inhabituelles,
ici à Ploufragan près de St-Brieuc

3. Le changement climatique global

Le climat de la Terre varie selon les époques et les lieux. Les changements observés s'étalent généralement sur des longues périodes qui atténuent la perception que l'homme peut en avoir à un moment donné. Cependant, ces dernières décennies, le changement climatique semble s'être accéléré. Dès lors, de nombreuses interrogations se posent sur la réalité de ce changement, ses causes mais aussi sur ses conséquences. La science apporte des réponses, souvent partielles ou temporaires, mais avec un souci constant d'objectivité.

De nouveaux outils d'investigations de par la modélisation et le volume considérable de données accumulées récemment, comme par exemple tout le travail d'homogénéisation de séries de mesures entamé par Météo-France, permettent à la science une progression par étapes successives et rapides, donnant à un instant donné, l'état de l'art en la matière.

Le climat est défini comme étant les conditions atmosphériques moyennes (température, précipitation, vent...) qu'il fait en un endroit donné. Il se caractérise par ses valeurs moyennes, ses extrêmes et ses variations. Depuis des milliards d'années, le climat varie continuellement du fait de facteurs naturels externes :

- sur plus de 10 000 ans : paramètres astronomiques
- sur plus de 10 ans... : activité solaire
- sur quelques saisons, mois... : phénomènes océaniques
- sur quelques mois : rejets massifs d'aérosols

Une variabilité interne au système climatique existe aussi par les interactions entre différentes composantes : atmosphère, océans, surfaces continentales, banquise, calottes glaciaires, etc.

L'énergie reçue du Soleil sous forme de rayonnement est le moteur de la machine climatique : l'inclinaison de la Terre sur son orbite explique les saisons, l'atmosphère régule les différences d'énergie entre équateur et pôles par ses mouvements de grande échelle.

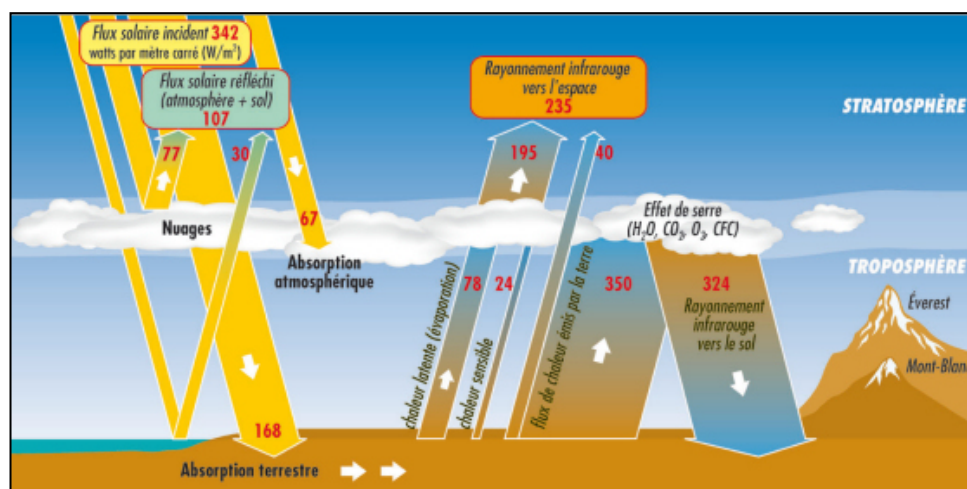


Figure 3.1 :
bilan radiatif de la Terre en watts par mètre carré (W/m²)

Le rayonnement solaire (342 W/m^2) traverse l'atmosphère et chauffe directement la surface de la Terre. En retour, notre planète renvoie de la chaleur vers l'espace sous forme de rayonnement infrarouge. L'effet d'albédo concerne la fraction du rayonnement solaire directement renvoyé vers l'espace (réflexion ou diffusion) par la surface terrestre ou par l'atmosphère. Les gaz à effet de serre, présents naturellement dans l'atmosphère, retiennent une partie de ce rayonnement terrestre et le renvoient vers le sol, provoquant un réchauffement de la basse atmosphère.

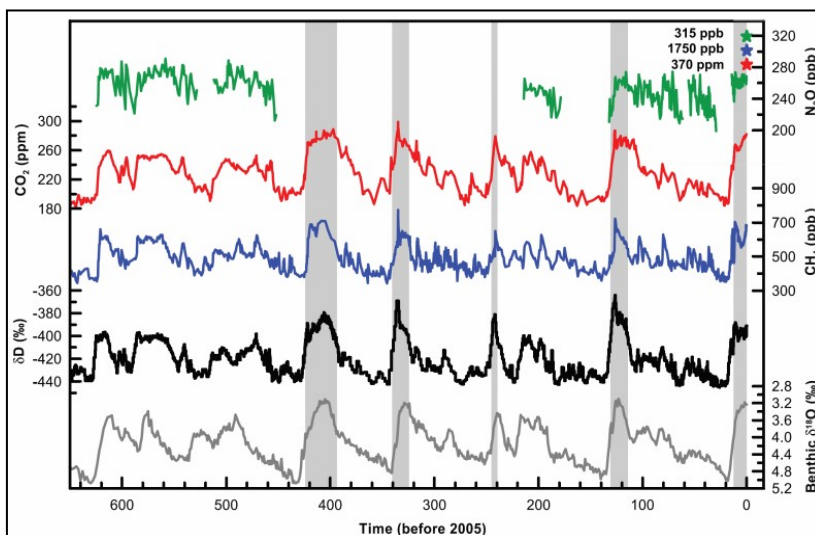
L'effet de serre est un phénomène naturel et bénéfique car il garantit le maintien d'une température moyenne de 15°C . Sans lui, la température moyenne de la surface de la Terre avoisinerait -18°C . L'évaluation du flux de rayonnement sur une année pour les milieux Terre, Atmosphère et Espace permet d'établir un bilan radiatif.

Pour identifier l'importance d'un mécanisme particulier, tel que l'effet de serre, la difficulté est de parvenir à séparer son signal du "bruit" ambiant, généré par l'ensemble des variations, et à faire la distinction entre origine humaine et variabilité naturelle.

3.1. L'EVOLUTION DU CLIMAT GLOBAL

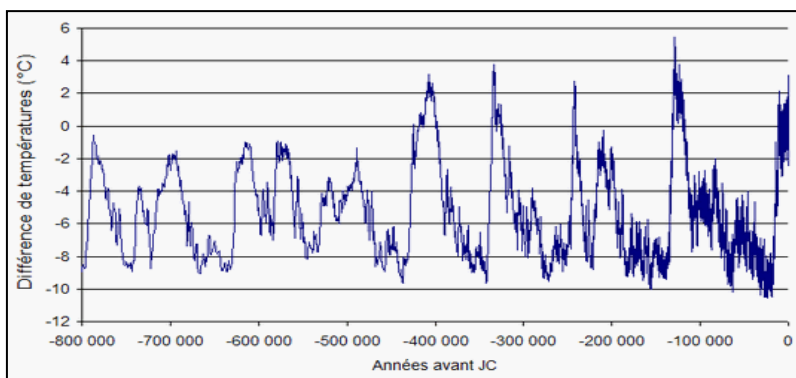
3.1.1. Le lien avec les gaz à effet de serre (GES)

La composition de l'atmosphère est dominée à 99 % par l'azote et l'oxygène depuis au moins un million d'années. Pourtant, les propriétés radiatives de certains gaz très minoritaires, au premier rang desquels le dioxyde de carbone (CO_2), ont des conséquences climatiques importantes. C'est bien parce que les gaz à effet de serre sont si peu abondants (moins de 0,1 % tous gaz confondus hors vapeur d'eau) que l'humanité a la capacité d'en modifier sensiblement la concentration.



Les mesures des concentrations en GES sont issues des bulles d'air des forages glaciaires en Antarctique et des mesures atmosphériques récentes. Les zones grisées indiquent les périodes interglaciaires. Les GES (CO_2 en rouge et CH_4 en bleu) sont très corrélés avec la température. Les concentrations atmosphériques en 2000 sont pointées par des étoiles (par exemple 370 parties par million volume pour le CO_2) et dépassent de loin les variations naturelles durant les 650 000 dernières années.

Figure 3.2 : relations entre température et gaz à effet de serre depuis 650 000 ans (source : IPCC, 2007a)



Les températures connaissent des cycles d'à peu près 100 000 ans pendant lesquelles elles varient de 8 à 12 °C, ce sont les cycles des périodes glaciaires-interglaciaires. L'origine de ces changements est la variation de l'orbite terrestre. Il y a ensuite une amplification due à des modifications de la composition de l'atmosphère en GES.

Figure 3.3 :
cycles des périodes glaciaires_interglaciaire depuis 800 000 ans
(source : Jouzel, J., et al. 2007, *Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years*, Science, Vol. 317, No. 5839, pp.793-797, 10 August 2007)

Aussi, l'essentiel de l'accroissement observé sur la température moyenne globale depuis le milieu du XX^e siècle est très vraisemblablement dû à l'augmentation observée des gaz à effet de serre anthropiques.



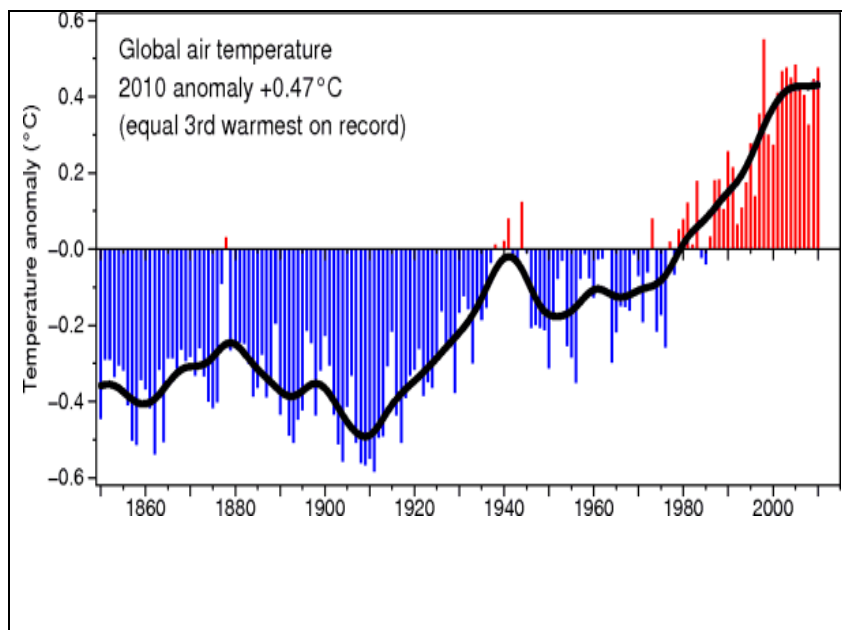
Les carottes de glace donnent des informations sur l'atmosphère à l'époque où la glace s'est formée : plus on creuse profondément, plus on obtient des informations anciennes. Sur un site, on a atteint une profondeur de presque 3,2 km, équivalente à une remontée de 800 000 ans.

Cette carotte glaciaire de 3 028,80 mètres de long, effectuée en Antarctique, a été découpée avant d'être soigneusement marquée puis analysée.

Figure 3.4 :
carotte de glace effectuée en Antarctique
(© CNRS, Photo : R. Delmas)

3.1.2. Evolution récente du climat du globe

Ainsi en un siècle (1906-2005), la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 0,74 °C. La hausse des températures a accru la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.



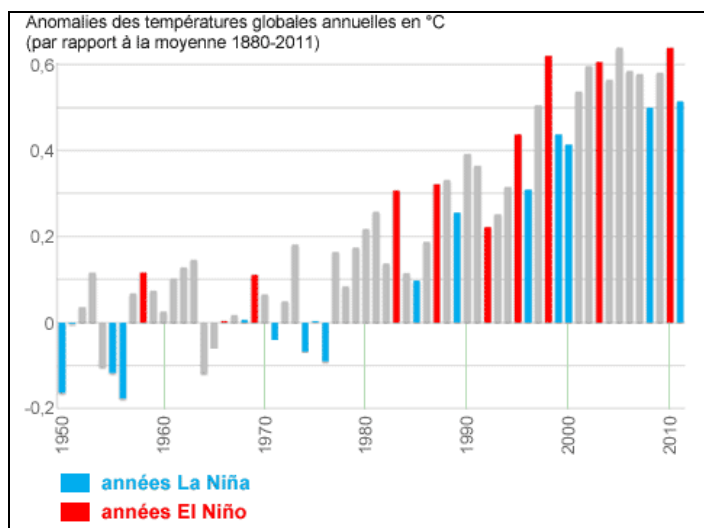
La courbe lissée noire montre l'évolution des températures : on constate sur les 50 dernières années une accélération du réchauffement. Les écarts à la température moyenne sur la période 1961-1990 pour la surface de la Terre sont supérieurs à la moyenne depuis les années 80 (en rouge).

L'année 2010 est chaude : elle se place au 3^e rang sur plus d'un siècle, avec +0,47 °C par rapport à la moyenne.

Figure 3.5 :
évolution entre 1850 et 2010
de la température moyenne à la surface de la terre,
écarts à la moyenne 1961-1990
(source : Met Office Hadley Centre for Climate Change)

Au niveau mondial, L'année 2011 est la onzième année la plus chaude depuis 1880. C'est aussi la 35^e année consécutive, c'est-à-dire depuis 1976, avec une température moyenne supérieure à la normale. Cette année 2011 est l'une des plus chaude recensée dans l'Ouest de la France depuis un siècle.

Des phénomènes climatiques locaux peuvent affecter le climat général. Outre la Mousson bien connue en Asie, un de ceux-ci est l'oscillation australe - El Niño (ENSO : pour El Niño-Southern Oscillation), qui correspond à des fluctuations de la température de surface océanique et de la pression atmosphérique au niveau de l'océan Pacifique équatorial. Pendant une période de quelques mois à plusieurs années, cette région connaît des conditions de température de surface de l'océan supérieure à la normale (« années El Niño ») ou inférieure à la normale (« années La Niña »).

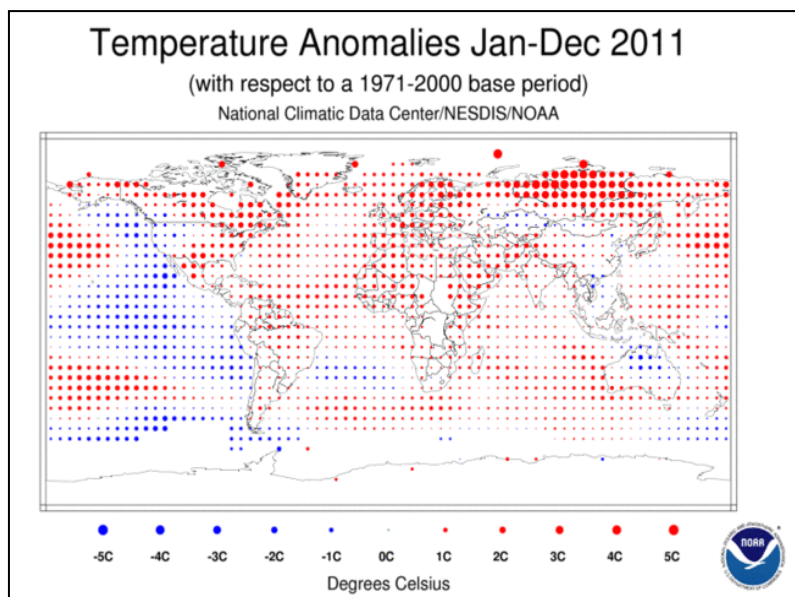


L'année 2011 a connu une période La Niña assez importante. Les périodes La Niña créent des conditions d'eaux froides dans le Pacifique équatorial oriental et central, qui influencent les températures globales. C'est pour cette raison que les années avec La Niña sont plus froides que les années environnantes.

Or, l'année 2011 est l'année avec La Niña la plus chaude depuis 1950.

Figure 3.6 :
anomalies des températures globales annuelles (en °C)
par rapport à la moyenne 1880-2011
(source : www.universcience.fr/climobs)

A l'échelle de la planète, les années chaudes, supérieures à la normale, se succèdent, sans forcément être plus chaudes que les années précédentes, car le climat connaît ses propres variations naturelles.



Les écarts de températures par rapport à la normale ne se répartissent pas de manière homogène sur l'ensemble de la planète.

Figure 3.7 :
anomalies de températures de l'année 2011
par rapport la normale 1971-2000
(source : National Climatic Data Center/NOAA)

Du fait de l'importance de la variabilité spatiale et temporelle de la température, **c'est bien au niveau global que le réchauffement climatique doit s'appréhender.**

En ce qui concerne les précipitations, les moyennes annuelles globales, ne montrent pas de tendance claire dans leur évolution au fil du XX^e siècle. Si les pluies se sont significativement accrues dans différentes régions du globe, à l'inverse un assèchement a été observé dans le Sahel, en Méditerranée, au sud de l'Afrique et dans certaines parties d'Asie. Une partie de l'explication tient à la nature plus locale des précipitations. C'est davantage aux échelles régionale et saisonnière, voire quotidienne, que des signaux encore peu affirmés commencent à apparaître tels que la diminution du nombre de jours de pluie aux moyennes latitudes en été.

3.1.3. Evolution récente du climat en France

Le réchauffement sur la France est un peu supérieur à celui observé à l'échelle de la planète.

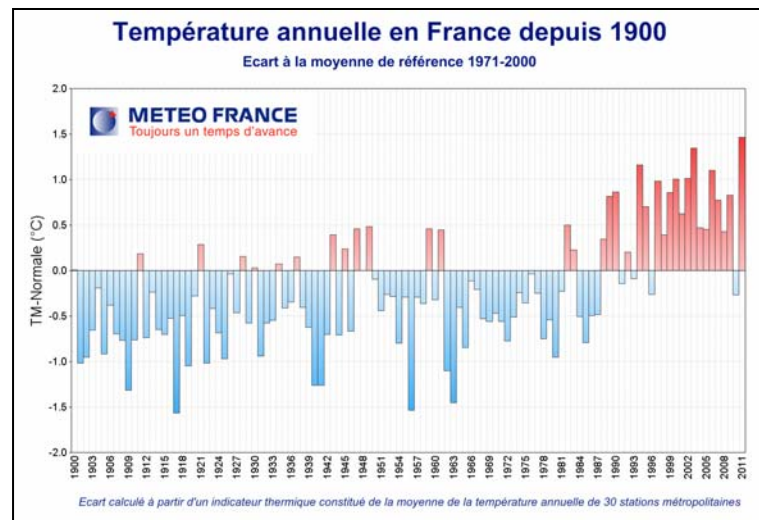


Figure 3.8 :
température annuelle en France depuis 1900 (écart à la normale 1971-2000)

On retrouve, aussi, une température annuelle moyenne supérieure à la normale depuis les années 1980. Mais, il est possible de constater que l'année 2010, par exemple, s'est révélée en dessous de cette normale, bien qu'au niveau planétaire l'année 2010 fût une année chaude.

Du point de vue géographique, l'écart par rapport à la valeur moyenne n'est pas homogène sur le territoire.

L'année 2011 est l'année la plus chaude qu'ait connue la France métropolitaine depuis 1900. La température moyenne annuelle dépasse de 1,5 °C la référence 1971-2000. Elle surpasse ainsi celle de 2003 (+1,3 °C), précédent record depuis 1900.

(le relief est masqué en noir)

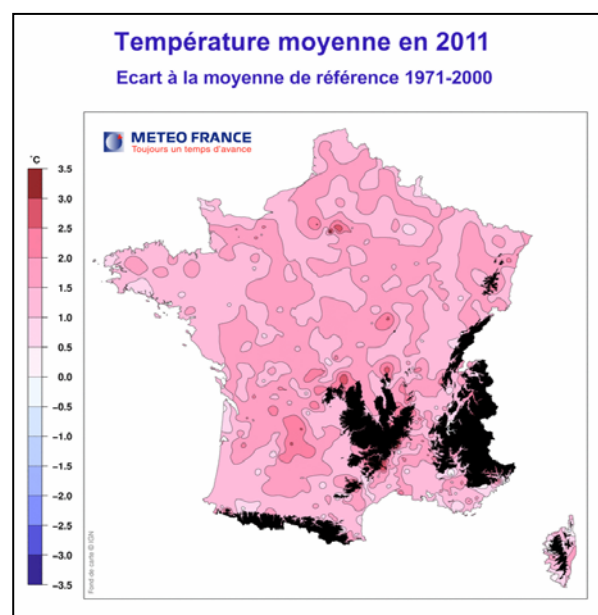


Figure 3.9 :
température moyenne en France en 2011
(écart à la moyenne 1971 -2000)

3.1.4. La part des Gaz à Effet de Serre

La comparaison entre les observations et les simulations du climat permet d'attribuer l'essentiel du réchauffement climatique des 50 dernières années aux GES d'origine humaine. En effet, les simulations qui ne prennent pas en compte l'augmentation de la concentration des GES liés aux activités humaines ne parviennent pas à reproduire correctement le climat observé durant les 100 dernières années. Les principaux GES sont d'origine naturelle ou liée aux activités humaines :

- vapeur d'eau : premier gaz à effet de serre présent naturellement dans l'atmosphère ;
- dioxyde de carbone (CO_2) : émis par les éruptions volcaniques, feux de forêts et issu de la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) et de la déforestation. Le CO_2 est, parmi les gaz à effet de serre d'origine humaine, celui qui joue le rôle le plus important, en raison de sa concentration plus élevée et de sa longue durée de vie dans l'atmosphère : environ 20 % du CO_2 émis aujourd'hui sera présent dans l'atmosphère dans 1 000 ans ;
- méthane (CH_4) : émis par les marécages et par divers processus de fermentation (ruminants, décharges) ;
- protoxyde d'azote (N_2O) : les émissions de N_2O proviennent essentiellement des phénomènes de nitrification / dénitrification dans les sols cultivés notamment du fait de l'utilisation d'engrais azotés minéraux et de la gestion des déjections animales. D'autres sources importantes ont été identifiées telles que certains procédés industriels ;
- chlorofluorocarbures (CFC) ;
- ozone (O_3) troposphérique.

