



Rapport d'étude

Changement climatique en Haute-Normandie

DREAL Haute-Normandie
Juin 2011



Table des matières

I. CLIMAT ACTUEL ET EVOLUTION RECENTE

I.1 - Indicateurs températures	4
I.1-1 Température moyenne annuelle.....	4
I.1-2 Température moyenne minimale	4
I.1-3 Température moyenne maximale	5
I.1-4 Gel.....	6
I.1-5 Fortes chaleurs.....	6
I.1-6 Température moyenne (hiver /Eté).....	7
I.2 - Indicateurs de précipitations.....	8
I.2-1 Cumul de précipitations annuel.....	8
I.2-2 Analyse des précipitations à l'échelon saisonnier.....	8
I.2-3 Nombre de jours par an de précipitations>10mm.....	9
I.3 Vent.....	9
I.4 Indicateurs élaborés.....	10
I.4-1 Canicule	10
I.4-2 DJU (Degré Jour Unifié).....	10
I.4-3 Longues pluies hivernales.....	11
I.4-4 La sécheresse.....	11
I.5 - Séries homogénéisées de température.....	12
I.6 - Évènements marquants.....	14
I.6-1 Canicule : août 2003.....	14
I.6-2 Vague de froid : hiver 1962/1963.....	16
I.6-3 Tempête : Lothar le 26/12/1999.....	16
I.6-4 Pluies orageuses exceptionnelles : 16 juin 1997.....	17
I.6-5 Crue ou fortes précipitations hivernales : décembre 1999.....	17
I.6-6 Sécheresse : 1976.....	18

II. CLIMAT FUTUR

II.1 - Etapes nécessaires à la réalisation d'une étude d'impact. .	19
II.1-1 Les scénarios	20
II.1-2 Les modèles du climat.....	20
II.1-3 Les incertitudes.....	21
II.1-4 Méthodologie et recommandations.....	22
II.2 - Évolution des paramètres de température.....	26
II.2-1 La tendance moyenne annuelle.....	26
II.2-2 L'évolution en été.....	26
II.2-3 L'évolution en hiver.....	27
II.3 - Évolution des paramètres de précipitations et de rafales...	27
II.3-1 Evolution des paramètres moyens.....	27
II.3-2 Evolution des paramètres extrêmes.....	28

Cette étude sur le changement climatique dans la région Haute-Normandie intervient dans le cadre de l'élaboration d'une étude, conduite par la DREAL, sur la vulnérabilité et sur l'adaptation de la région aux effets du changement climatique.

Nous renvoyons à la note d'accompagnement des produits « DATAR » (« *Fourniture d'indicateurs pour caractériser le changement climatique* », Catherine Conseil, nov 2010) pour des informations complémentaires sur les principes et la méthodologie employés dans la réalisation des projections climatiques.



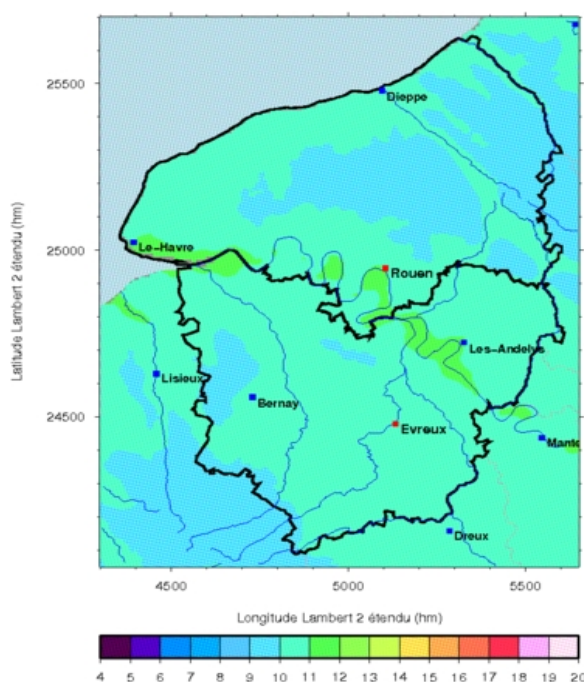
I - Climat actuel et évolution récente

Remarque : le terme « extrême » est employé pour désigner des événements rares, mais non pas exceptionnels, d'une durée de retour de l'ordre d'un mois. Il ne s'agit pas d'événements marquants comme des tempêtes ou des inondations. Ceux-ci sont abordés uniquement dans la partie I.6- .