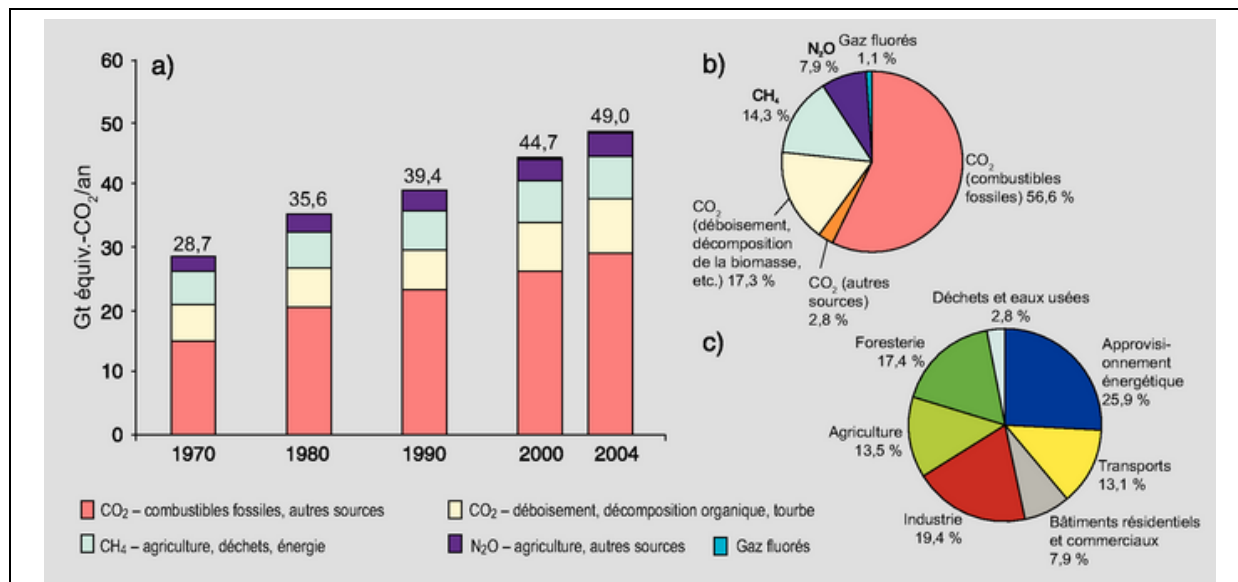
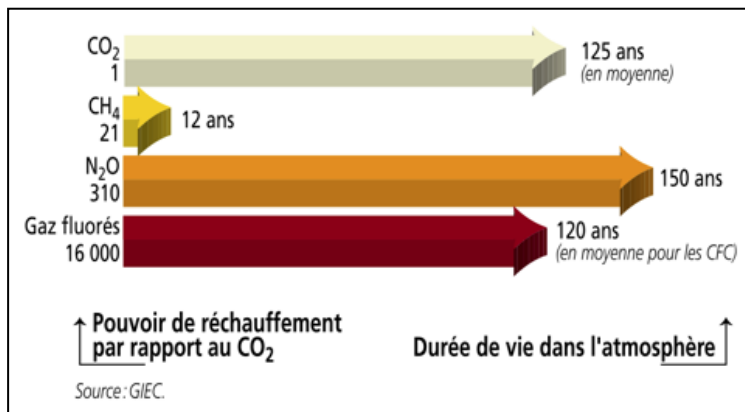


Figure 3.10 :
émissions mondiales de gaz à effet de serre anthropiques
(source : GIEC)

Le graphique a) présente les émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, entre 1970 et 2004 : très nette augmentation du rejet de CO_2 .

Le graphique b) indique les parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004 : le CO_2 est prépondérant.

Le graphique c) renseigne sur la contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent- CO_2 : énergie, exploitation de la forêt, industrie, agriculture et transports sont en tête.



Les gaz à effet de serre changent l'équilibre entre les radiations pénétrant l'atmosphère et celles qui s'en échappent, avec un forçage radiatif positif : ils augmentent la température au sol en empêchant les infrarouges de rayonner vers l'espace. Cependant, selon la nature du gaz, ce forçage radiatif est plus ou moins important et la durée de présence dans l'atmosphère est, elle aussi, plus ou moins longue.

Figure 3.11 :

forçage radiatif et durée de vie des GES

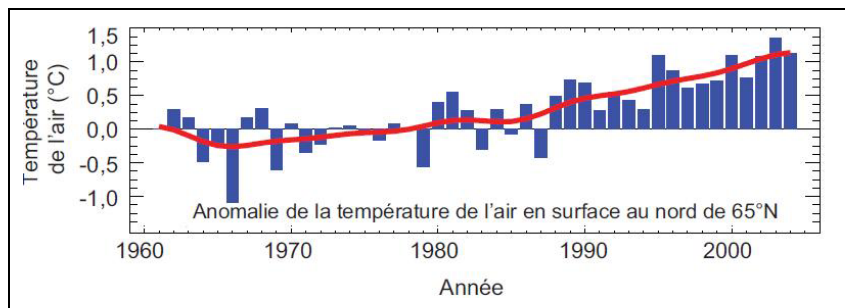
(source GIEC, 1996. Les forçages radiatifs ont fait l'objet de nouvelles estimations depuis. Voir http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm)

3.2. DES IMPACTS DEJA VISIBLES

Le changement climatique s'entend comme une variation de l'état du climat que l'on peut déceler, par exemple au moyen de tests statistiques, par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période. A l'échelle du globe, plusieurs signes de ce changement sont perceptibles.

3.2.1. Températures de l'atmosphère et de l'océan

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. Sur le globe, selon le GIEC : « il est très probable que les journées froides, les nuits froides et le gel ont été moins fréquents sur la plus grande partie des terres émergées depuis cinquante ans et que le nombre de journées chaudes et de nuits chaudes ont au contraire augmenté. »



Série chronologique des anomalies (écart par rapport à la moyenne) de la température de l'air polaire en surface. Le réchauffement y est très supérieur à la moyenne du globe.

Figure 3.12 :

série chronologique des anomalies de température de l'air polaire en surface par rapport à la moyenne

(source : document technique VI du GIEC, juin 2008)

3.2.2. Le niveau des océans

Le niveau des océans est mesuré depuis deux à trois siècles par des instruments appelés marégraphes. Ces observations montrent que ce niveau s'est élevé de 12 à 22 cm au cours du 20^e siècle. Depuis le début des années 90, les satellites altimétriques de très haute précision Topex-Poseidon (1993-2006), Jason-1 (2001) et Jason-2 (2008) mesurent avec précision l'élévation du niveau de la mer qui se poursuit au rythme de 3,2 millimètres par an en moyenne, soit une hausse deux fois plus rapide que celle mesurée par les marégraphes au cours des 50 dernières années. Cette hausse n'est pas uniforme : dans certaines régions comme l'Ouest du Pacifique ou le Nord de l'Atlantique, la mer a monté trois à quatre fois plus vite que la moyenne depuis 1993.

L'élévation provient en premier lieu de la dilatation thermique des eaux océaniques consécutive au réchauffement planétaire, et dans une moindre mesure, de la fonte des glaciers continentaux. La contribution de la dilatation thermique de la mer (due au réchauffement de l'océan) a triplé au cours de la dernière décennie (~1,5 mm/an pour la période 1993-2005, soit une contribution de l'ordre de 50 % à la hausse observée). La fonte des glaciers de montagne s'est aussi accélérée. Des observations récentes indiquent que leur contribution atteint 1 mm/an pour ces dernières années.

On distingue deux sortes de glaces : les calottes posées sur les continents (glaces continentales, telles la calotte de l'Antarctique et du Groenland, pouvant atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur) et les banquises (glaces de mer, qui s'étendent dans l'océan Arctique et autour de l'Antarctique, pouvant atteindre 15 mètres d'épaisseur). La fonte des glaces de mer (banquises) n'influence pas le niveau marin. En effet, les glaces de mer flottent et déplacent un volume d'eau de mer dont le poids est égal au poids de la glace (principe d'Archimède, 3^{ème} siècle avant J-C). En conséquence, si cette glace océanique fond, l'eau de fonte occupe exactement le volume d'eau de mer que la glace occupait, sans modifier le niveau marin.

Toutefois, on ne peut dire à l'heure actuelle si l'accélération du rythme qui a été constatée entre 1993 et 2003 traduit une variation décennale ou un renforcement de la tendance à long terme.

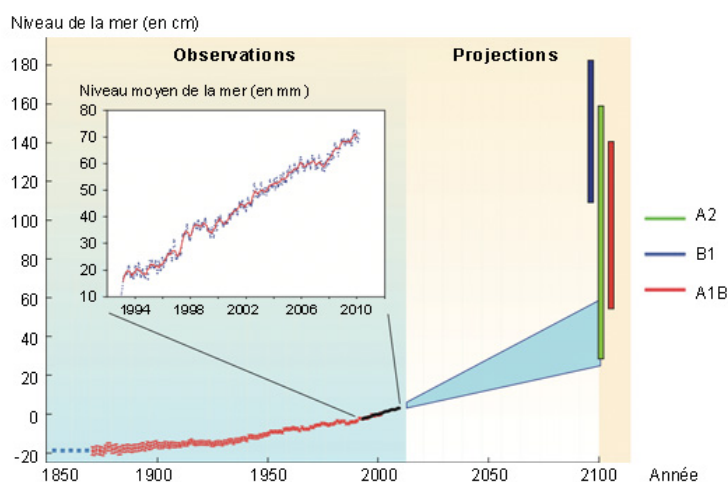


Figure 3.13 :
évolution du niveau moyen global de la mer
(crédit : CNES)

La courbe rouge est basée sur les mesures de marégraphes [Church et White, 2006], la courbe noire sur des mesures altimétriques. Des projections sur le XXI^e siècle sont également indiquées. La zone bleue claire est la projection AR4 du Giec 2007 pour les scénarios SRES d'émission de GES. Les barres verticales sont des projections semi-empiriques : en rouge [Rahmstorf 2007], en vert [Grinsted et al. 2009], en bleu foncé [Vermeer et Rahmstorf, 2009]. Face à une telle variabilité dans les projections, il convient d'être très prudent dans leur interprétation comme le souligne un récent rapport de la commission Jouzel.

Si l'on regarde l'océan dans son ensemble et non pas la seule couche de surface, via les relevés océanographiques effectués lors du dernier demi-siècle, son réchauffement est estimé à 0,04 °C. Cette faible hausse de température représente une quantité de chaleur importante : on estime que près de 90 % du réchauffement des 40 dernières années a été absorbé par l'océan. Sa masse est 300 fois plus élevée que celle de l'atmosphère, la capacité calorifique de l'eau est 4 fois plus grande que celle de l'air.

Cette élévation de la mer va renforcer la vulnérabilité du littoral, car un niveau de la mer plus élevé affectera les marées à la pleine mer et accentuera les conséquences des surcotes. Ces effets renforceront le pouvoir destructeur des tempêtes.

3.2.3. Le recul de la banquise

En moyenne sur l'Arctique, la température a augmenté deux fois plus vite que sur le reste de la planète. La surface occupée par la banquise arctique (ou glace de mer) a considérablement diminué depuis 1950, surtout en été. En Antarctique, en revanche, aucune tendance marquée n'a été détectée.

L'étendue de la surface occupée par la banquise arctique décroît fortement, en corrélation avec le réchauffement.

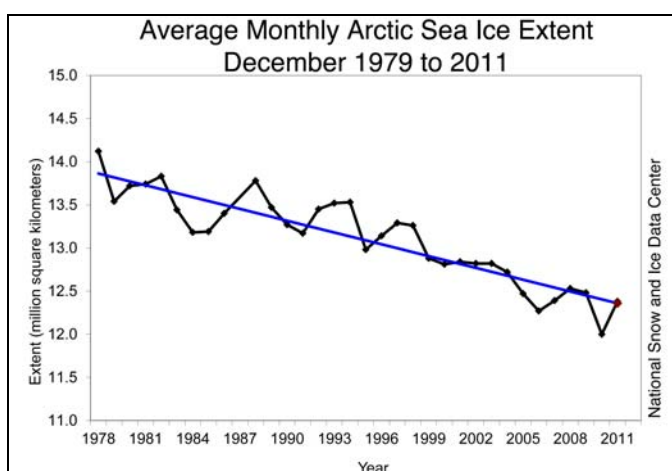


Figure 3.14 :
évolution de l'étendue moyenne en décembre de la
surface occupée par la banquise arctique
entre 1979 et 2011
(source : National Snow and Ice Data Center)

3.2.4. Neige et glaciers

La diminution observée de l'étendue des zones couvertes de neige et de glace concorde, elle aussi, avec le réchauffement. Les glaciers et la couverture neigeuse occupent une moins grande superficie dans les deux hémisphères.

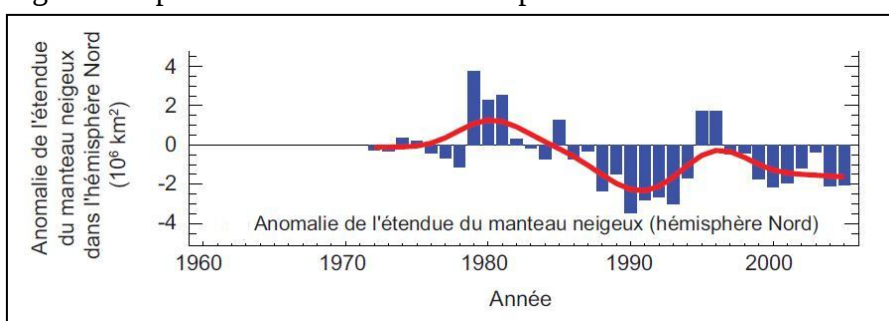
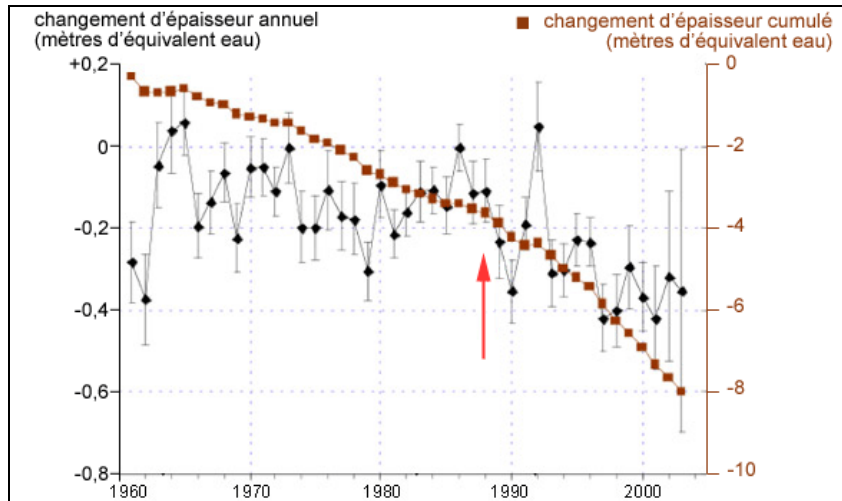


Figure 3.15 :
anomalie de l'étendue du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord
(source : document technique VI du GIEC, juin 2008)

L'étendue du manteau neigeux dans l'hémisphère Nord de mars à avril est en baisse depuis la fin des années 80.

La ligne continue rouge représente la série lissée.

Le recul des glaciers est observable presque partout dans le monde, les glaciers de montagne ont reculé au 20^e siècle : au Canada, dans les Alpes, en Asie et en Afrique, mais également dans les Andes et en Indonésie.



Les glaciers considérés excluent le Groenland et l'Antarctique ; ils couvrent environ 785 000 m². Leur épaisseur s'est en moyenne réduite de 8 mètres en 40 ans. Les pertes s'accroissent à partir de la fin des années 1980 (flèche rouge).

Figure 3.16 :
évolution de l'épaisseur des glaciers
(source : National Snow and Ice Data Center)

3.2.5. Phénomènes climatiques

A l'échelle de la planète, la fréquence de certains phénomènes s'est probablement accrue : vagues de chaleur sur la majeure partie des terres émergées, fortes précipitations dans la plupart des régions. Entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord et du Sud, dans le nord de l'Europe et dans le nord et le centre de l'Asie, tandis qu'elles diminuaient au Sahel, en Méditerranée, en Afrique australe et dans une partie de l'Asie du Sud. Il est probable que la sécheresse a progressé à l'échelle du globe depuis les années 1970 [4^{ème} rapport synthèse du GIEC, 2007].

Pour ce qui est des événements extrêmes, les études statistiques menées sur les cinquante dernières années ne montrent pas de tendance nette à l'augmentation de cyclones tropicaux dans l'Atlantique nord depuis 1970, mais leur activité se révèle plus intense.

En France, l'état des recherches ne permet pas non plus d'affirmer une augmentation de l'intensité et du nombre global de tempêtes, orages ou épisodes de grêle, ni des épisodes de pluies diluviennes dans le Sud-Est de la France.

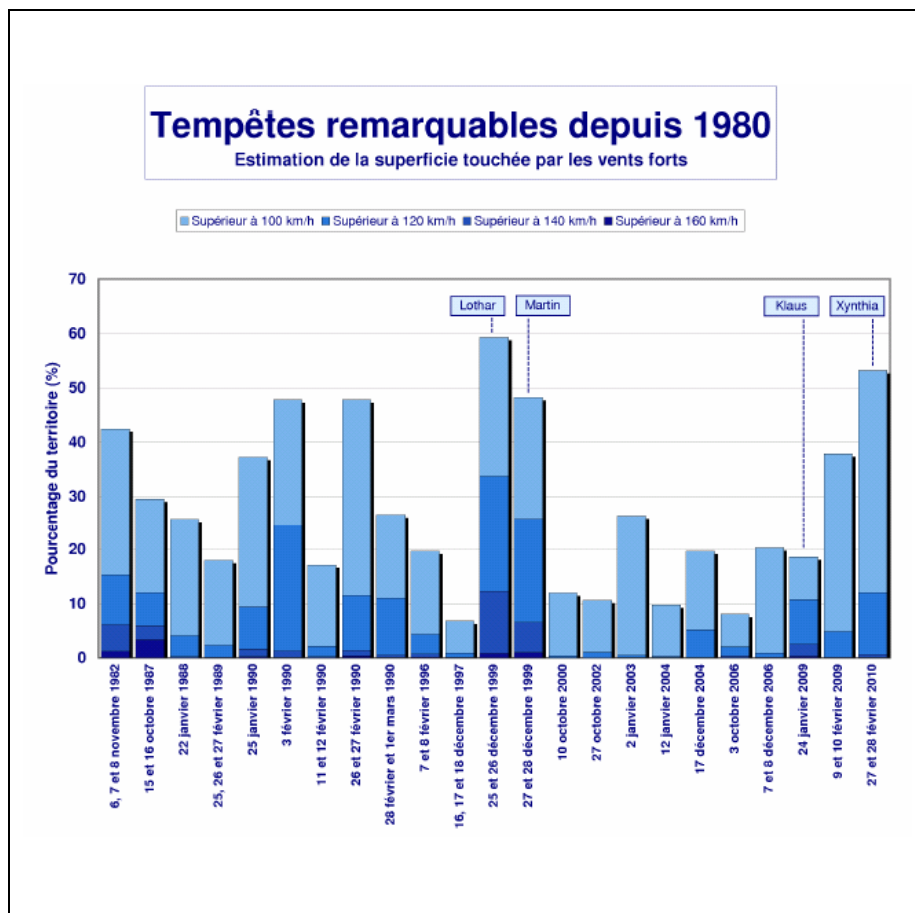


Figure 3.17 :
tempêtes remarquables en France depuis 1980

On peut ainsi voir que depuis 1980, il est difficile de dire que l'intensité ou l'étendue des tempêtes s'est renforcée.

Les tempêtes qui reviennent d'abord dans les mémoires sont évidemment les deux tempêtes meurtrières des 25 et 26 décembre 1999 (Lothar) et des 27 et 28 décembre 1999 (Martin) ainsi que les tempêtes du 24 janvier 2009 (Klaus) et des 27 et 28 février 2010 (Xynthia).

Toutefois, ces tempêtes pourraient à l'avenir avoir des conséquences plus graves avec notamment un niveau de la mer plus élevé.

3.2.6. Les écosystèmes

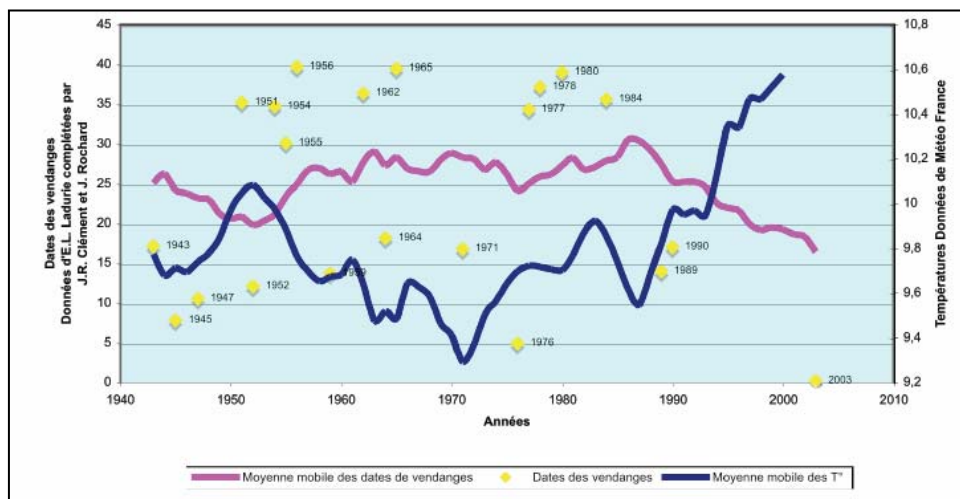
Les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures (coraux, poissons, ours polaires...). Il est probable que la résilience de nombreux écosystèmes sera annihilée durant ce siècle en raison d'une combinaison sans précédent de changements climatiques « rapides », de perturbations connexes (inondations, sécheresses, feux incontrôlés, insectes, acidification des océans, etc.).