I.1 - Indicateurs températures

I.1-1 Température moyenne annuelle

Il s'agit de la moyenne annuelle des températures moyennes quotidiennes. La température moyenne quotidienne se définit comme la moyenne arithmétique des températures minimale et maximale du jour considéré.



Les températures moyennes à l'échelle annuelle sur la région Haute-Normandie s'échelonnent de 8°C à 12°C. Les températures les plus élevées sont situées vers l'embouchure du Havre et le long du fleuve de la Seine. Des températures plus basses (de 8 à 9°C) sont présentes sur le centre du département de la Seine Maritime.

Illustration 1: Température moyenne annuelle [1971-2000] en °C

I.1-2 Température moyenne minimale

Il s'agit de la moyenne annuelle des températures minimales quotidiennes. La température minimale quotidienne se définit comme la température minimale entre 18 UTC la veille (J-1) et 18 UTC¹ le jour J.

Les températures moyennes minimales sur la région varient de 4 à 9°C. Les températures les plus élevées sont localisées sur toute la côte de la région, avec des maxima autour de 8°C situées vers le Havre. Les températures les plus basses occupent toute la partie sud de l'Eure, et le nord-est de la Seine-Maritime.

¹ UTC = temps universel par rapport au méridien de Greenwich

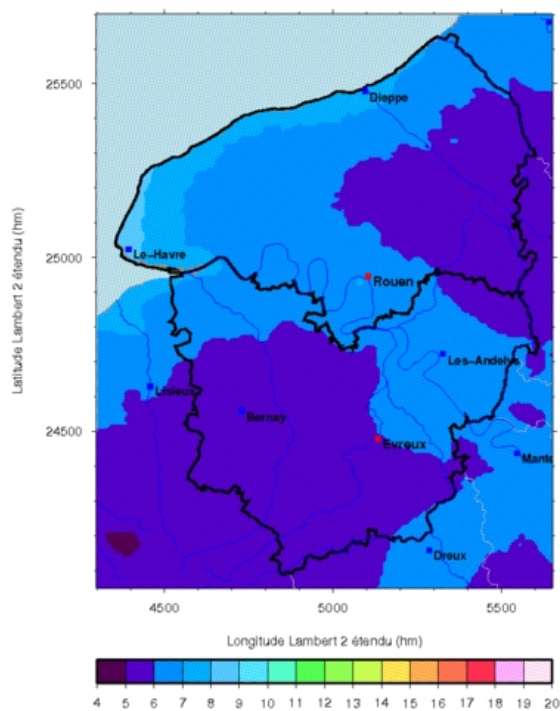


Illustration 3: Température minimale moyenne annuelle [1971-2000] en °C

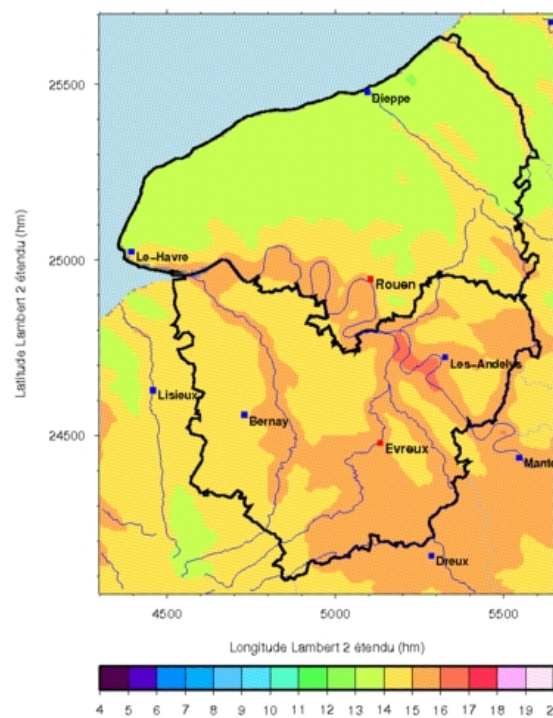


Illustration 2: Température maximale moyenne annuelle [1971-2000] en °C

1.1-3 Température moyenne maximale

Il s'agit de la moyenne annuelle des températures maximales quotidiennes. La température maximale quotidienne se définit comme la température maximale entre 06 UTC le jour J et 6 UTC le lendemain (J+1).

Les températures sur la région varient de 13 à 17°C. Les températures les plus élevées sont situées le long de la Seine vers le Val de Reuil, jusqu'au Sud des Andelys. Les plus faibles températures occupent une majeure partie nord de la Seine-Maritime.

I.1-4 Gel

Nombre de jours de gel (température minimale inférieure à 0°C) par an.

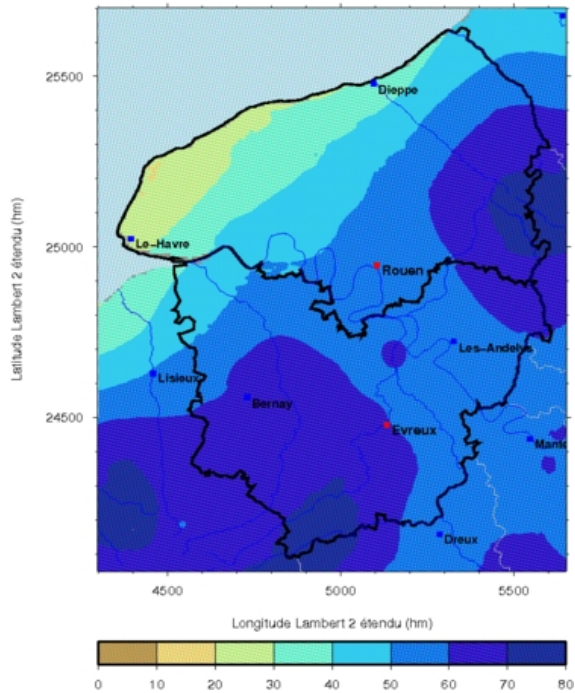


Illustration 4: Nombre de jours de gel par an, $T_n < 0^\circ\text{C}$ [1971-2000]

Les gelées (température minimale inférieure à 0°C) varient de 20 à 80 jours par an dans la région. Elles sont plus nombreuses au sud de l'Eure (60 à 80 jours de gelées), et dans le nord-est de la Seine-Maritime avec un maximum compris entre 70 et 80 jours. A contrario on recense, sur les côtes de la région havraise allant jusqu'aux environs de Saint Valery en Caux, le plus faible nombre de jours de gelées s'élevant à une dizaine de jours par an.

I.1-5 Fortes chaleurs

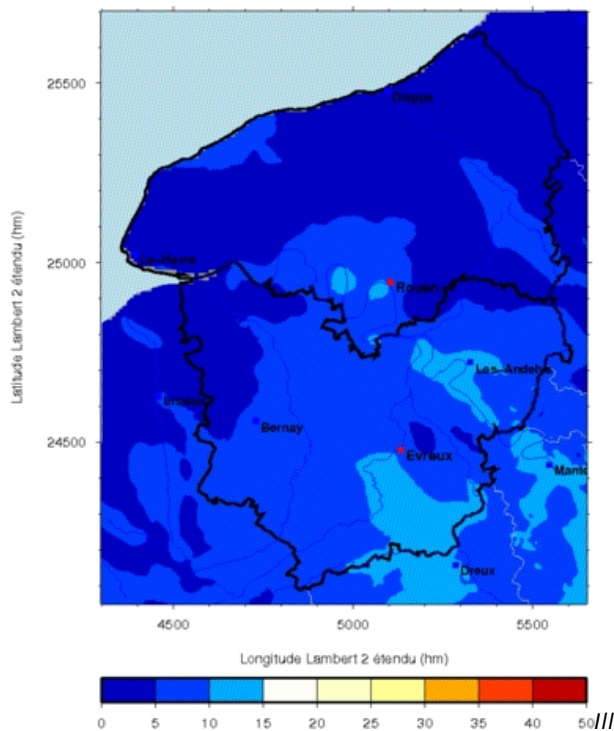


Illustration 5: Nombre de jours de fortes chaleurs, $T_x > 30^\circ\text{C}$ [1971-2000]

Il s'agit du nombre de jours dans l'année où la température maximale quotidienne est supérieure 30°C.

Le nombre de jours chauds peut varier jusqu'à 15 jours par an sur la région. Le maximum est observé sur le sud du plateau de Saint André (au sud d'Évreux) et dans le Vexin normand et Bossu.