3.2.7. La santé

Plusieurs aspects de la santé sont concernés, dont la mortalité associée à la chaleur en Europe (2003), les vecteurs de maladies infectieuses dans diverses régions et les allergies aux pollens aux latitudes moyennes et élevées de l'hémisphère Nord.

3.2.8. Les pratiques agricoles

L'élévation des températures a aussi des effets induits sur les pratiques agricoles et sylvicoles aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord (plantation plus précoce au printemps, par exemple) et les régimes de perturbation des forêts (incendies, parasites, etc.).



On constate depuis la fin des années 1980, en lien avec la hausse moyenne des températures (courbe bleue), une précocité accrue des dates de vendanges (courbe rose).

Figure 3.18 :
évolution des températures et dates de vendanges depuis 1943
(d'après J. Rochard et A. Srhiyeri, ITV France)

3.2.9. Résumé des principales conséquences

Le changement climatique est un processus complexe qui relève à la fois de l'évolution des paramètres climatiques et des conséquences de l'activité humaine.

Le graphique suivant présente les principales conséquences des changements climatiques envisagés par le GIEC, avec leurs interactions.

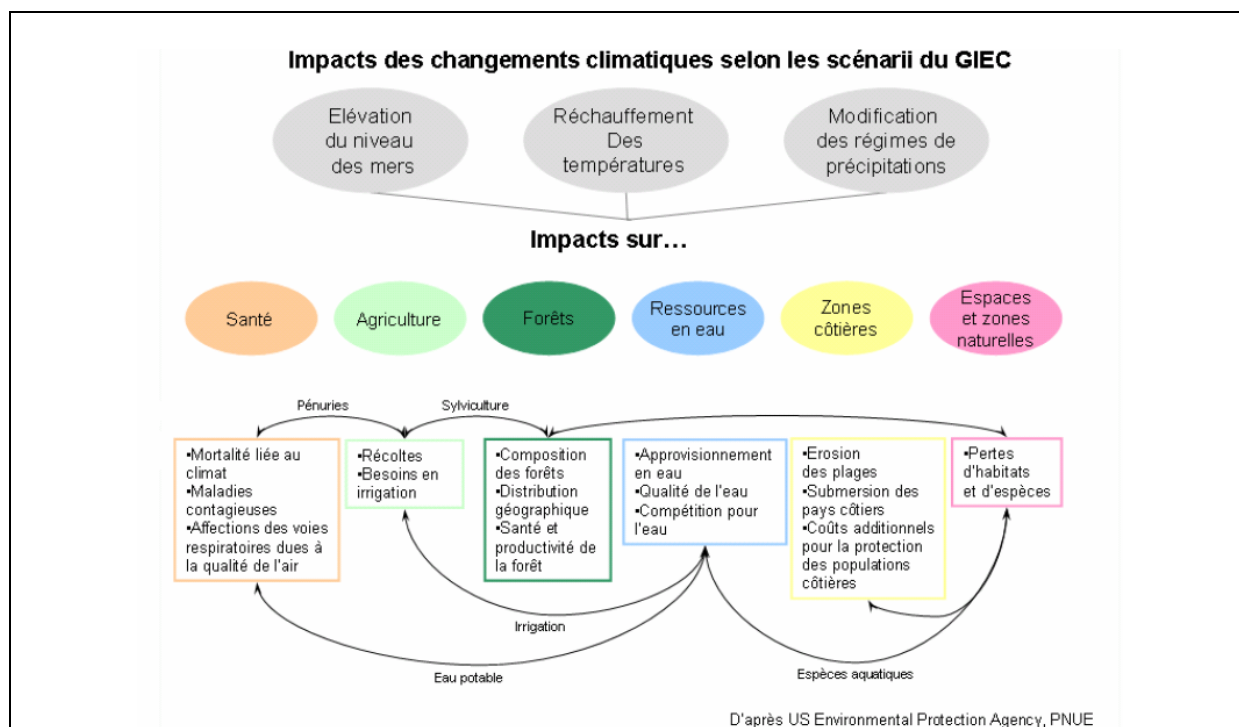


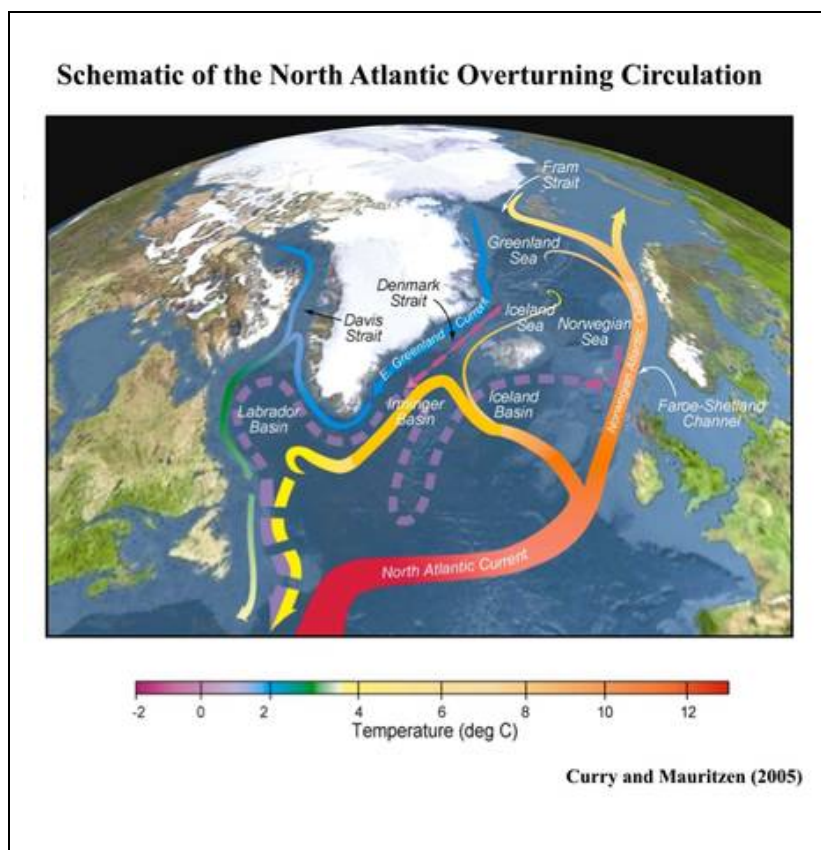
Figure 3.19 :
impact des changements climatiques selon les scénarii du GIEC
(d'après US Environmental Protection Agency, PNUE)

3.3. LE RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE ET LA BRETAGNE

3.3.1 Caractéristiques fondamentales

Le réchauffement climatique est global. Mais l'Ouest de la France dispose de caractéristiques singulières. Par sa position péninsulaire et sa situation géographique, la Bretagne bénéficie d'un climat océanique tempéré caractérisé par des hivers doux et des étés sans excès. Trois phénomènes sont responsables de la douceur hivernale de la côte Atlantique de l'Europe :

- la circulation générale des vents d'Ouest au-dessus de l'Atlantique. En hiver, les vents d'ouest dominants traversent l'Atlantique et apportent sur notre continent de l'air océanique beaucoup plus doux que l'air continental ;
- le déstockage ou libération, en hiver, de la chaleur accumulée par l'océan pendant l'été ;
- le courant chaud Nord Atlantique, prolongation du Gulf Stream. Dans son parcours vers les hautes latitudes, il transfère de l'énergie thermique à l'atmosphère : les eaux de surface, réchauffées dans les tropiques, se dirigent vers l'Atlantique Nord, tandis que les eaux refroidies « plongent » et circulent en profondeur en direction de l'Équateur.



Le Gulf Stream est un courant océanique qui se forme dans la mer des Caraïbes, par la fusion de trois autres courants : Floride, Cuba et Nord Équatorial. Il longe la côte vers le nord. Puis au sud de Terre-Neuve, il est rejoint par le courant froid du Labrador qui le ralentit et le refroidit. Ensuite, il change de direction vers le nord-est à travers l'Atlantique. On parle alors de « Dérive Nord Atlantique ». L'ensemble constitue un tapis roulant planétaire qui distribue la chaleur captée par les océans. La Dérive Nord Atlantique se sépare en deux à l'ouest de l'Irlande. Une des branches (le courant des Canaries) part vers le sud tandis que l'autre continue le long des côtes du Nord-Ouest de l'Europe.

Figure 3.20 :
carte des courants en Atlantique Nord
(copyright Ifremer/P. Lherminier)

Mais aux latitudes moyennes, ce sont les courants atmosphériques atlantiques plus que les courants marins en eux-mêmes qui sont les acteurs majeurs de la douceur de notre climat. En effet, le transport d'énergie thermique par l'océan n'est que l'une des composantes du climat des régions qui bordent l'océan Atlantique, d'autant que la Dérive Nord Atlantique passe loin de nos côtes.

Cependant, si le Gulf Stream est le facteur le moins important de la régulation du climat en Europe, il est le plus influençable de tous. Les mécanismes d'interaction entre courants marins et le climat planétaire sont complexes. Aussi, le changement de climat, et en particulier le réchauffement global, peut modifier de manière significative la Dérive Nord Atlantique.

Ainsi, la circulation thermohaline devrait s'affaiblir avec le changement climatique : les hautes latitudes vont à la fois s'échauffer et recevoir de grandes quantités d'eau douce, issues de la fonte des glaces septentrionales ; or la physique veut qu'une eau adoucie et échauffée soit moins dense. Les modèles divergent sur l'ampleur du ralentissement à venir, de négligeable à -50 %. Pour le XXI^e siècle, le GIEC considère dans son rapport 2007 comme très probable un ralentissement de la circulation thermohaline dans l'Atlantique, mais comme très improbable un changement brusque de cette circulation.

3.3.2. Variabilité temporelle et spatiale

Cette influence océanique, qui se traduit globalement par une grande douceur, présente d'un point de vue régional, une variabilité spatiale et temporelle. Ainsi, 2010 s'est révélée plus froide que la normale sur l'Ouest, alors que c'était une année particulièrement chaude au niveau planétaire, supérieure à la normale. Quant à elle, l'année 2011 s'est révélée au-dessus des normales pour l'Ouest, mais dans la même tendance qu'au niveau de la planète.

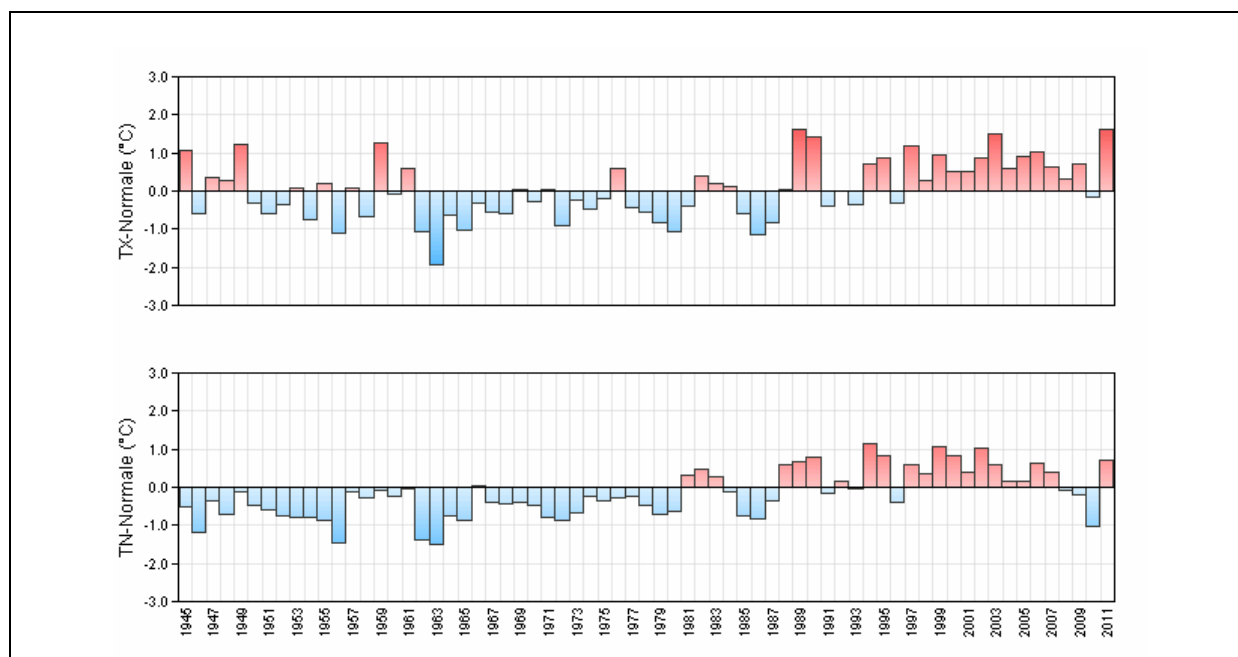


Figure 3.21 :
écart à la normale (1971–2000) des valeurs moyennes annuelles
de températures maximales quotidiennes (en haut) et minimales quotidiennes (en bas)
sur l'Ouest de la France.
(source : Météo-France)

Que ce soit pour les températures minimales ou maximales, les écarts à la normale (1971–2000) traduisent un réchauffement depuis la fin des années 1980 sur l'Ouest de la France.

De plus, la répartition spatiale des écarts à la normale n'est pas homogène sur la région, même si globalement les mêmes tendances se retrouvent d'une année sur l'autre.

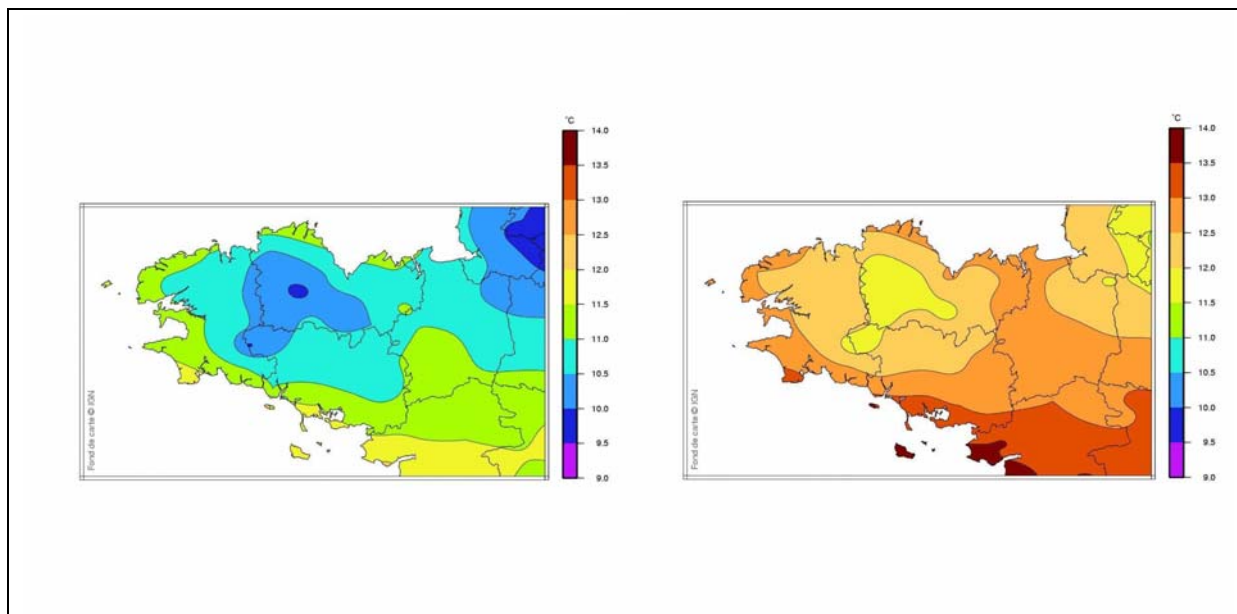


Figure 3.22 :
températures moyennes annuelles 2010 (à gauche) et 2011 (à droite)

Ainsi, 2010 est inférieure à la normale sur l'ensemble de la Bretagne, et 2011 supérieure à la normale.

En ce qui concerne les précipitations, les écarts à la normale ne permettent pas de dégager une tendance.

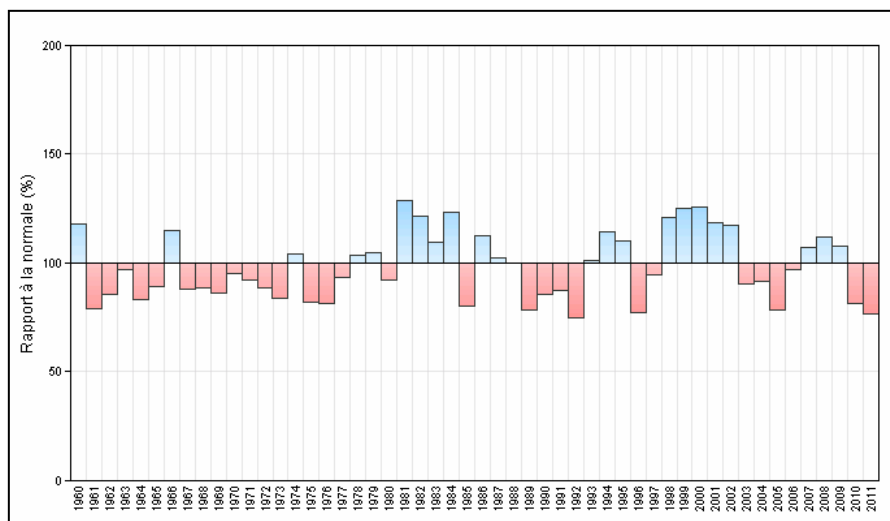


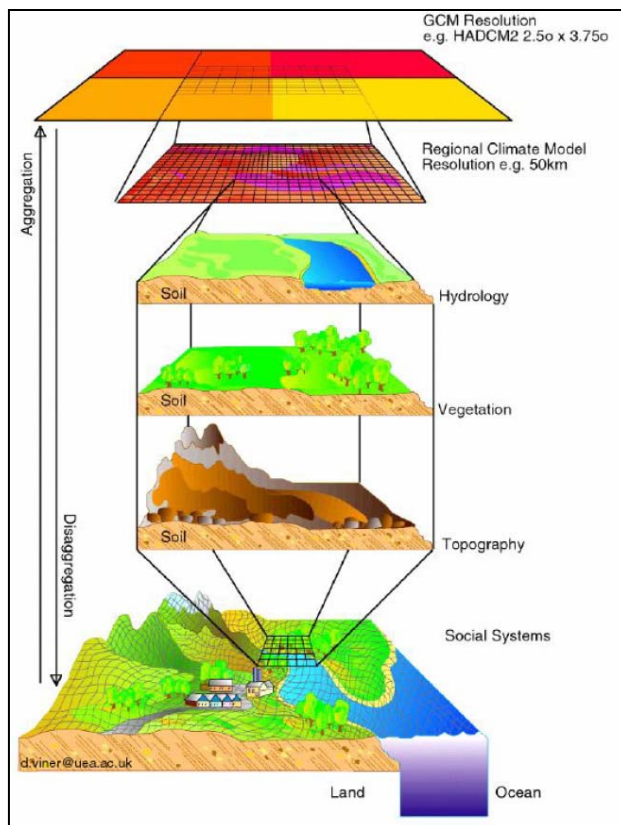
Figure 3.23 :
écarts à la normale (1971-2000) des précipitations à Rennes (35)

Pour Rennes Saint-Jacques, depuis 1960, on constate une variation des cumuls de précipitations par rapport à la normale : plusieurs années déficitaires succèdent à plusieurs années excédentaires.

3.4. LES MODELES DE CLIMAT ET LEURS INCERTITUDES

3.4.1. Les modèles climatiques

Un modèle climatique est une planète numérique, virtuelle, créée par ordinateur. Cette planète est divisée en cases (les mailles) plus ou moins nombreuses, qui s'étendent vers le haut pour l'atmosphère et vers le bas pour les océans. Les relations entre chaque case et sa voisine sont représentées par un certain nombre d'équations issues de la mécanique des fluides, de la physique de l'énergie, etc. En partant de conditions connues de température, d'humidité, de pression, de rayonnement solaire, etc., et en leur appliquant lesdites équations, les modélisateurs s'efforcent donc de simuler le comportement réel de la planète, et ainsi son devenir. Les modèles se sont considérablement améliorés depuis une trentaine d'années.

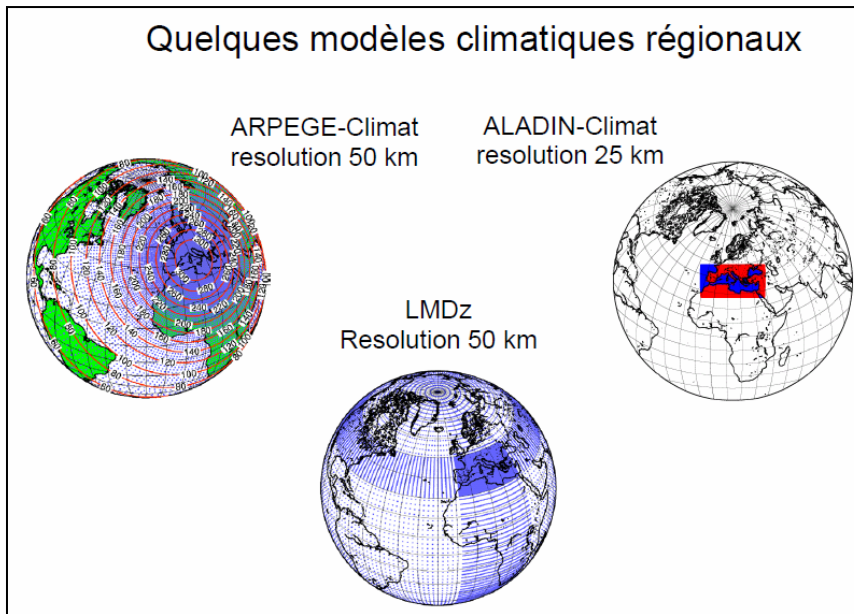


Les études climatiques classiques se font à partir de modèles numériques de la circulation générale appelés GCM (General Circulation Model) qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. La tendance actuelle quand on étudie le climat global de la planète est de coupler ces modèles atmosphériques à des modèles représentant les autres parties du système terre : l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone, etc. Quant à la maille, elle est passée d'environ 500 km à 100 km de côté pour la plupart des modèles globaux.

Figure 3.24 :
Interaction entre un modèle GCM et les modèles du système terre
(source : d.viner@uea.ac.uk)

Des hypothèses sur l'évolution future des "forçages" externes au système modélisé sont nécessaires. Ces forçages sont constitués entre autres des gaz à effet de serre et autres particules ayant un impact sur le climat. Concernant les gaz à effet de serre et les aérosols, leur évolution future est fortement liée aux activités humaines et reste très incertaine.

La résolution en termes de mailles ne permet pas de résoudre certains processus physiques régionaux qui influencent le climat d'une région particulière du globe (îles, relief complexe, vents régionaux, précipitations). Pour ces raisons, la communauté scientifique du climat a développé la notion de régionalisation climatique.



ARPEGE-Climat est un modèle climatique global développé par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM) à 50 km de résolution sur la France et 300 km aux antipodes (maille étirée)

A Météo-France, le modèle CNRM-CM est développé pour réaliser des scénarios sur le 21^e siècle.

Figure 3.25 :
Trois exemples de modèles climatiques régionaux

3.4.2. Le GIEC et les scénarios

Pour expertiser l'information scientifique, technique et socio-économique qui concerne le changement climatique, le GIEC, Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (en anglais IPCC), est mis en place en 1988 à la demande du G7, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale et du Programme des Nations Unies pour l'environnement.

Depuis sa création, le GIEC a élaboré quatre rapports d'évaluation (1990, 1995, 2001 et 2007). Le dernier rapport comprend, comme les précédents, un premier volet sur les bases scientifiques du changement climatique, un deuxième volet sur les impacts des changements et sur l'adaptation dans les différents secteurs socio-économiques, un troisième volet sur la réduction des émissions et une synthèse.

Pour anticiper ce que seront les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, le GIEC a défini en 1990 un ensemble de scénarios socio-économiques pour le 21^e siècle. Les scénarios de type A correspondent à une croissance démographique et économique rapide. Les scénarios de type B supposent que des mesures environnementales seront prises dans l'avenir. En outre, deux types de scénarios existent pour l'évolution technologique :

- type 1 : transfert de technologie (vers des énergies non fossiles non émettrices de GES) ;
- type 2 : pas de transfert de technologie.

Ainsi, le scénario B1 est le plus optimiste des scénarios avec une concentration en CO₂ en 2100 de 550 ppm. Le scénario A2 est le plus pessimiste et simule la situation qu'il adviendrait si aucune mesure n'était prise pour restreindre les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce scénario la concentration en CO₂ en 2100 est de 840 ppm. Le scénario A1B est un scénario intermédiaire, dans lequel la concentration en CO₂ en 2100 est de 770 ppm.

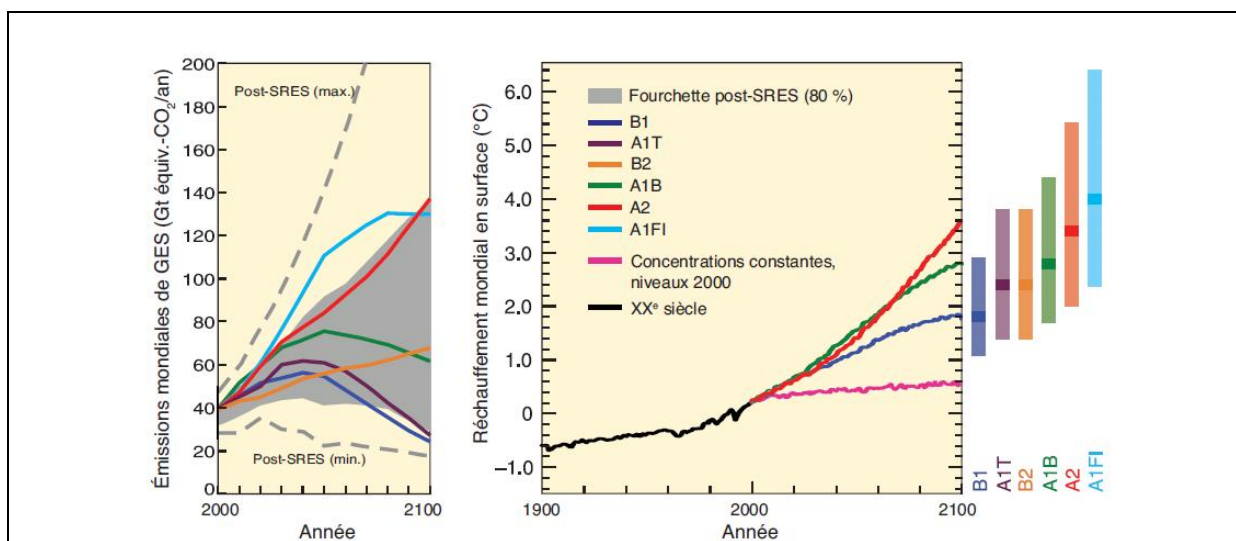


Figure 3.26 :
scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 en l'absence de politiques climatiques additionnelles et projections relatives aux températures en surface
(source : GIEC)

A gauche : émissions mondiales de GES en l'absence de politiques climatiques : six scénarios illustratifs de référence (lignes colorées) et intervalle au 80^e percentile des scénarios publiés.

À droite : les projections intègrent les émissions de GES et d'aérosols de courte durée de vie. La courbe en rose ne correspond pas à un scénario mais aux simulations effectuées à l'aide de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan en maintenant les concentrations atmosphériques aux niveaux de 2000. Les barres sur la droite précisent la valeur la plus probable (zone foncée) et la fourchette probable correspondant aux six scénarios de référence du SRES (Special Report on Emissions Scenarios) pour la période 2090-2099. Tous les écarts de température sont calculés par rapport à 1980-1999.

Prévoir l'évolution des climats des diverses régions du monde se révèle difficile. L'incertitude des simulations climatiques augmente encore lorsqu'on les applique au niveau régional.

Selon les experts du GIEC, la hausse de la température moyenne d'ici 2100 pourrait être comprise entre 1,1 et 6,4 °C. Le réchauffement simulé pour le prochain siècle est remarquable par sa rapidité. Les simulations climatiques avec le scénario A1B (scénario qui envisage des émissions moyennes de gaz à effet de serre) prévoient une augmentation de la température moyenne d'environ 3 °C (entre 1,7 et 4,4 °C) en 2100.

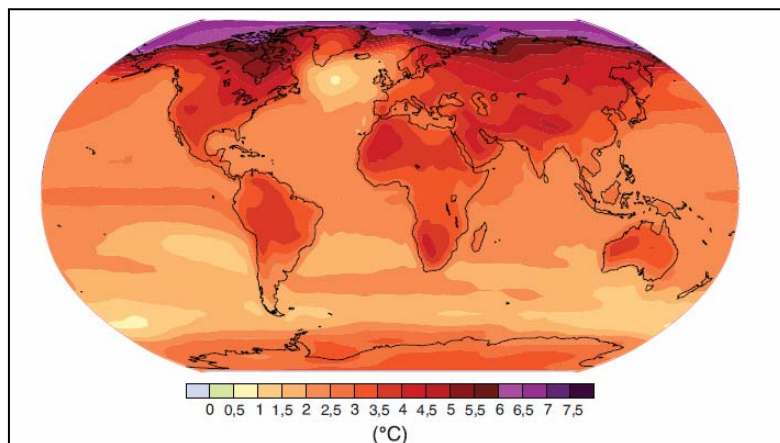


Figure 3.27 :
configuration du réchauffement à la surface du globe
(source : GIEC)

Évolution projetée de la température en surface pour la fin du XXI^e siècle (2090-2099) par rapport à la période 1980-1999, selon les projections moyennes obtenues avec plusieurs modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan pour le scénario A1B.

Les différents modèles s'accordent sur un certain nombre de tendances pour la fin de ce siècle :

- le réchauffement sera plus marqué sur les continents que sur les océans, le réchauffement maximal étant prévu pour les régions arctiques ;
- à l'échelle planétaire, le cycle de l'eau va s'intensifier, ce qui implique un accroissement des précipitations moyennes sur les régions les plus humides et une diminution sur les régions les plus arides.

Mais, pour les autres phénomènes extrêmes comme par exemple les cyclones, aucune tendance ne se dégage de façon très précise.

Figure 3.28 figurent des simulations récentes pour l'ouest de l'Europe.

Elles prévoient pour la fin du XXI^e siècle (scénarios du GIEC) :

- en été, un réchauffement marqué et une diminution des précipitations sur les régions méditerranéennes. Le risque de sécheresse sur le sud de la France, l'Espagne et l'Italie devrait être accru.
- en hiver, une augmentation des précipitations sur toute la façade atlantique. Il est cependant difficile de préciser où se situeront en Europe ces zones plus pluvieuses ou plus sèches.

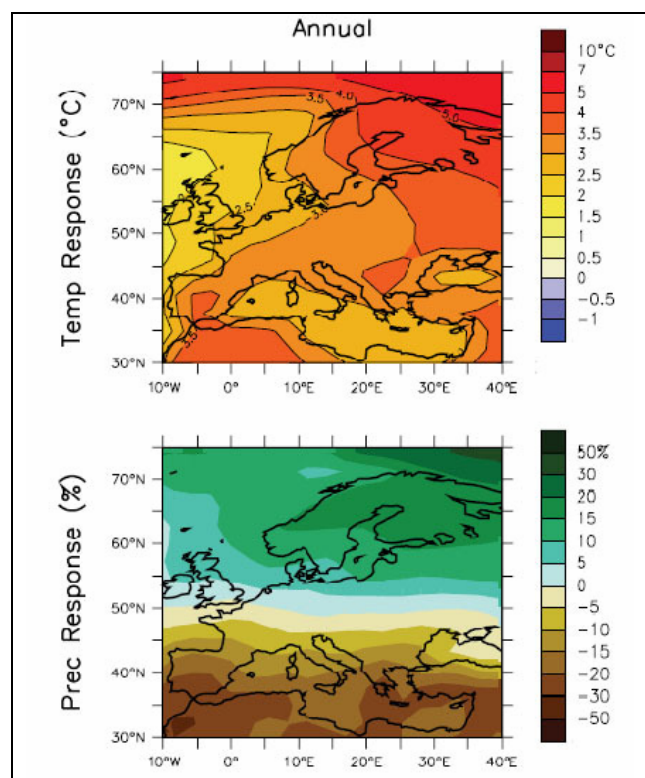
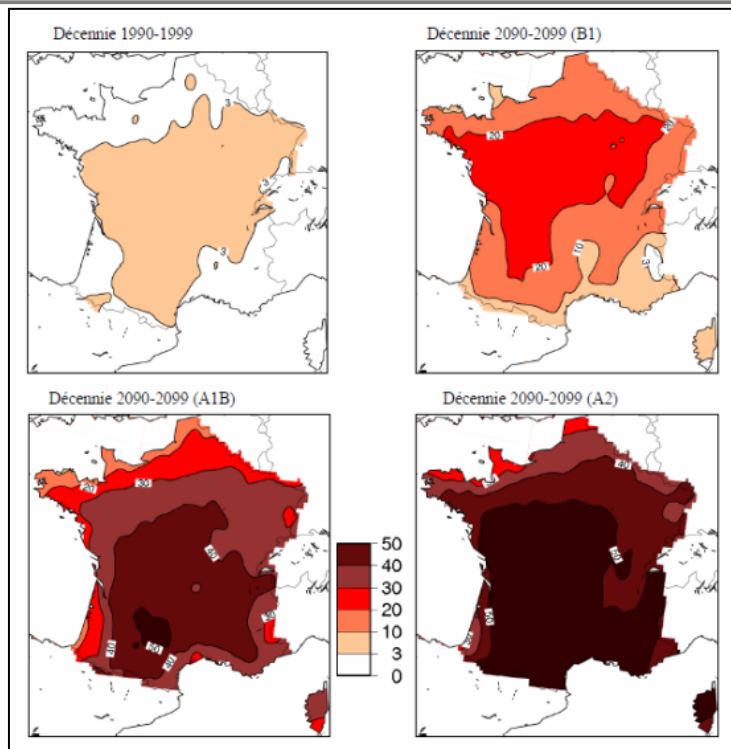


Figure 3.28 :
évolutions de la température (en haut) et des
précipitations annuelles (en bas) vers 2080-2099 en
Europe par rapport à 1980-1999
(moyenne de 21 modèles)
(source : GIEC)

Ci-après est présentée une comparaison du nombre de jours par an en France où la température dépasse 35 °C entre la dernière décennie du 20^e siècle et la dernière décennie du 21^e siècle, selon 3 scénarios A2, A1B et B1.



Les simulations prévoient une augmentation très nette du nombre de canicules estivales en France. Les journées de très forte chaleur (température maximale supérieure à 35 °C) devraient devenir beaucoup plus fréquentes à la fin du 21^e siècle : en moyenne, de 20 à 40 journées.

Figure 3.29 :
Nombre de jours par an
avec températures maximales supérieures à 35 °C en France
(copyright Météo-France 2007)

Ainsi, les conséquences pourraient se faire sentir dans tous les domaines d'activités. A titre d'exemple, après le constat effectué de l'avancement des dates de vendanges, celles-ci pourraient être à l'avenir bien plus précoces, de 15 à 30 jours selon le scénario retenu.

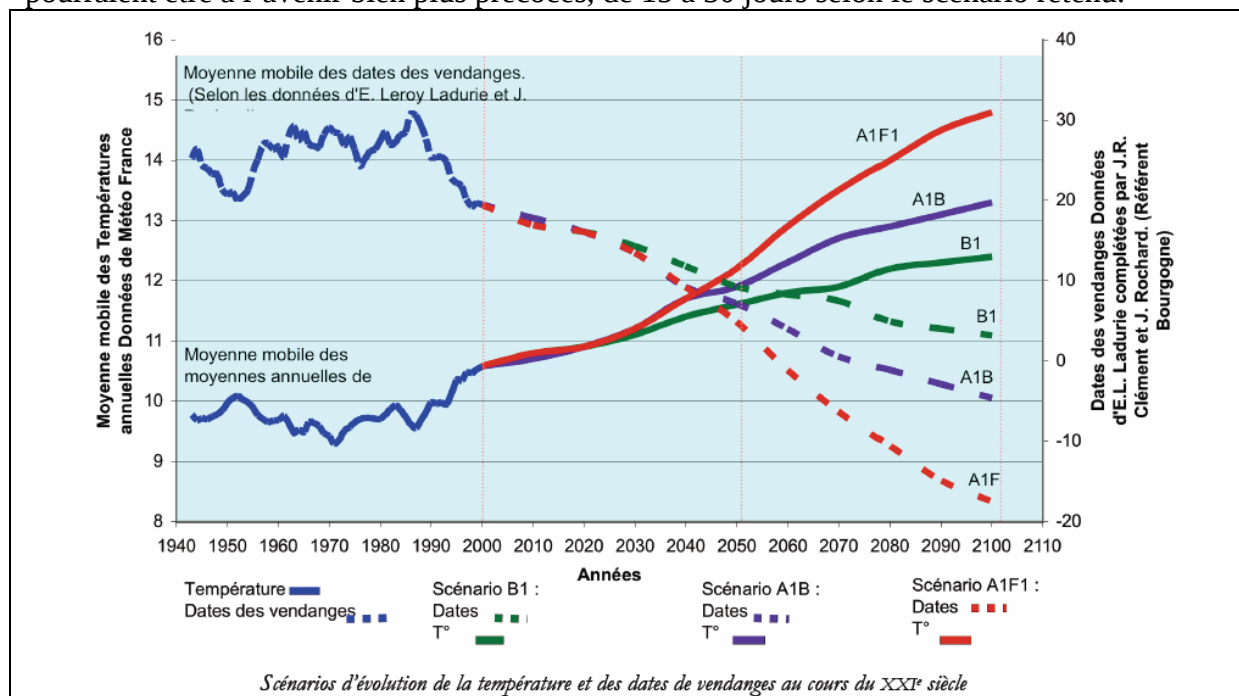
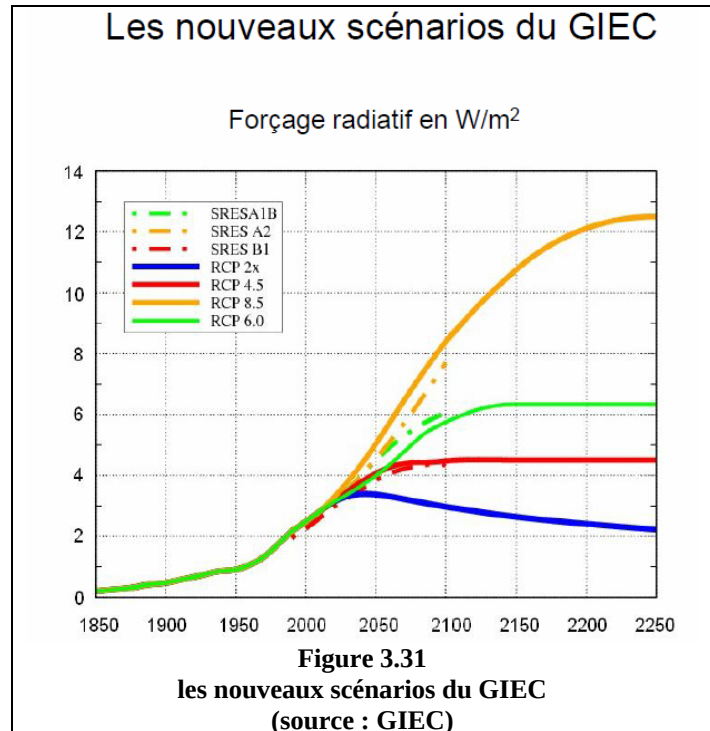


Figure 3.30 :
plusieurs scénarios d'évolution de la température et des dates de vendanges au cours du 21^e siècle

3.4.3. Vers de nouveaux scénarios

Les scénarios de 2000 sont appelés "SRES scénarios" (Special Report on Emissions Scenarios) et sont basés sur l'estimation des émissions des gaz à effet de serre. Ils sont construits à partir de projections socio-économiques, décrivant les évolutions de la population, des économies, des technologies, des modes de vie, etc. Pour les scénarios de 2011, les scientifiques ont commencé par se donner des scénarios sur le pouvoir radiatif (pouvoir chauffant de l'atmosphère) des différents composants atmosphériques. Ces scénarios sont appelés RCPs, pour "Representative Concentration Pathways". Ces RCPs sont utilisés par les climatologues pour faire des scénarios climatiques.

Ensuite, les scientifiques vont créer des scénarios socio-économiques cohérents avec les RCPs, que l'on appelle SSP, pour "Shared Socio-Economic Pathways". En effet, le pouvoir radiatif des RCPs est issu des concentrations des GES et autres polluants, qui viennent elles-mêmes des émissions de ces produits et de l'utilisation des terres (déforestation reforestation, évolution de l'espace urbain et de l'espace agricole...). À partir des RCPs, on déduit de nouveaux scénarios d'émissions des gaz à effet de serre, puis des scénarios socio-économiques (SSP) qui conduisent à ces émissions.



Ces scénarios seront utilisés pour les modélisations à venir, qui seront synthétisées dans le 5^e rapport du GIEC, prévu en 2013.

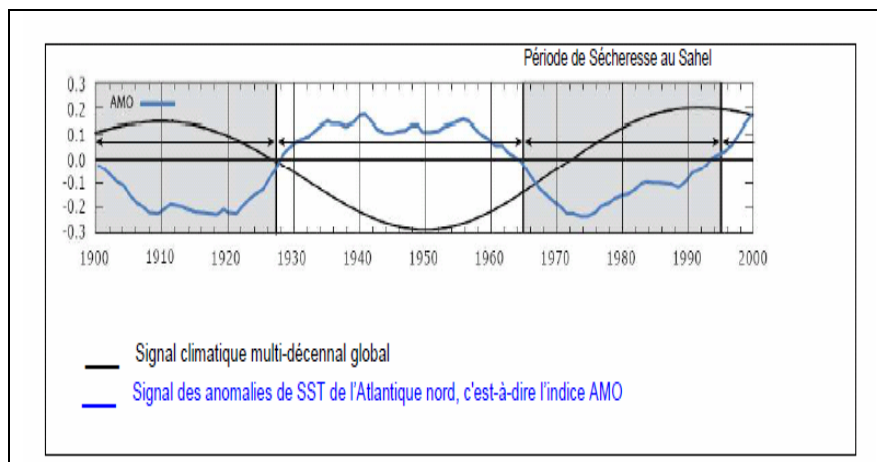
3.4.4. Les limites des modèles

Quels que soient les modèles de prévision du climat utilisés, ceux-ci intègrent des sources d'incertitudes :

- des simulations du climat imparfaites : le nombre considérable de paramètres pris en compte par les modèles augmente la marge d'erreur probable mais on ne peut pas simuler le climat sans inclure l'ensemble de ces paramètres. L'incertitude liée aux modèles est de l'ordre de 2 °C pour la température moyenne de la planète en 2100 ;
- des scénarios d'émission de GES : le GIEC a élaboré plusieurs scénarios d'émissions de GES reposant sur diverses hypothèses d'évolution des sociétés humaines. La croissance de la température va donc varier selon le scénario utilisé. La température simulée pour 2100 présente une incertitude de l'ordre de 2 ° à 3 °C selon le scénario retenu.