1.1-6 Température moyenne (hiver /Eté)

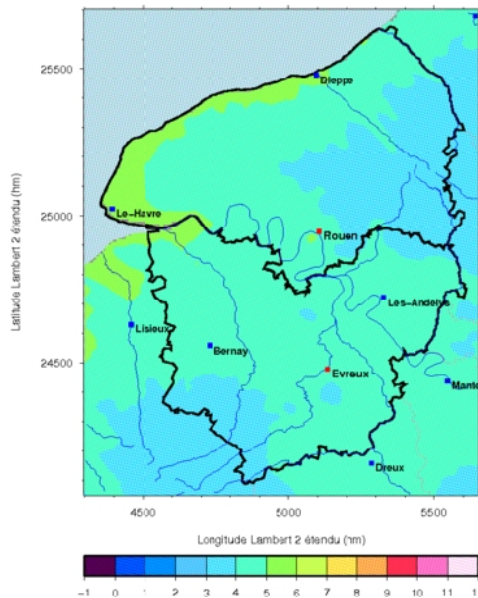


Illustration 6: Température moyenne hivernale [1971-2000] en °C

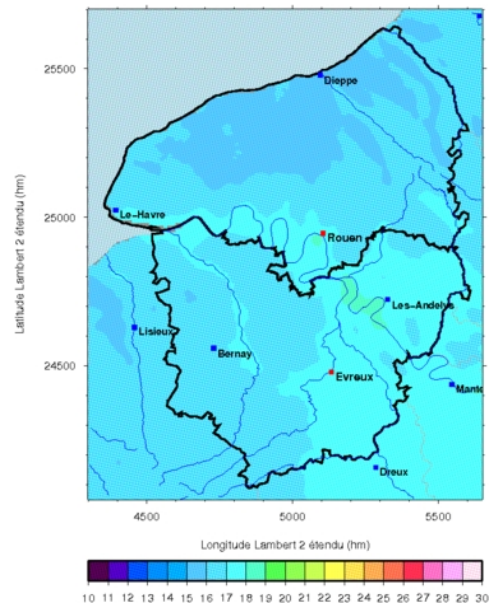


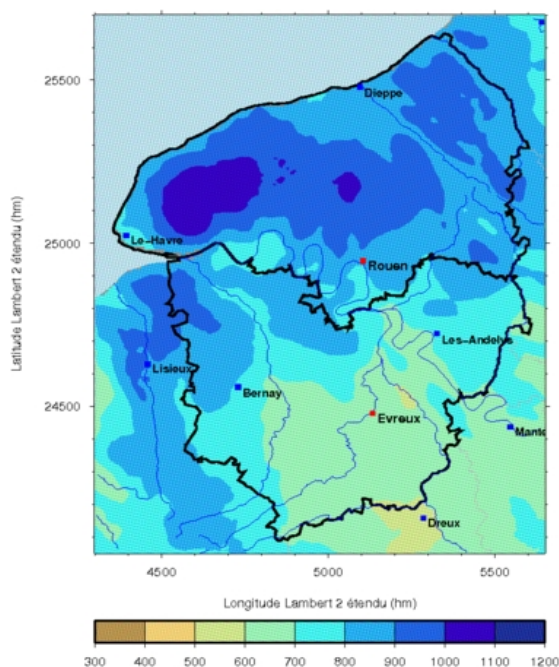
Illustration 7: Température moyenne estivale [1971-2000] en °C

En hiver, les températures moyennes en Haute Normandie, s'échelonnent de 3 à 6°C avec des minima localisées dans l'Eure au sud du plateau de Saint André et au sud de Neubourg, ainsi que sur le nord-est de la Seine-Maritime. Les températures plus douces sont localisées vers la région havraise, dans le nord du Pays D'Auge et sur les côtes du Pays de Caux jusqu'à Dieppe.

En été, les températures varient entre 15 et 19°C, avec des maxima situés dans la région Rouennaise, et dans une zone allant du Val de Reuil jusqu'au sud des Andelys (Vexin normand).

I.2 - Indicateurs de précipitations

I.2-1 Cumul de précipitations annuel



Les hauteurs de précipitations sur la région ne sont pas homogènes. On distingue deux zones principales :

La Seine Maritime est la zone la plus arrosée avec des cumuls de précipitations pouvant atteindre 1100 mm à l'ouest du Pays de Caux. Les cumuls dans ce département sont généralement compris entre 900 et 1000 mm. L'Eure connaît des précipitations comparativement plus faibles de l'ordre de 600 à 800 mm avec des maxima au nord-ouest du Pays d'Auge, on observe un gradient nord/sud assez marqué.

Ailleurs, vers le sud-est, les cumuls sont plus faibles, 700 mm en moyenne.