En outre, si les projections climatiques sont des outils précieux d'aide à la décision, il ne faut pas pour autant surestimer leur "pouvoir prédictif". Il importe notamment de garder à l'esprit que ces projections postulent que le système climatique continuera à évoluer selon les mêmes grands équilibres physiques, dynamiques et chimiques, sans rupture majeure de continuité. Or les systèmes complexes ont souvent pour propriété de contenir un ou plusieurs seuils, ou points de bascule dont le franchissement provoque un changement d'état. Plusieurs éléments du système climatique ont été identifiés comme contenant des points de bascule potentiels. Lorsqu'un élément naturel (banquise, forêt ...) serait touché par un niveau de température donné, son état pourrait se modifier de manière irréversible, générant de ce fait une modification ou rupture climatique à l'échelle locale ou globale. L'un d'entre eux est l'existence d'une banquise arctique estivale. En effet, une fois celle-ci disparue, sa reconstitution en hiver devient difficile puisque l'océan est rendu plus chaud par le surcroît de rayonnement solaire absorbé en été. Cette disparition aurait alors des conséquences sur le climat global.

De plus, des phénomènes à échelle planétaire viennent également interférer, en renforçant la variabilité de notre climat. L'AMO (Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique) est une variation cyclique à grande échelle, qui se calcule par un indice, dans le courant atmosphérique et océanique de l'océan Atlantique du Nord et qui augmente et baisse alternativement la température de la surface de l'océan Atlantique (SST, pour "Sea Surface Temperature").



Cette oscillation qui est multi-décennale varie sur une échelle de 50 à 70 ans avec des anomalies positives pendant environ 40 ans suivies d'anomalies négatives de la température de surface de la mer pendant environ 20 ans dans l'Atlantique Nord, avec une différence de 0,6 °C entre les extrêmes.

Figure 3.32 :
évolution de l'Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique
au cours du 20^e siècle
(source : Météo-France, Lamont-Doherty Earth Observatory de la
Columbia University à New-York, Université de Haïfa, et Scripps
Institution of Oceanography de l'Université de Californie San Diego)

Or l'AMO a beaucoup d'effets sur le climat de l'Hémisphère Nord. Il a été montré qu'elle est responsable d'environ 15 % du réchauffement de 1 °C sur la France au cours de ces 10-15 dernières années, ce qui est dû à l'échange d'énergie entre l'océan et l'atmosphère.

En étudiant l'évolution globale de la pression atmosphérique et de la température des océans (SST) au cours du 20^{ème} siècle, deux signaux climatiques naturels sont mis en évidence. Le premier dit multi-décennal se reproduit avec une période supérieure à 40 ans. Le second dit quasi-décennal est de périodicité plus courte : 8 à 14 ans.

4. Quel climat futur en Bretagne : régionalisation des résultats des simulations climatiques

Pour se projeter vers le climat du futur, le chapitre précédent a imposé l'idée qu'on ne pouvait se satisfaire d'une simple extrapolation mathématique des séries de mesures historiques. Il est devenu incontournable de tenir compte de la grande variabilité du climat à l'échelle de quelques années ou de quelques décennies et de l'accentuation de l'effet de serre. Les progrès récents de la modélisation et l'augmentation de la capacité des calculateurs permettent, depuis quelques années, de réaliser des simulations climatiques à l'échelle du globe, en considérant l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre. Les simulations s'appuient donc sur les équations physiques qui régissent le comportement de l'atmosphère.

Nombreux sont les modèles de climat exploités par une multitude de laboratoires de recherche dans le monde. Les résultats de ces simulations sont relativement convergents en ce qui concerne la température. Leur variabilité est beaucoup plus importante pour les précipitations, ce qui se traduit par des résultats parfois très différents à l'échelle régionale.

Ce chapitre présentera quelques illustrations de ce que pourrait être le climat futur de la Bretagne. L'accent sera mis sur les incertitudes inhérentes à ce type de simulations (en fonction du modèle, des scénarios d'émission de gaz à effet de serre attendus ces prochaines décennies, de la méthode de descente d'échelle utilisée...).

Les résultats des simulations dites « RETIC » issues du modèle ARPEGE Climat de Météo-France permettront de concrétiser ces projections climatiques à l'échelle régionale et d'aborder les difficultés liées aux méthodes de descente d'échelle (paragraphes 4.1 à 4.3). Les incertitudes associées au modèle utilisé seront décrites lors de l'examen du comportement des précipitations (paragraphe 4.4 - projet SCAMPEI). Elles seront rappelées au travers de l'évolution possible d'autres paramètres météorologiques (vent, insolation...). Enfin, on évoquera les progrès attendus dans le domaine de la modélisation climatique ces prochaines années.

4.1. RAPPEL DE LA METHODE DES « DELTAS » UTILISEE DANS LE CADRE DE L'ETUDE DATAR

Le plus souvent, les simulations globales sont réalisées à une échelle horizontale de l'ordre de 300 km. Ces données sont ensuite couplées à des modèles à résolution de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres l'échelle d'un pays comme la France. Cette résolution est souvent insuffisante pour décrire le climat d'une région de la taille de la Bretagne. Il est donc nécessaire de réaliser une descente d'échelle spatiale pour mieux prendre en compte les effets de relief ou de côte. Des méthodes sont parfois utilisées pour réaliser des descentes d'échelle dynamiques (en imbriquant un modèle à maille fine dans un modèle de plus grande échelle). Ces techniques nécessitent de gros moyens et sont utilisées uniquement pour des programmes de recherche spécifiques. Par ailleurs, l'utilisation directe des paramètres issus des modèles de climat montre souvent l'existence de biais (lorsqu'on les compare aux observations sur la période de référence 1950/2000).

Nous utilisons ici une descente d'échelle statistique baptisée « méthode des Deltas » qui permet à la fois d'obtenir une résolution spatiale fine adaptée au climat breton et de corriger le biais éventuel dans les données.

Le climat actuel est décrit par une climatologie fine (résolution 1 km) issue de la spatialisation des observations sur la période 1971-2000 par la méthode AURELHY. La méthode AURELHY permet d'obtenir des champs météorologiques (pluie et température) par l'interpolation des mesures effectuées sur une longue période en prenant en compte le relief. Cette climatologie fine constitue actuellement la climatologie de référence.

La méthode des Deltas s'appuie sur le calcul de l'évolution climatique (delta) entre la période représentant le climat actuel et une période du climat futur. Les deltas (différences) entre la période du climat futur et la période actuelle ou dite « de référence » (1971-2000) sont calculés à partir des simulations climatiques aux points de grille du modèle (résolution 50 km). Ils sont ensuite interpolés spatialement de façon « mathématique » (méthode du krigeage) à la même résolution que celle utilisée pour la climatologie de référence actuelle. Pour obtenir le climat futur à cette même échelle, les deltas interpolés sont ajoutés à la climatologie de référence actuelle.

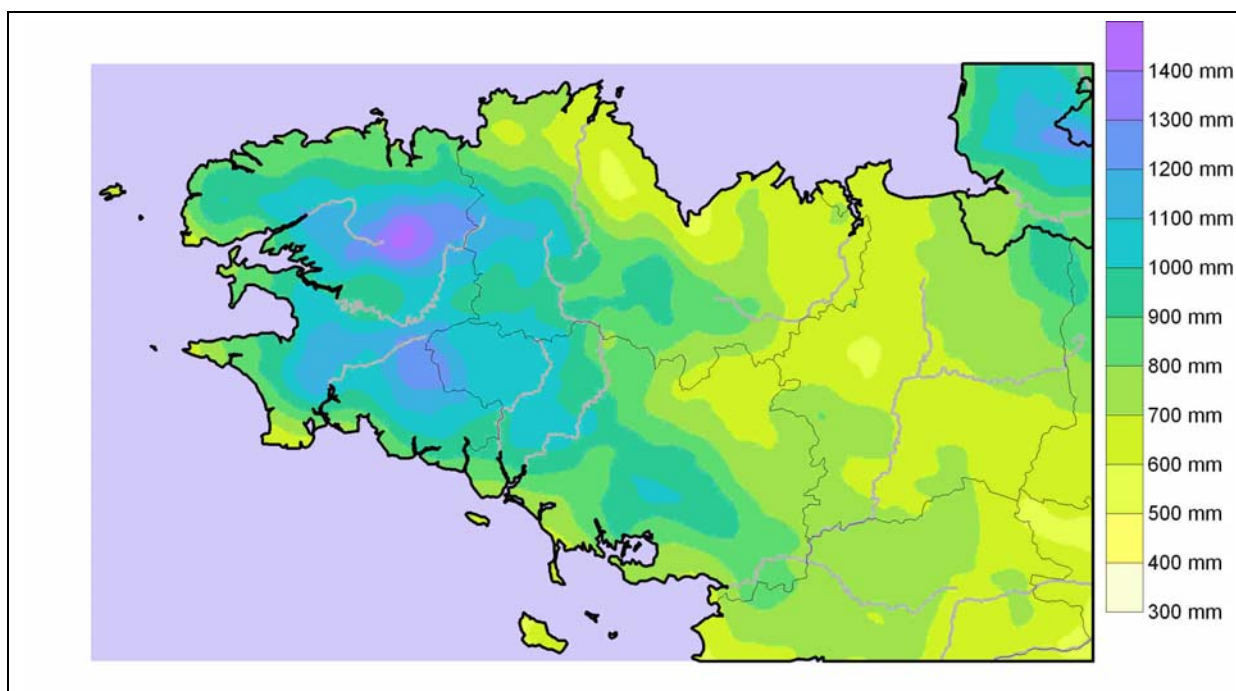


Figure 4.1 :
champ de précipitations moyennes annuelles, période 1971-2000, obtenu par la méthode des Deltas

Cet exemple met en évidence les fortes pluies associées au relief breton et les précipitations souvent plus faibles en bord de mer.

Cette méthode a été utilisée pour établir les cartographies réalisées dans le cadre de l'étude DATAR dont les résultats sont mis à disposition dans le cadre des SRCAE. Celles-ci ont été établies en utilisant les simulations du modèle ARPEGE Climat de Météo-France (version 4) dont les résultats sont exploitables depuis trois ans environ. Les caractéristiques de ces simulations sont présentées succinctement ci-après.

ARPEGE-Climat est un modèle climatique global développé par le Centre National de Recherche Météorologique (CNRM). Il dispose d'une maille étirée qui offre une résolution horizontale d'environ 50 km sur la France.

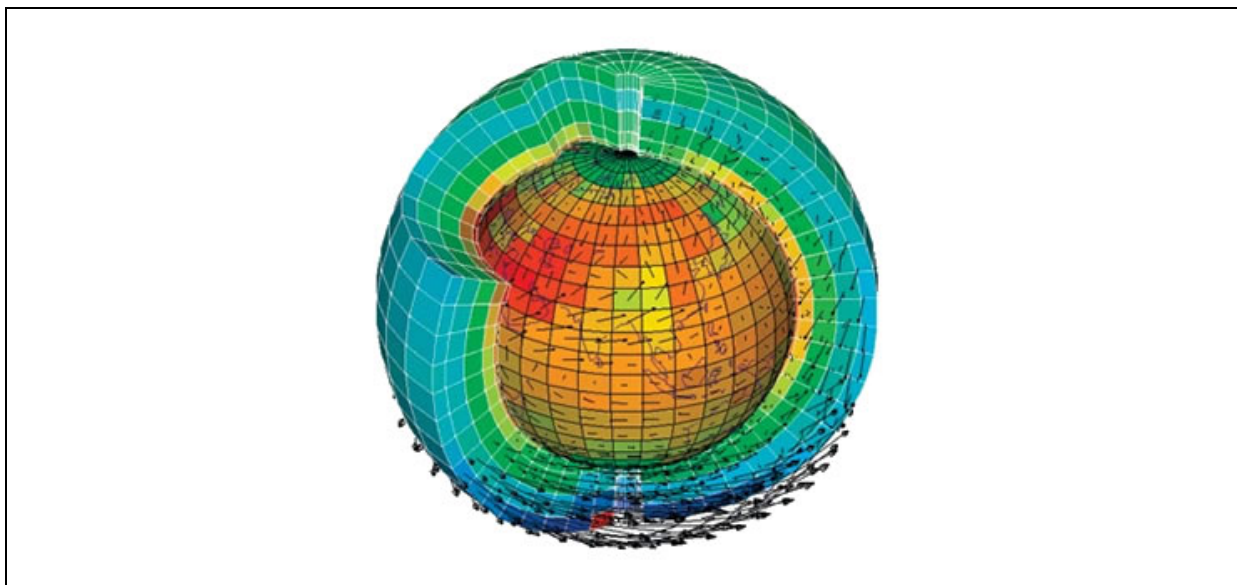


Figure 4.2 :
principe du calcul en points de grille (horizontaux et verticaux)
(crédit IPSL)

Ce modèle est forcé par un jeu de données de la température de surface de la mer, issues de simulations couplées à résolution de 300 km. Il fait partie des modèles français servant de référence pour les travaux liés au rapport du GIEC 2007, au même titre que celui de l'Institut Pierre Simon Laplace (modèle LMDZ). Ses résultats ont été validés et utilisés dans de nombreuses études. Quatre jeux de simulations ont été calculés par la version 4 d'ARPEGE Climat et sont disponibles pour l'étude du climat du 21^{ème} siècle :

- 50 ans de simulations climatiques sur la période 1950-2000 pour évaluer la capacité du modèle à simuler l'évolution du climat déjà constatée par comparaison avec les observations disponibles.
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario A1B
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario A2
- 100 ans sur la période 2001-2100 avec le scénario B1

L'étude de chacun des horizons 2030, 2050 et 2080 correspondra à l'étude des paramètres simulés, moyennés sur des périodes de 30 ans centrées respectivement sur les années 2030, 2050 et 2080 (soit 2016-2045, 2036-2065 et 2066-2095). Ces périodes de 30 ans sont tout à fait adaptées à la description du climat selon les normes de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

Les scénarios **A2**, **B1** et **A1B** ont été définis par le GIEC, Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Ils sont qualifiés de scénarios optimiste (B1), médian (A1B) et pessimiste (A2) par rapport à l'évolution des émissions de gaz à effet de serre (GES) au niveau global.

Ces scénarios ont servi de base aux travaux du GIEC (rapport 2007). Ils sont décrits dans la partie III de cette étude.

4.2. ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats présentés ici sont à interpréter avec **prudence** car il ne s'agit que d'une tendance d'un changement possible sur un ensemble de points de grille. Il faut bien garder à l'esprit qu'il ne s'agit que d'un « zoom » à l'échelle régionale de simulations du climat futur réalisées à l'échelle globale. En changeant de forçage à grande échelle, on peut évidemment obtenir des résultats significativement différents. Les planches fournies en annexe sont volontairement présentées sous la forme de 10 cartes par paramètres pour illustrer la sensibilité du climat futur aux hypothèses de travail (sensibilité à l'horizon 2030/2050/2080 et aux scénarios d'augmentation des GES du GIEC A1B, B1, A2).

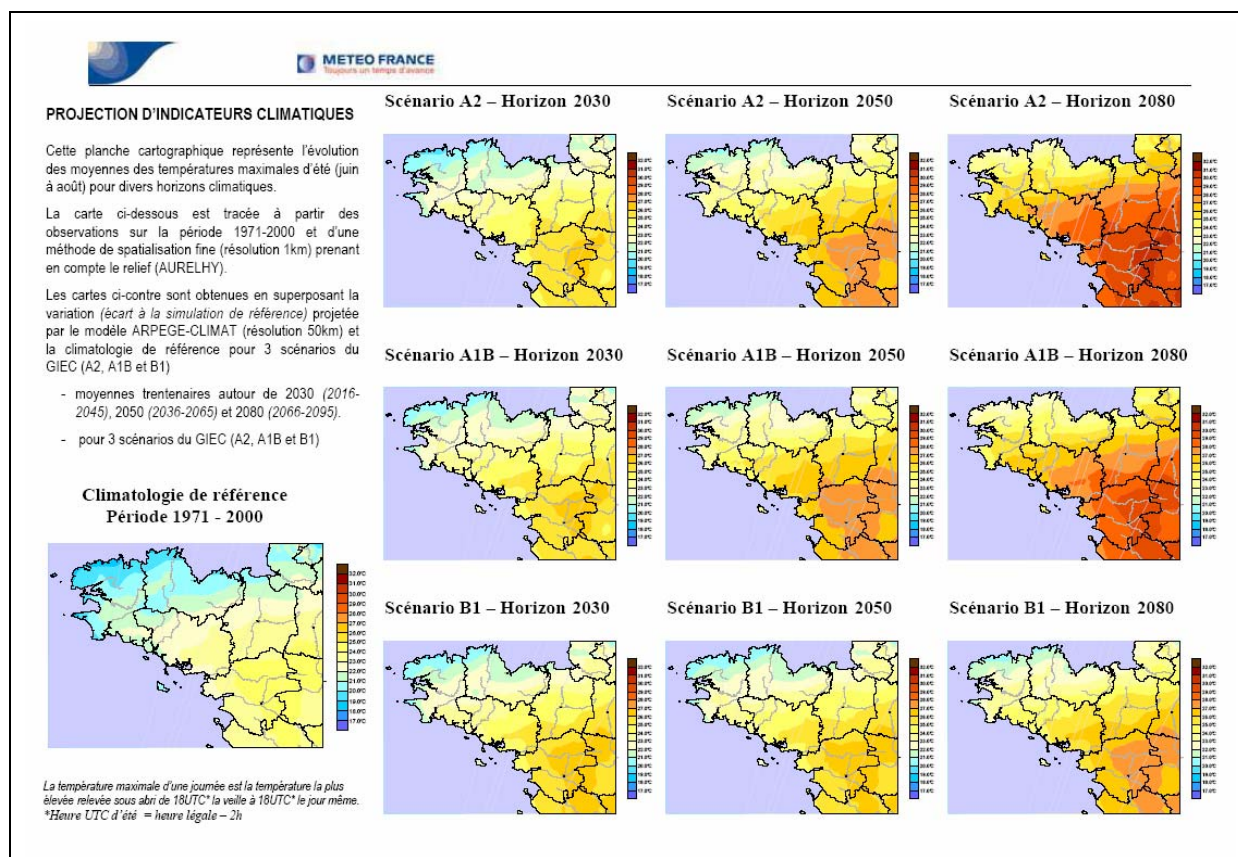


Figure 4.3 :
exemple de planches donnant les résultats des simulations à l'échelle régionale pour les températures maximales en été

Les 6 planches complètes pour les paramètres températures et pluies figurent en annexe.

La première carte en bas à gauche représente la référence (normales ou moyenne trentenaire du paramètre météorologique pour le climat de référence 1971-2000). Les 9 autres cartes représentent le résultat des simulations pour chacun des 3 horizons temporels et chacun des scénarios d'émission de GES du GIEC.

Le zoom géographique utilisé est adapté à la Bretagne. Cela ne signifie en rien que l'état actuel des connaissances, en termes de modélisation climatique, permet d'obtenir une si grande précision géographique pour le climat futur. **Cette cartographie doit être interprétée avec une grande prudence** (il ne s'agit que d'une illustration de l'évolution possible de paramètres climatiques).

L'analyse de ces cartes figurant en annexe sur la Bretagne montre :

- une augmentation significative des **températures moyennes annuelles** pour la Bretagne. Celle-ci est d'autant plus importante que l'horizon s'éloigne et que le taux de GES augmente. Cette hausse peut être estimée selon les hypothèses entre +2 et +5 °C. L'effet régulateur de l'océan resterait significatif avec moins de fortes chaleurs estivales près de la côte septentrionale et moins de gel en hiver tout au long du littoral (voir planches concernant **les températures maximales d'été** et celles concernant les **températures minimales d'hiver**). La convergence de l'ensemble des modèles sur l'augmentation des températures à l'échelle du globe est assez bonne. Ces résultats ARPEGE Climat version 4, adaptés à la Bretagne, **tendent tous vers un réchauffement** quels que soient le scénario du GIEC utilisé et l'horizon temporel. On remarque que plus la concentration de gaz à effet de serre augmente, au fil du temps, plus le réchauffement est prononcé ;
- concernant les **pluies moyennes annuelles**, le changement est beaucoup moins significatif. Les simulations ARPEGE Climat version 4 présentées ici penchent vers une diminution progressive de la quantité annuelle des précipitations en Bretagne (sauf pour le scénario B1 à partir de 2050 qui a tendance à augmenter les pluies annuelles). De par la méthode de descente d'échelle utilisée, le gradient entre les zones les plus sèches (bassin de Rennes, région de St-Brieuc...) et les plus arrosées (versants sud-ouest du relief breton) resterait identique (avec un facteur multiplicatif voisin de 2). Nous verrons par la suite qu'il faut interpréter cette baisse des précipitations (et la hausse proposée selon le scénario B1 après 2050) avec une grande prudence compte tenu de l'incertitude des simulations de pluie à cette échelle ;
- les planches concernant les pluies d'hiver de la saison dite « de recharge » (d'octobre à mars) et de la saison estivale « dite d'étiage » (d'avril à septembre) donnent des résultats généralement concordants, selon les horizons et scénarios simulés par cette version d'ARPEGE climat, mais pouvant parfois être assez différents dans le détail ;
- selon ces simulations, la baisse des **pluies d'été** moyennes sur la Bretagne est à peu près régulière au fil des échéances (même selon le scénario B1 après l'horizon 2050). Le scénario A1B, pour l'horizon 2080, est celui qui donne les précipitations les plus faibles ;
- **en hiver**, les simulations ARPEGE climat présentées sur les planches en annexe gardent les pluies moyennes à peu près constantes sur la Bretagne.

4.3. EFFETS ATTENDUS SUR LA TEMPERATURE

Les planches d'évolution des températures expriment une tendance moyenne, calculée sur des périodes de 30 années. Un réchauffement moyen sur 30 ans n'exclut pas la possibilité de refroidissements temporaires (comme une vague de froid en hiver ou un été frais). La fréquence de ces anomalies froides devrait diminuer au fil des décennies, mais un épisode isolé reste toujours possible (comme ce fut le cas début février 2012). L'augmentation de la température en hiver et en été devrait se traduire par une augmentation significative de la fréquence des vagues de chaleur estivales (tempérées par la proximité de la mer en Bretagne) et par celle des hivers doux.

Le graphique ci-après montre l'une des conséquences de l'augmentation moyenne des températures estivales en Bretagne.

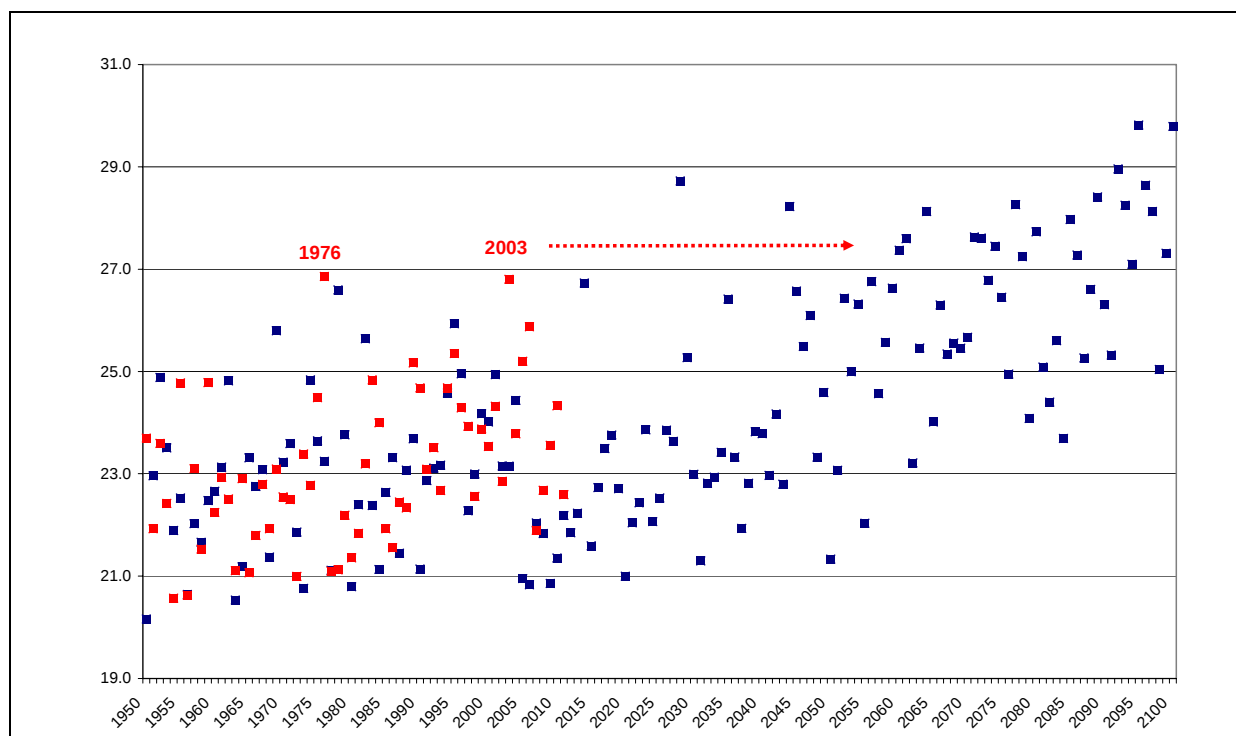


Figure 4.4 :
comparaison de la température maximale moyenne en été sur Rennes (en °C)
entre **observations** (1950-2011) et **simulations** (1950-2100),
ARPEGE climat scénario A1B.

La flèche rouge montre qu'un évènement comme la canicule de 2003 (température maximale moyenne de l'été de 27 °C) deviendrait assez fréquent en fin de siècle (cette température moyenne serait atteinte près d'un été sur deux).

La comparaison des nuages de points sur la période passée (1950-2011) souligne la bonne capacité du modèle ARPEGE Climat à reproduire la variabilité des températures estivales en Bretagne. La température moyenne maximale des étés à Rennes en rouge (1950-2011), calculée sur les mois de juin à août, varie de 19,7 °C pour le plus frais en 1955 à près de 27 °C pour les plus chauds. Les simulations ARPEGE Climat démarrant en 1950 (en bleu) ont à peu près la même dispersion sur la période commune.

Les étés 1976 et 2003 sont les plus chauds dans la série des observations avec près de 27 °C de température maximale moyenne. Ce type d'événement tout à fait inhabituel dans la période passée deviendrait commun à partir de l'horizon 2050 selon les résultats d'ARPEGE Climat avec un scénario « médian » A1B d'émissions futures de gaz à effet de serre.

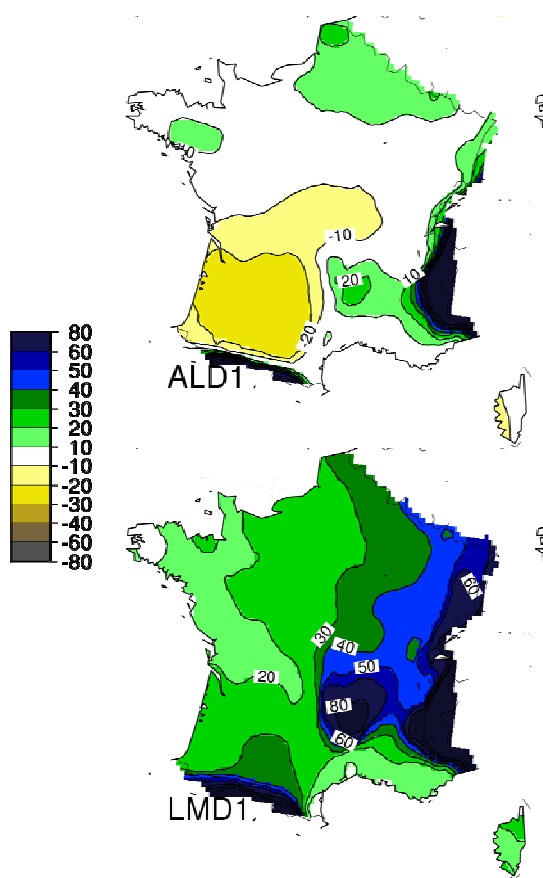
4.4. EFFETS ATTENDUS SUR LES PLUIES

4.4.1. Contexte

L'ensemble des modèles de climat disponibles tendent à faire augmenter la température à toutes les échelles spatiales (globe, continent voire région). Il n'en est pas de même pour l'évolution des précipitations. Les simulations d'évolution des pluies sont généralement cohérentes à l'échelle mondiale mais peuvent donner des résultats tout à fait différents à une échelle plus locale.

Ces éléments s'expliquent en partie par la très grande sensibilité des modèles au résultat en termes de précipitation (liée à des effets non linéaires). Un décalage spatial des zones plus arrosées, sans grande conséquence à l'échelle d'un continent, peut aussi se traduire par un résultat complètement différent sur un pays. Les cartes ci-après donnent un exemple qui peut dérouter certains mais qui traduit la grande incertitude qui subsiste sur l'évolution de ce paramètre.

Les différences entre les résultats de ces simulations sont plus ou moins fortes selon les régions françaises. La Bretagne, de part son éloignement des grands reliefs et sa situation péninsulaire, est une région où la variabilité n'est pas la plus forte.



- *Le modèle Arpège en haut simule un déficit de précipitations sur le sud-ouest de la France, de façon assez prononcée. La moitié Est étant quant à elle excédentaire par rapport à la référence.*
- *Le modèle IPSL en bas simule une augmentation sur tout le pays.*

Figure 4.5 :
exemples de simulation d'évolution des pluies en pourcentage de la normale de référence, sur la France en hiver à l'horizon de la fin du XXI^e siècle, pour le même forçage en GES, selon les modèles Arpège en haut (ALD1) et IPSL en bas (LMD1).

4.4.2. Le projet SCAMPEI

Le projet ANR/SCAMPEI s'est terminé fin 2011. Il avait pour objectif principal d'apporter une réponse plus précise à la question du changement climatique dans les régions de montagne de la France métropolitaine. Pour cela, les partenaires du projet ont choisi d'associer la modélisation à haute résolution (12 km) avec les modèles de Météo-France, du LMD (IPSL) et du LGGE. Ces données ont été dé-biaisées sur la période de référence et homogénéisées à un format standard (grille 8 km) pour permettre de comparer les simulations entre elles sur des points précis du territoire. Les simulations de températures de ces trois modèles pour un même scénario du GIEC sont relativement concordantes à l'échelle de la France. Elles le sont beaucoup moins en ce qui concerne les précipitations.

Des éléments supplémentaires sur ce projet sont disponibles sur : <http://www.cnrm.meteo.fr/scampe/>

Pour illustrer la variabilité des simulations de pluie, nous présentons ci-après des graphiques des pluies prévues sur deux points représentatifs de la Bretagne (crêtes des Monts d'Arrée, secteur de Brennilis, et bassin de Rennes). Ces pluies seront comparées à la moyenne de référence « SCAMPEI » calculée sur 1961-1990 (en rouge ci-après). Celle-ci est peu différente de moyenne 1971-2000 utilisée pour la méthode des Deltas explicitée précédemment.

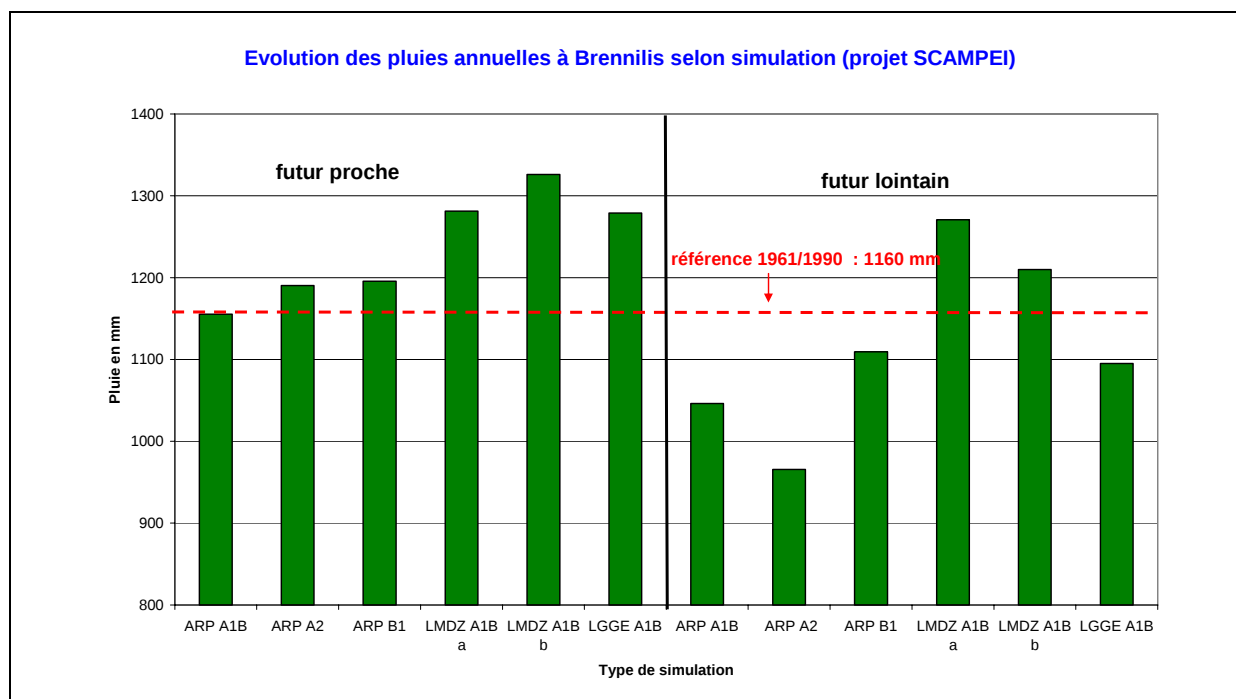


Figure 4.6 :
projections des pluies annuelles à Brennilis en fonction du modèle utilisé selon deux horizons du projet SCAMPEI (futur proche et futur lointain).

La référence est en tireté rouge

Les simulations ARPEGE (ARP) sur Brennilis gardent à peu près constantes les pluies annuelles dans le futur proche mais les diminuent dans le futur lointain (quel que soit le scénario GIEC 2007 A1B, A2 ou B1).

Les simulations LMDZ (a et b) de l'IPSL, pour le scénario A1B, augmentent les pluies annuelles dans le futur proche. Les pluies annuelles diminuent ensuite dans le futur lointain, tout en restant excédentaires par rapport à la référence 1961-1990 de 1 160 mm par an.

Le modèle LGGE pour le futur lointain est proche des valeurs d'ARPEGE scénario B1.

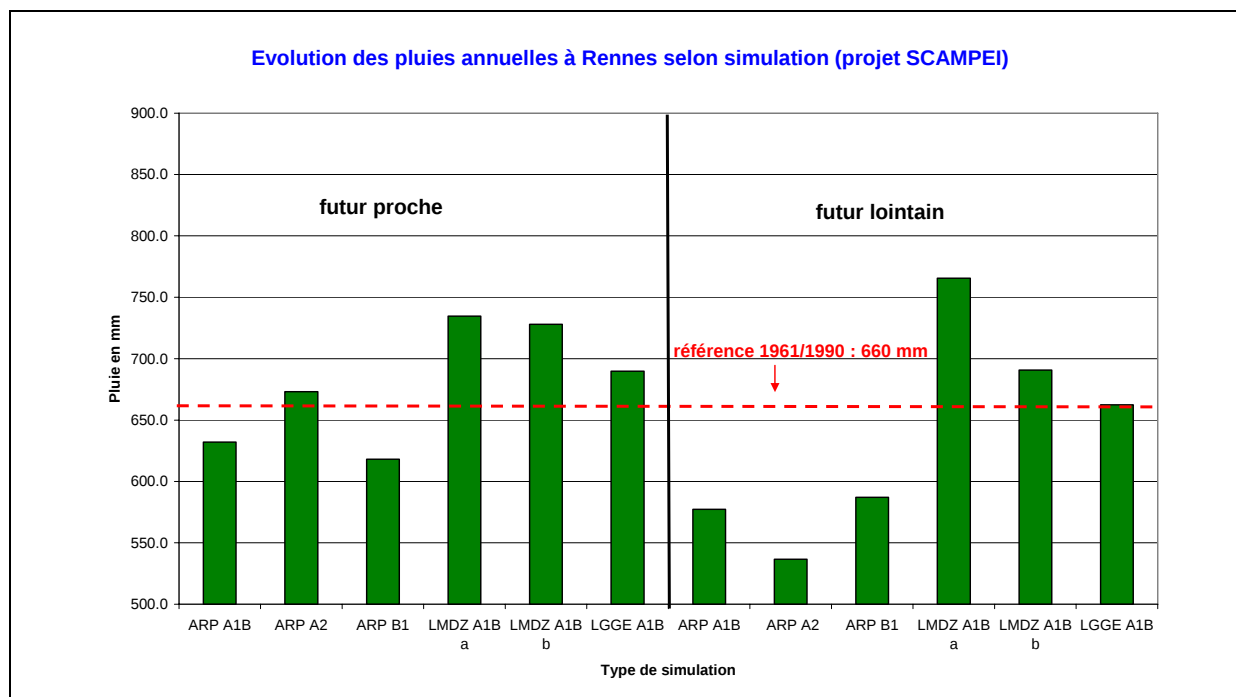


Figure 4.7 :
projections des pluies annuelles à Rennes en fonction du modèle utilisé selon deux horizons
du projet SCAMPEI (futur proche et futur lointain).

La référence est en tireté rouge

Les simulations ARPEGE ARP sur Rennes (référence 1961-1990 : 660 mm) diminuent à peine les pluies annuelles dans le futur proche mais les diminuent très nettement dans le futur lointain, quel que soit le scénario GIEC 2007 (A1B, A2 et B1).

Les simulations LMDZ (a et b) de l'IPSL, pour le scénario A1B, augmentent les pluies annuelles dans le futur proche avec relative stabilisation de cette tendance dans le futur lointain.

Pour ce point proche de Rennes, le modèle LGGE se situe dans une moyenne entre les autres modèles.

Compte tenu de cette divergence des modèles sur la Bretagne en ce qui concerne la pluie moyenne annuelle, il est difficile de conclure sur une possible augmentation des événements de pluie extrêmes. Dans l'état actuel des connaissances scientifiques, rien ne permet d'affirmer que cette tendance pourrait s'appliquer à une échelle plus fine comme celle de la Bretagne. La divergence des simulations de pluie sur la France illustrées par les résultats du projet SCAMPEI au chapitre précédent montre qu'il faut rester très prudent. La Bretagne, de par son exposition aux pluies océaniques, son relief et son réseau hydrographique reste exposée aux inondations même sans augmentation ou diminution des événements pluvieux extrêmes.

Quelle que soit la tendance de l'évolution des pluies estivales (en légère baisse ou en légère hausse selon les modèles), l'augmentation consensuelle des températures en été conduira à une hausse de l'évaporation et donc un risque accru de sécheresses estivales.

4.5. INCERTITUDE SUR LES AUTRES EFFETS ATTENDUS

Les modèles de climat simulent l'évolution de l'ensemble des paramètres météorologiques et ce, à différents niveaux de l'atmosphère. Les résultats sont potentiellement accessibles pour des phénomènes du type vent, rayonnement, orages, tempêtes, grands froids, sécheresse, canicules, etc.

L'évolution des phénomènes de grande échelle spatiale et temporelle comme les vagues de froid ou les périodes de canicule peut être quantifiée grâce à une analyse spécifique. En revanche, celle de paramètres plus sensibles aux variations spatio-temporelles (régime de vent, rayonnement solaire, tempêtes, orages...) est plus difficilement exploitable à l'aide des modèles de climat actuellement disponibles. Leur éventuelle évolution doit faire l'objet d'une étude spécifique notamment pour tout ce qui concerne la validation des modèles sur la période de référence 1950-2000.

On trouvera ci-après un exemple de résultat d'étude de l'évolution de la fréquence des tempêtes passées en Europe du Nord (Indice normé issu IPCC l'AR4).

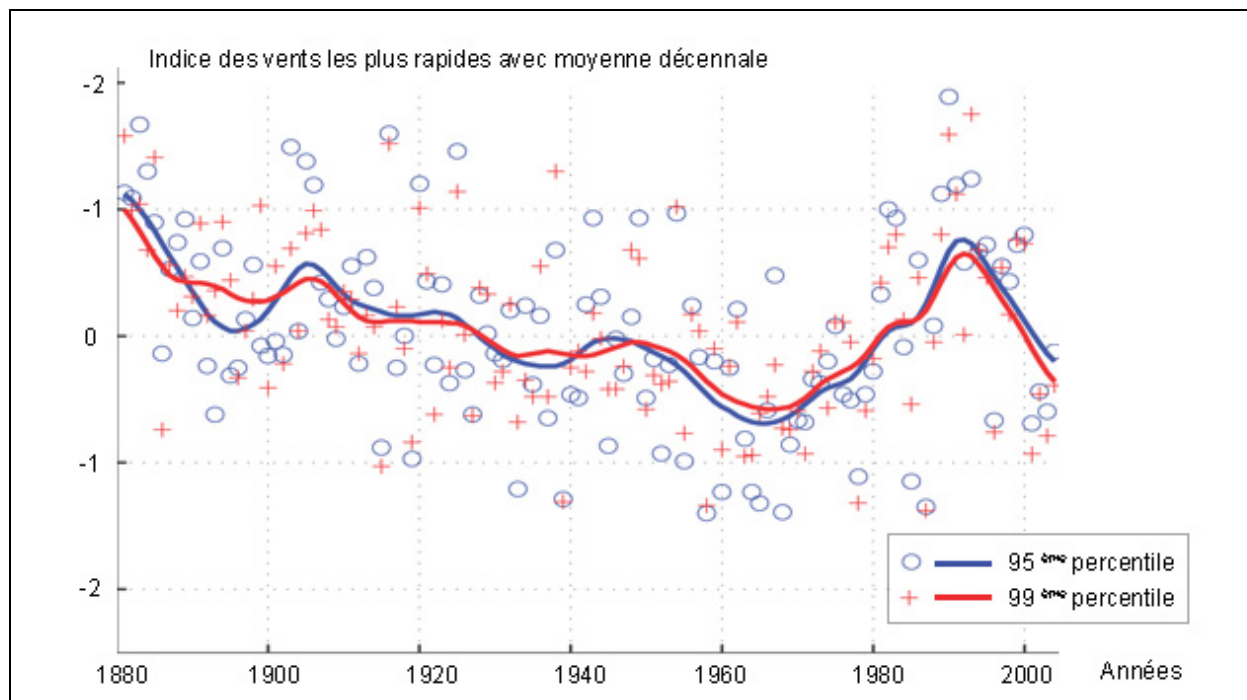


Figure 4.8 :
évolution des tempêtes en Europe du Nord entre 1880 et 2005
(source : IPCC AR4)

Cette figure montre l'évolution des vents théoriques les plus forts (dits vents géostrophiques) sur une partie des côtes de l'Europe du Nord durant le XX^e siècle. La courbe rouge représente les vents les plus intenses (99^e percentile), en bleu le 90^e percentile. On ne discerne pas pour l'instant de tendance incontestable dans l'évolution du nombre des tempêtes sur cette zone. Ceci dit, avec la hausse probable du niveau de la mer d'au moins quelques dizaines de centimètres, la vulnérabilité de nos côtes aux phénomènes de surcote pourrait augmenter (même à fréquence égale des tempêtes).

4.6. LES PROGRES DE LA MODELISATION ATTENDUS CES PROCHAINES ANNEES

L'intérêt grandissant pour la question du changement climatique, l'augmentation de la puissance des calculateurs et l'avancée de la science ouvrent de grandes perspectives. La modélisation du climat pourra en bénéficier en améliorant la résolution des modèles, en affinant la prise en compte de certains phénomènes physiques, en intégrant des modèles d'océan plus performants. Le prochain rapport du GIEC, attendu en 2013, fera le point sur ces avancées. Les premiers résultats de modélisation destinés à l'alimenter sont cohérents avec ceux des modèles présentés ici.