Illustration 8: Cumul annuel de précipitations [1971-2000] en mm

I.2-2 Analyse des précipitations à l'échelon saisonnier

La répartition spatiale du cumul de précipitations en hiver est quasi identique à la répartition de ce paramètre à l'échelle annuelle. On retrouve les mêmes structures (maxima vers 650 mm sur le Pays de Caux et minima vers 250 mm dans le sud-est de l'Eure).

En été, les valeurs sont plus faibles variant de 250 à 450 mm. En Seine-Maritime les cumuls vont de 350 à 450 mm avec des maxima localisés au Nord et des minima situés le long de la Seine (région rouennaise et à l'est du Roumois).

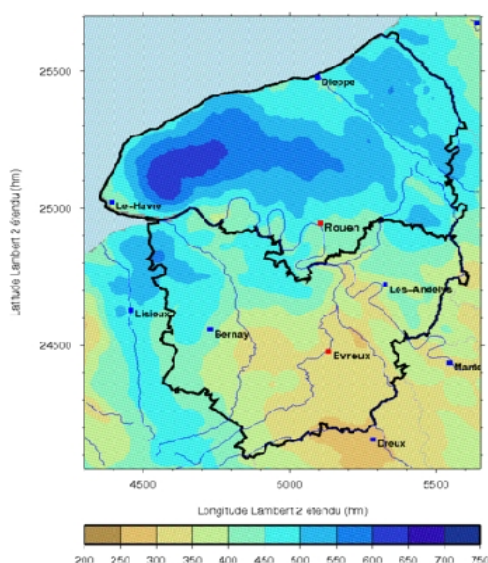


Illustration 9: Cumul de précipitations hivernal [1971-2000] en mm

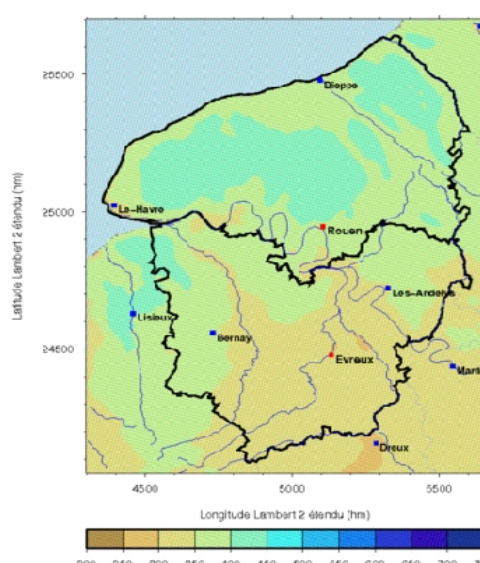
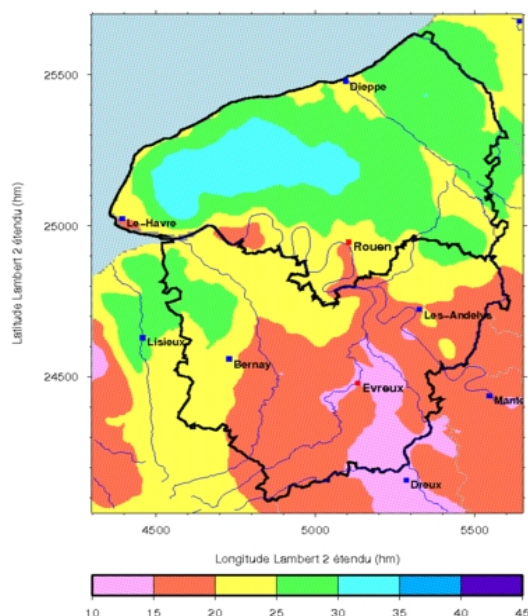


Illustration 10: Cumul de précipitations estival [1971-2000] en mm

1.2-3 Nombre de jours par an de précipitations > 10mm



La répartition spatiale du nombre de jours de fortes pluies montre que les fortes pluies sont plus fréquemment observées en Seine-Maritime avec un maximum de 35 jours par an, tandis que le minimum de jours (entre 10 et 15 jours) de pluies fortes est relevé dans le sud de l'Eure.

Illustration 11: Nombre de jours par an de précipitations > 10mm [1971-2000]

1.3 Vent

Un secteur d'une rose des vents indique la fréquence du vent venant de la direction pointée. Plus le secteur est allongé, plus le vent souffle de cette direction. De plus, une rose des vents donne les indications de direction en fonction de classes de vitesse (vent faible, modéré ou fort). On ne s'intéresse pas à la direction des vents les plus faibles ou nuls (< 1,5 m/s, soit 5 km/h).