La prévision décennale (quel climat pour 2020 ?) reste encore une question scientifique majeure. Elle fait appel à des processus atmosphériques et océaniques qui ne sont pas encore modélisables mais qui font l'objet de nombreux travaux de recherche. Cet horizon proche intéresse fortement les décideurs mais aucun élément fiable n'est pour l'instant disponible pour appréhender le climat de ces prochaines années.

5. Conclusion générale

Ce travail décliné en quatre parties décrit le climat actuel, le climat passé récent et donne des indications sur le climat futur de la Bretagne. La prise en compte de l'évolution climatique à horizon de la deuxième moitié du XXI^e siècle est un enjeu majeur. Comme souvent en météorologie, les incertitudes sont importantes mais certains éléments sont désormais tangibles.

Le réchauffement de la planète devrait se poursuivre et même s'accroître dans les prochaines décennies. A l'échelle de la Bretagne, toutes les simulations concordent pour indiquer que ce réchauffement déjà sensible se poursuivra. **Selon cette tendance, il aura pour conséquence une augmentation de la fréquence des périodes de canicule en été, une diminution de la fréquence des hivers très froids, et une augmentation des températures aux saisons intermédiaires (automne et printemps avec des effets probables sur la végétation).** Notre région, bordée par la mer sur 3 côtés, devrait cependant échapper aux plus fortes chaleurs estivales et connaître encore des étés plutôt frais à l'avenir. Le réchauffement attendu pourrait être du même ordre que celui que notre région a connu entre -15 000 et -5 000 ans (fin de la dernière glaciation) mais il se produirait beaucoup plus rapidement sur une période de l'ordre du siècle.

L'incertitude est importante concernant l'évolution des précipitations dans notre région compte tenu de la grande sensibilité des modèles à simuler ce paramètre à l'échelle régionale. En l'état actuel des connaissances, on ne peut tabler sur l'une ou l'autre des possibilités (augmentation ou diminution plutôt faible du régime de précipitations). En revanche, l'augmentation de la fréquence des sécheresses superficielles ou agricoles en été paraît probable compte tenu de la hausse de température attendue.

Concernant les autres paramètres météorologiques (vent moyen, rayonnement solaire...), les modèles de climat actuellement disponibles ne permettent pas de conclure sur une éventuelle évolution notable.

Les événements extrêmes constituent un enjeu important dans la prise en compte du risque climatique. Compte tenu des incertitudes quant à l'évolution de leur fréquence et de leur intensité à l'avenir, la meilleure protection reste sans doute de garder la juste mémoire de ces événements.

Le principal danger pour notre région viendra sans doute de la mer. On n'ose imaginer les conséquences sur le littoral si un jour une tempête comme celle du 15 octobre 1987 (avec une surcote marine potentielle de plus de 2 mètres) se produit à marée haute, en période de grande marée...avec un niveau moyen de l'Océan plus haut de quelques dizaines de centimètres...

Même si les inondations ont plutôt épargné la Bretagne ces dix dernières années, celles de 1995, 2000 et 2001 restent la référence et peuvent très bien survenir à nouveau quelle que soit l'évolution moyenne des pluies ces prochaines décennies.

Malgré le réchauffement climatique attendu, la Bretagne restera potentiellement exposée à un brusque coup de froid comme celui de janvier 1985 avec des incidences sur la surconsommation électrique.

En d'autres termes, faire en sorte de bien s'adapter aux soubresauts du climat actuel reste sans doute la meilleure approche pour se prémunir contre les changements à venir.

Glossaire

TERMES METEOROLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

Albédo : capacité de réfléchissement du rayonnement solaire (rapport entre le rayonnement incident et le rayonnement réfléchi), quantité variant de 0 (corps noir) à 1 (miroir)

AMO : acronyme anglais de l'Oscillation Atlantique multi-décennale (OAM).

Anomalie climatique : écart par rapport à une moyenne de référence

Assec : terme hydrologique décrivant l'état d'une rivière ou d'un étang qui se retrouve sans eau.

Bilan radiatif : le bilan radiatif correspond à la différence entre la quantité d'énergie reçue par le système climatique Terre-Atmosphère (le flux solaire absorbé) et la quantité d'énergie réémise vers l'espace (flux thermique)

Circulation thermohaline : circulation permanente à grande échelle de l'eau des océans engendrée par des écarts de température et de salinité des masses d'eau.

Cycle hydrologique évaporation-condensation : cycle de l'eau gaz-liquide dans l'atmosphère

Durée d'insolation : durée pendant laquelle le rayonnement global est supérieur à 120 W/m² sur une surface horizontale

Heure UTC : heure de Greenwich (temps universel coordonné)

Normales climatiques : valeurs moyennes de températures, précipitations et autres calculées sur une période de 30 ans et permettant de décrire le climat d'une région.

Phénomènes de surcote : élévation anormale du niveau de la mer par rapport à la marée astronomique

SWI (Soil Wetness Index) : indice d'humidité des sols intégré sur la profondeur ; cet indice utilisé à Météo-France pour suivre au jour le jour l'état hydrique du sol est issu de la modélisation et permet ainsi de prendre en compte les échanges radiatifs et hydrologiques entre le sol et l'atmosphère, le type d'occupation et la texture du sol

Température maximale quotidienne : température de la journée la plus élevée relevée sous abri de 18 UTC la veille à 18 UTC le jour même.

Température minimale quotidienne : température de la journée la plus basse relevée sous abri de 06 UTC le jour même à 06 UTC le lendemain.

Température moyenne quotidienne : moyenne arithmétique de la température maximale quotidienne et de la température minimale quotidienne

METHODES UTILISEES

AURELHY : méthode statistique développée par Météo-France pour spatialiser les paramètres climatiques moyens (pluie et température) en tenant compte des mesures disponibles et du relief (pente, altitude...)

Extrapolation et interpolation : méthodes mathématiques permettant d'abaisser la résolution spatiale de paramètres

Krigeage : méthode d'interpolation géostatistique prenant en compte la structure spatiale des données

Méthode des Deltas : méthode développée par Météo-France permettant une descente d'échelle basée sur les données obtenues par la méthode Aurelhy

Régression lowess : méthode de lissage pour laquelle l'estimation en chaque point repose sur une régression des observations autour de ce point pondérées en fonction de la distance entre le point et ces observations

MODELISATION : RECONSTITUTION DE L'ATMOSPHERE

ALADIN : modèle à aire limitée de Météo-France (maille environ 10 km)

ARPEGE : modèle global de Météo France à maille étirée utilise à la fois pour des prévisions à quelques jours d'échéance, et pour des simulations climatiques à l'échéance du siècle dans sa version ARPEGE Climat.

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Etude du Climat

GES : Gaz à Effet de Serre

LGGE : Laboratoire de Glaciologie de Grenoble

LMDZ : modèle de climat global de l'IPSL

Maille d'un modèle : résolution horizontale, soit la distance entre deux points de grille

PPB : partie par milliard

PPM : partie par million (unité de concentration)

SCAMPEI : Projet de recherche de l'Agence Nationale de la Recherche basé sur l'intercomparaison de sorties de modèles de climat sur la France.

SRES scénarios (Special Report on Emissions Scenarios) : scénarios climatiques définis en 2000 basés sur l'estimation des émissions des gaz à effet de serre. Ils sont construits à partir de projections socio-économiques, décrivant les évolutions de la population, des économies, des technologies, des modes de vie, etc.

Annexe :

planches de simulations ARPEGE climat



PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

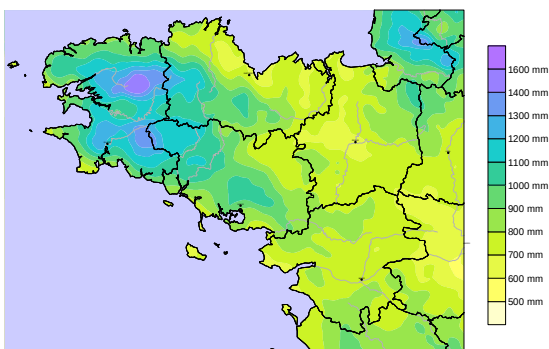
Cette planche cartographique représente l'évolution de la pluviométrie moyenne annuelle pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

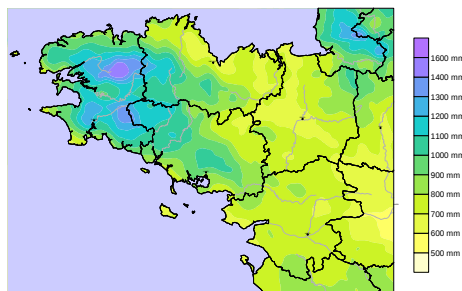
Climatologie de référence Période 1971 - 2000



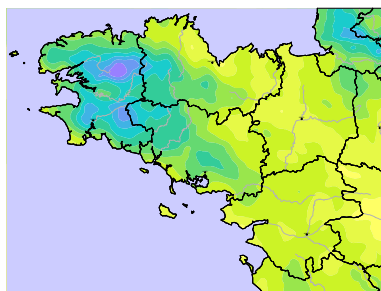
La pluviométrie annuelle est le cumul des précipitations tombées sur l'année comptées en hauteurs d'eau et exprimée en millimètres.



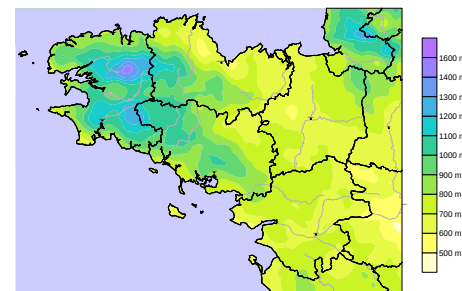
Scénario A2 – Horizon 2030



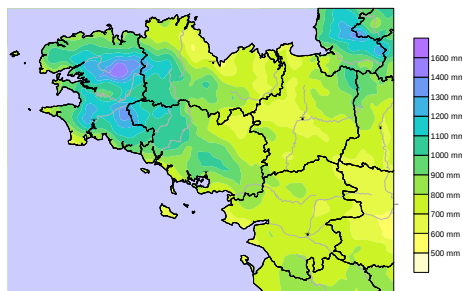
Scénario A2 – Horizon 2050



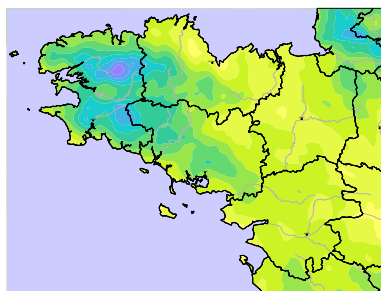
Scénario A2 – Horizon 2080



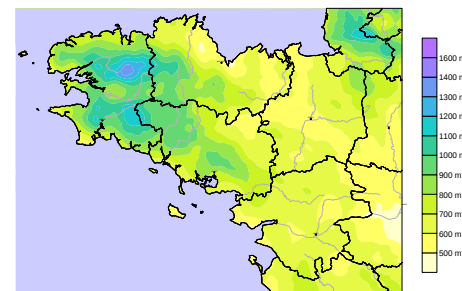
Scénario A1B – Horizon 2030



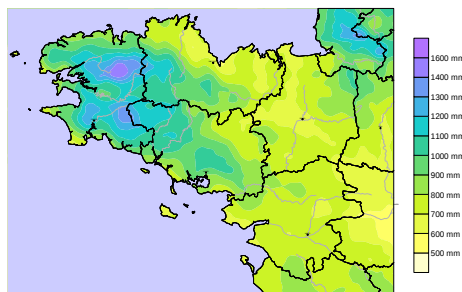
Scénario A1B – Horizon 2050



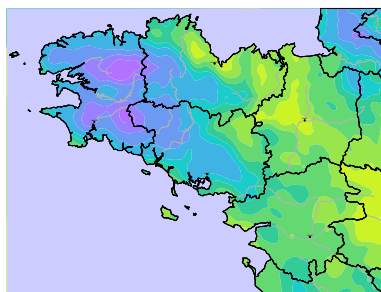
Scénario A1B – Horizon 2080



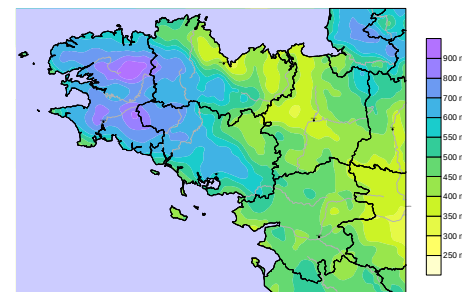
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

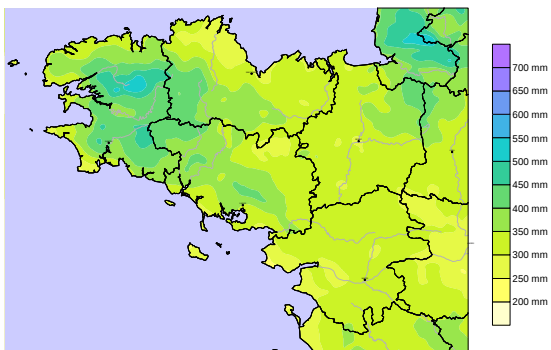
Cette planche cartographique représente l'évolution de la pluviométrie moyenne d'avril à septembre pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

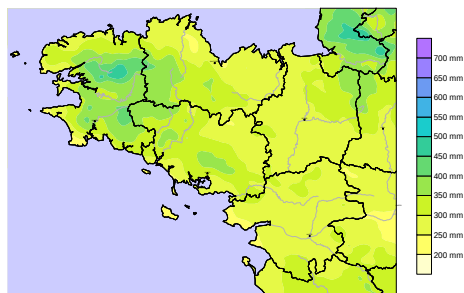
- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

Climatologie de référence Période 1971 - 2000

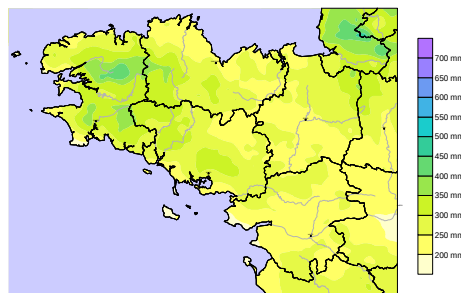


La pluviométrie d'avril à septembre est le cumul des précipitations tombées entre avril et septembre, comptée en hauteur d'eau et exprimée en millimètres.

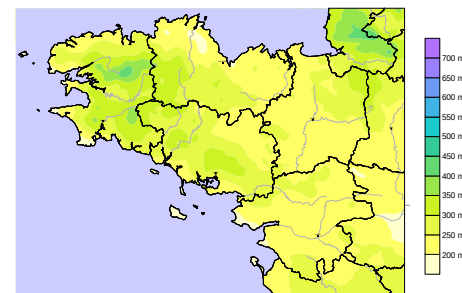
Scénario A2 – Horizon 2030



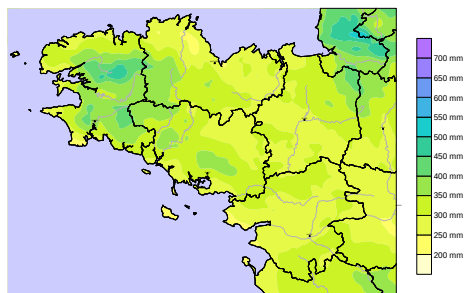
Scénario A2 – Horizon 2050



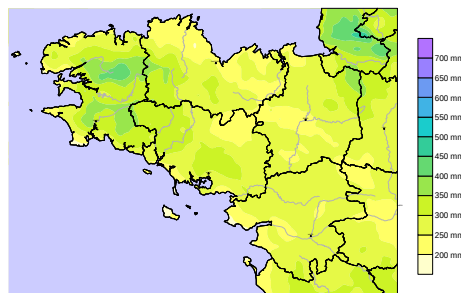
Scénario A2 – Horizon 2080



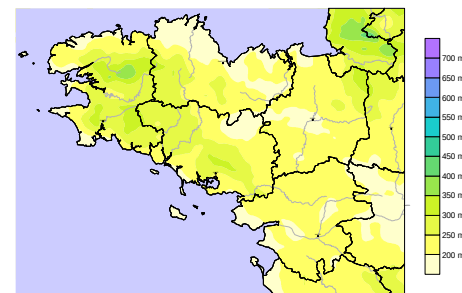
Scénario A1B – Horizon 2030



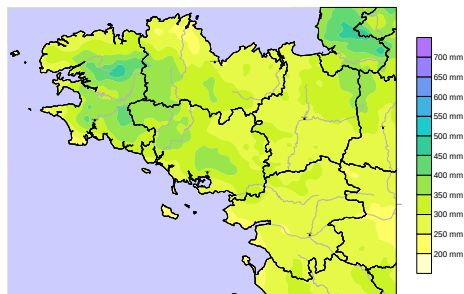
Scénario A1B – Horizon 2050



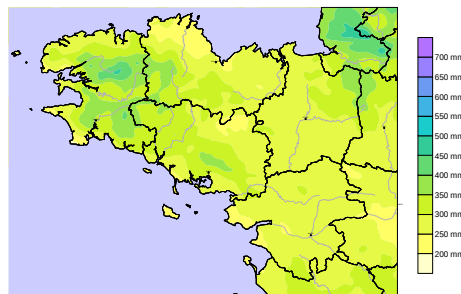
Scénario A1B – Horizon 2080



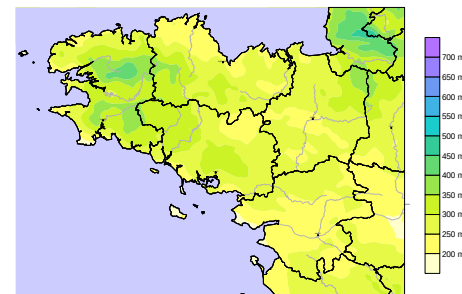
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

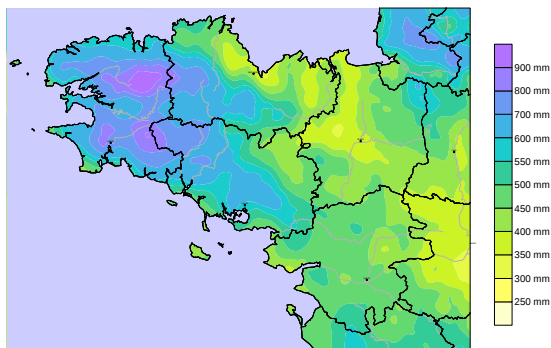
Cette planche cartographique représente l'évolution de la pluviométrie moyenne d'octobre à mars pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

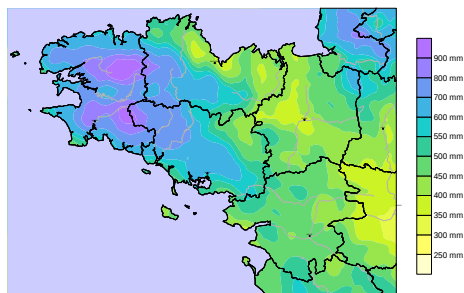
- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

Climatologie de référence Période 1971 - 2000

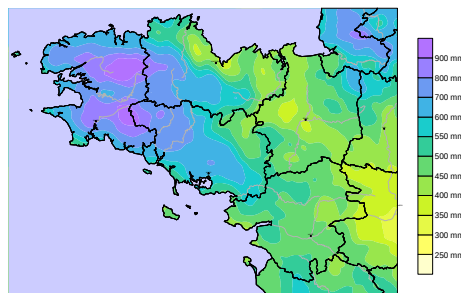


La pluviométrie d'octobre à mars est le cumul des précipitations tombées entre octobre et mars, comptée en hauteur d'eau et exprimée en millimètres.

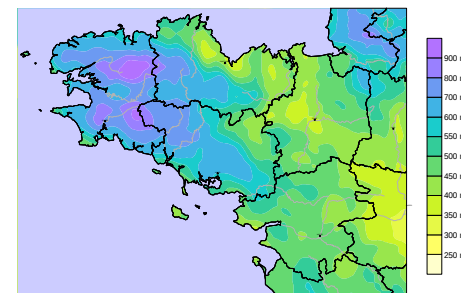
Scénario A2 – Horizon 2030



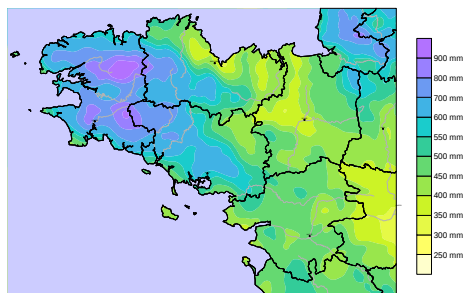
Scénario A2 – Horizon 2050



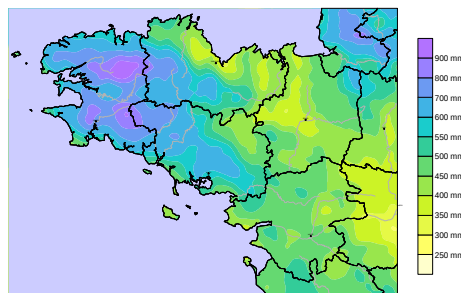
Scénario A2 – Horizon 2080



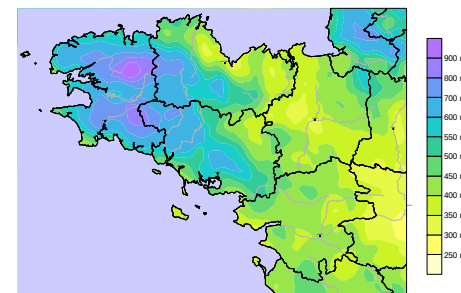
Scénario A1B – Horizon 2030



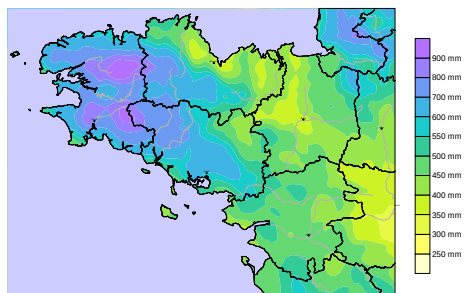
Scénario A1B – Horizon 2050



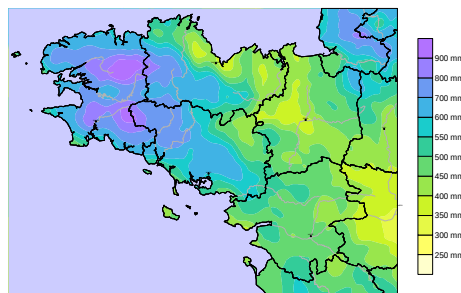
Scénario A1B – Horizon 2080



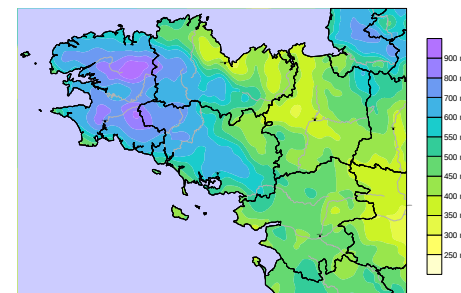
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

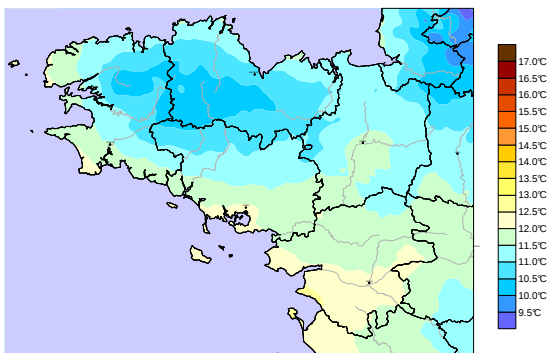
Cette planche cartographique représente l'évolution des températures moyennes pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence, pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

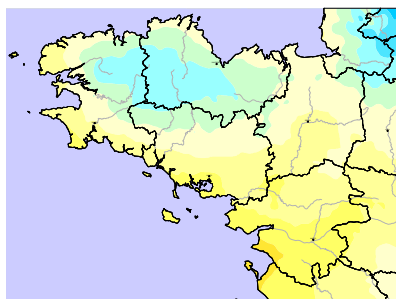
- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

Climatologie de référence Période 1971 - 2000

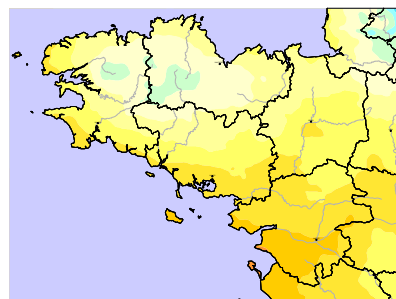


La température moyenne d'une journée est la moyenne arithmétique des températures minimales et maximales relevées sous abri pour cette journée.

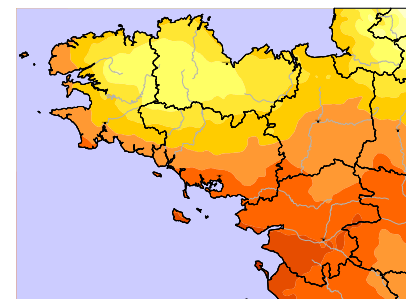
Scénario A2 – Horizon 2030



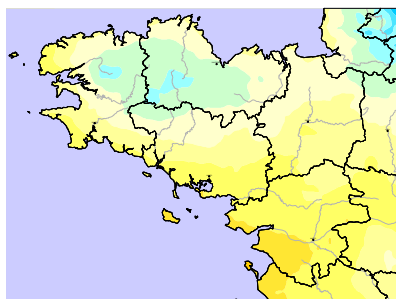
Scénario A2 – Horizon 2050



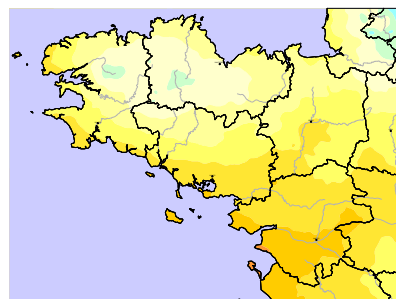
Scénario A2 – Horizon 2080



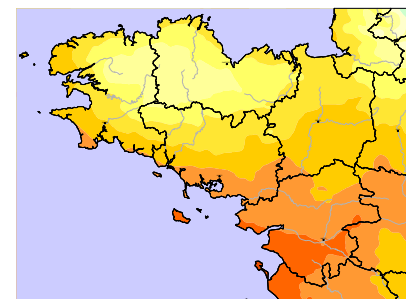
Scénario A1B – Horizon 2030



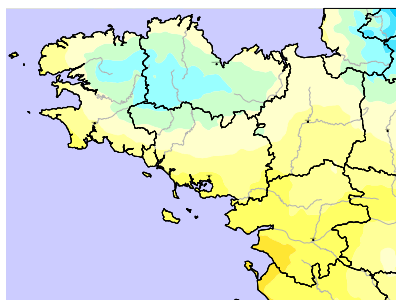
Scénario A1B – Horizon 2050



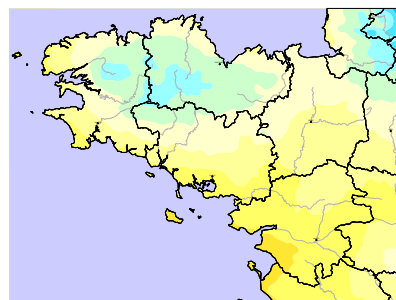
Scénario A1B – Horizon 2080



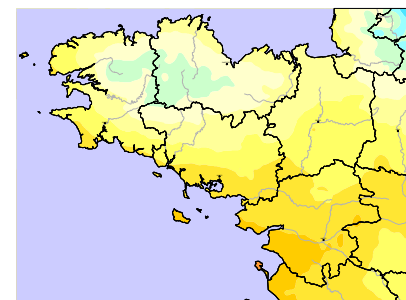
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

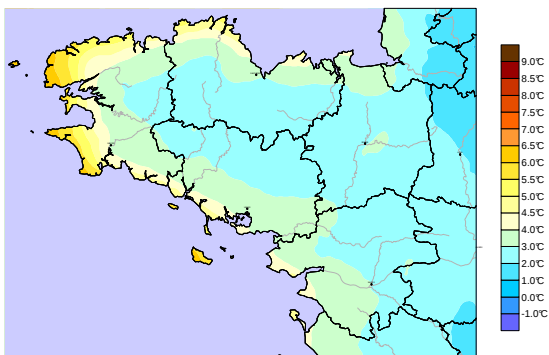
Cette planche cartographique représente l'évolution des moyennes des températures minimales d'hiver (décembre à février) pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

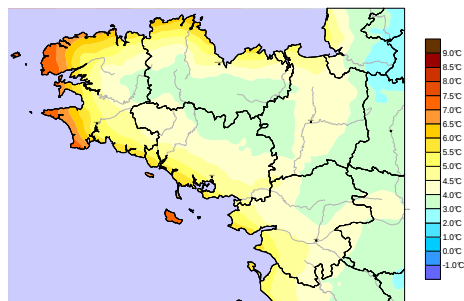
Climatologie de référence Période 1971 - 2000



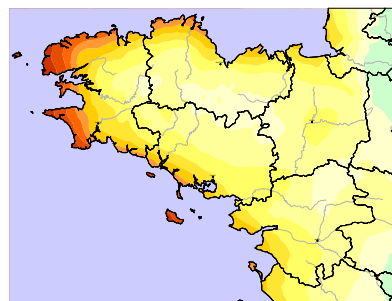
La température minimale d'une journée est la température la plus basse relevée sous abri de 06UTC* ce jour à 06UTC* le lendemain.

*Heure UTC d'hiver = heure légale - 1h

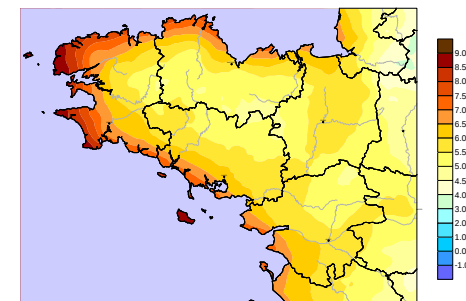
Scénario A2 – Horizon 2030



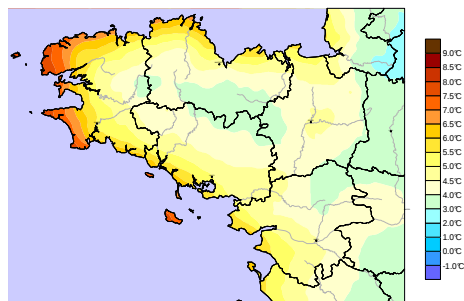
Scénario A2 – Horizon 2050



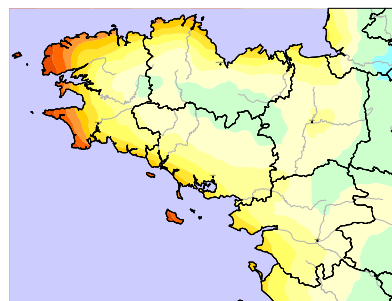
Scénario A2 – Horizon 2080



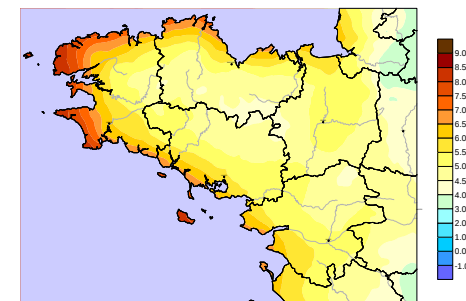
Scénario A1B – Horizon 2030



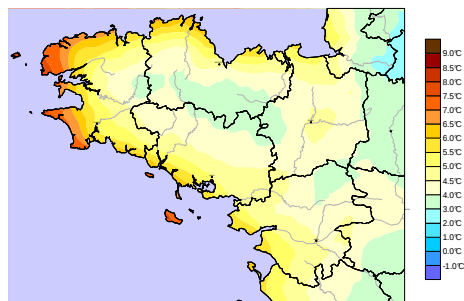
Scénario A1B – Horizon 2050



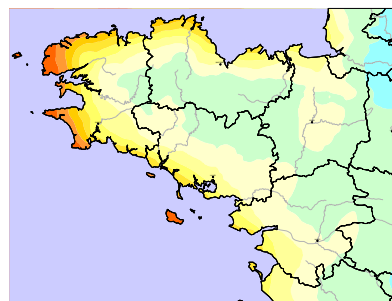
Scénario A1B – Horizon 2080



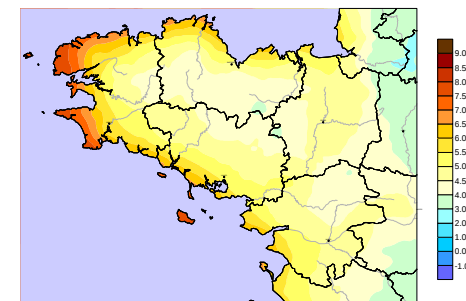
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





Moyennes des températures maximales d'été (juin à août)

PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

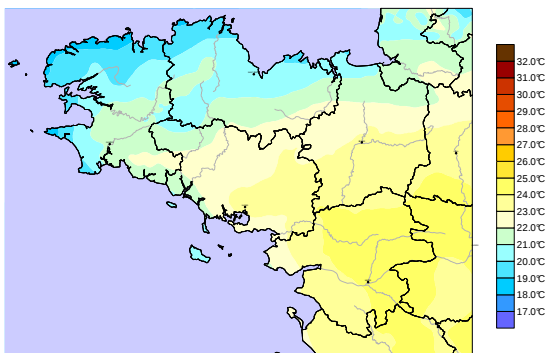
Cette planche cartographique représente l'évolution des moyennes des températures maximales d'été (juin à août) pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

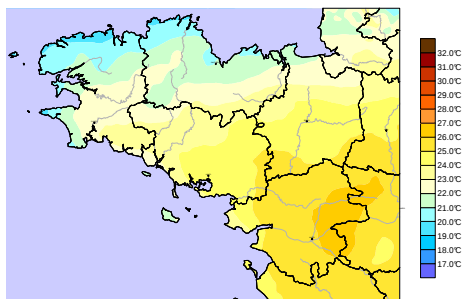
Climatologie de référence Période 1971 - 2000



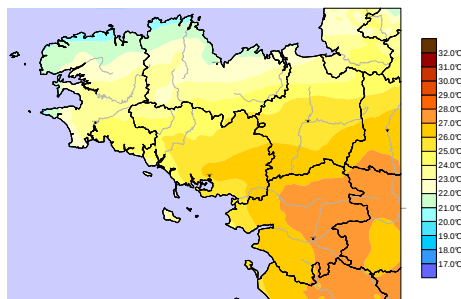
La température maximale d'une journée est la température la plus élevée relevée sous abri de 18UTC* la veille à 18UTC* le jour même.

*Heure UTC d'été = heure légale - 2h

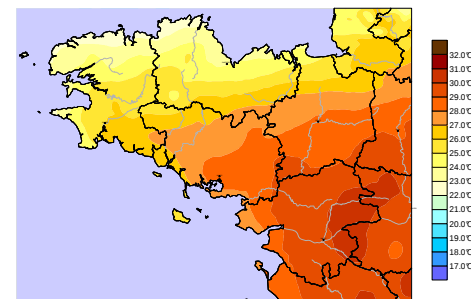
Scénario A2 – Horizon 2030



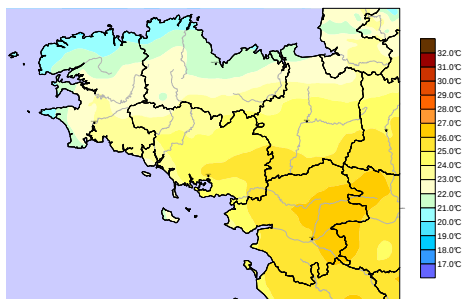
Scénario A2 – Horizon 2050



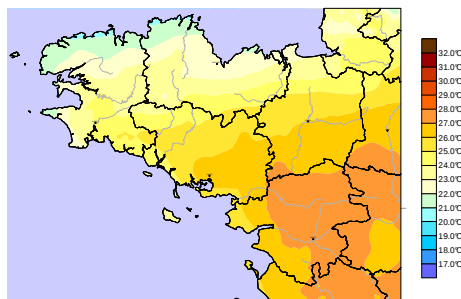
Scénario A2 – Horizon 2080



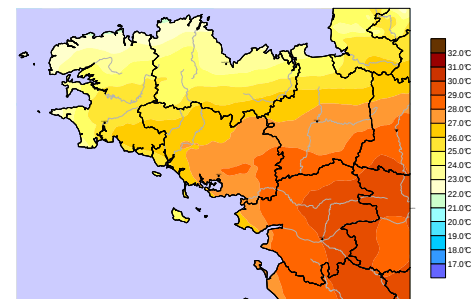
Scénario A1B – Horizon 2030



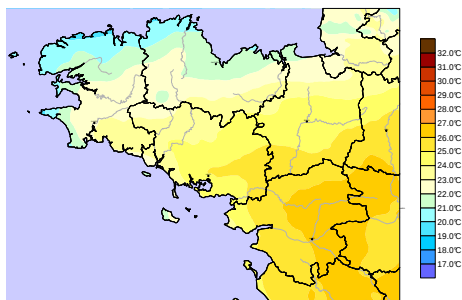
Scénario A1B – Horizon 2050



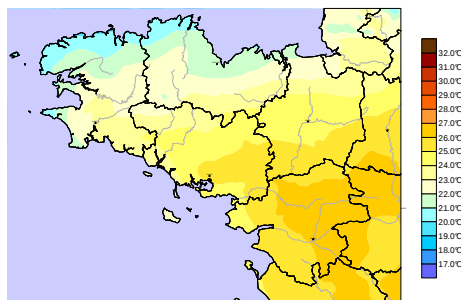
Scénario A1B – Horizon 2080



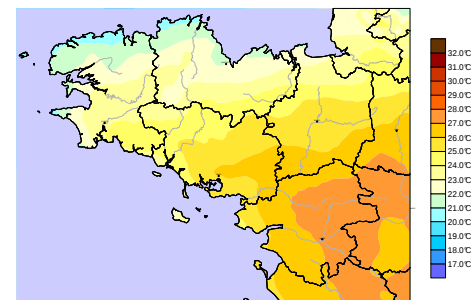
Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080





PROJECTION D'INDICATEURS CLIMATIQUES

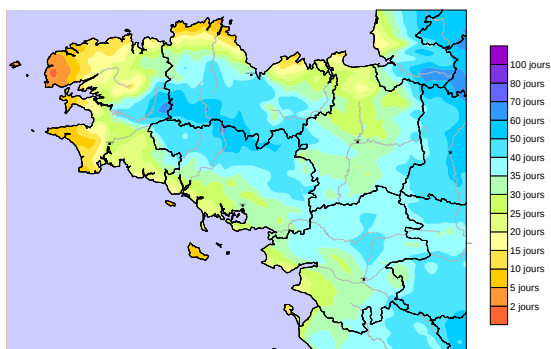
Cette planche cartographique représente l'évolution du nombre moyen de jours de gel par an pour divers horizons climatiques.

La carte ci-dessous est tracée à partir des observations sur la période 1971-2000 et d'une méthode de spatialisation fine (résolution 1km) prenant en compte le relief (AURELHY).

Les cartes ci-contre sont obtenues en superposant la variation (écart à la simulation de référence) projetée par le modèle ARPEGE-CLIMAT (résolution 50km) et la climatologie de référence pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

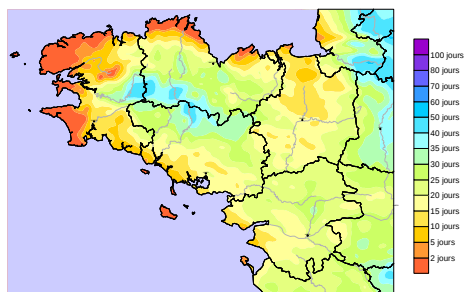
- moyennes trentenaires autour de 2030 (2016-2045), 2050 (2036-2065) et 2080 (2066-2095).
- pour 3 scénarios du GIEC (A2, A1B et B1)

Climatologie de référence Période 1971 - 2000

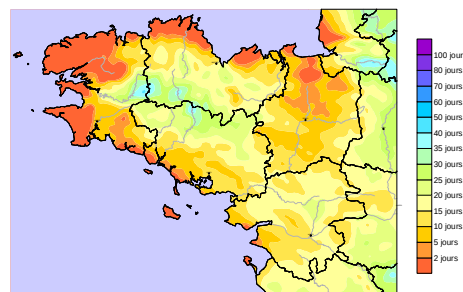


Une journée est comptée jour de gel lorsque la température minimale est inférieure ou égale à 0° C.

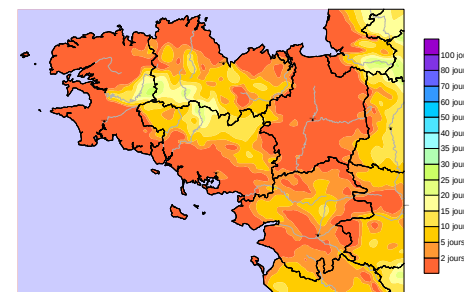
Scénario A2 – Horizon 2030



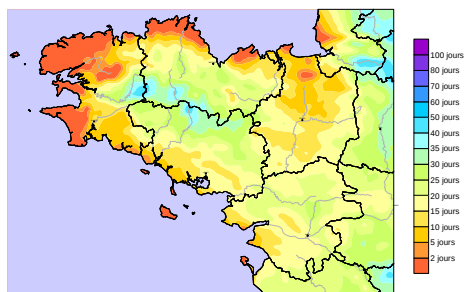
Scénario A2 – Horizon 2050



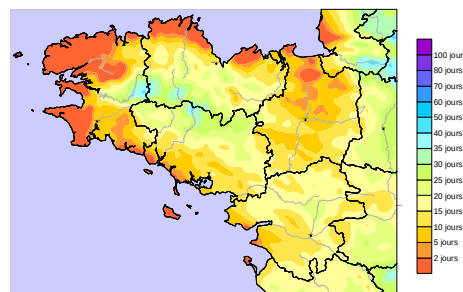
Scénario A2 – Horizon 2080



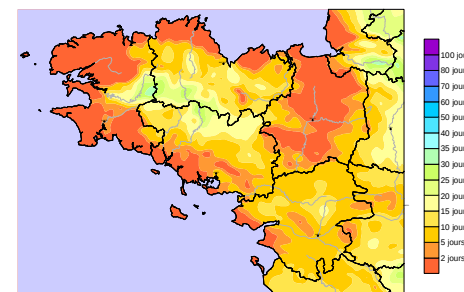
Scénario A1B – Horizon 2030



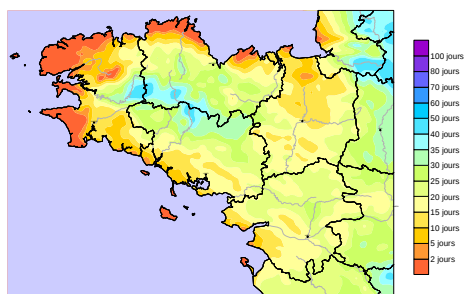
Scénario A1B – Horizon 2050



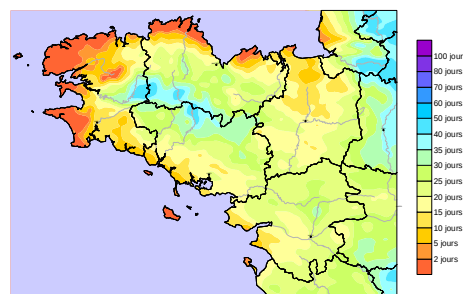
Scénario A1B – Horizon 2080



Scénario B1 – Horizon 2030



Scénario B1 – Horizon 2050



Scénario B1 – Horizon 2080