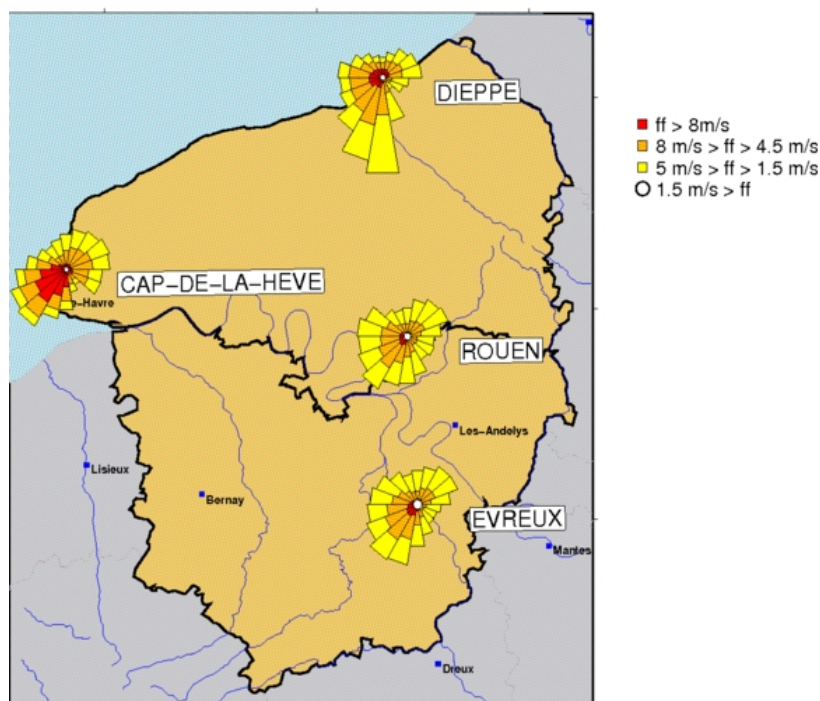


Illustration 12: Rose des vents moyens à 10m [1981-2000]

La rose des vents sur les 4 villes de la région Haute-Normandie indiquent que la direction principale des vents est de secteur sud-ouest. On remarque une proportion conséquente de vents forts ($> 8\text{m/s}$, soit 30 km/h) au Cap-de-la-Hève, également de secteur sud-ouest. La représentativité de ces observations est à relativiser à cause de l'emplacement du capteur (falaise).

Dans la suite, on s'intéressera à l'évolution du nombre de jours de fortes rafales, définies par une force supérieure à 100km/h . Ces événements sont rares, de l'ordre de 1 à 3 par an.

I.4 Indicateurs élaborés

Remarque: les valeurs des indicateurs suivants sont calculées sur la période de référence 1971-2000 à partir des données modèle ARPEGE-CLIMAT, pour une comparaison ultérieure aux échéances 2030, 2050, 2080.

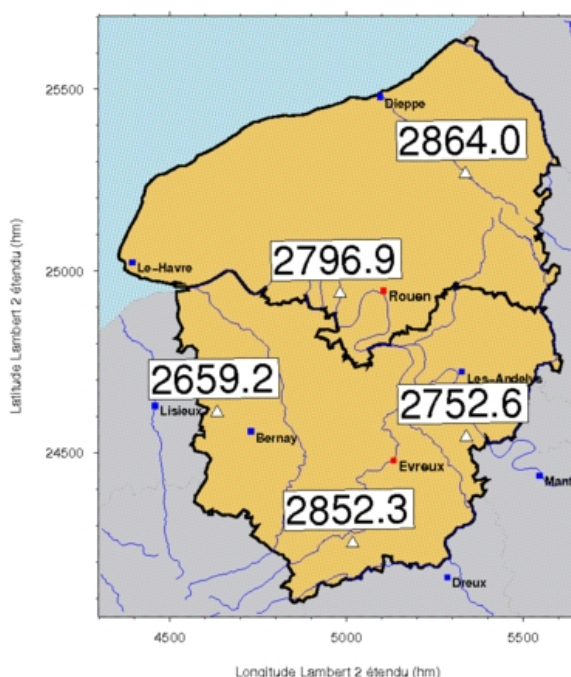
I.4-1 Canicule

Nombre de jours par an en situation de canicule d'après le critère de l'INVS (jour caniculaire : moyenne de $(J-1;J+1)$ des T_{\min} supérieure à $18,5^{\circ}\text{C}$ et moyenne des T_{\max} supérieure à $33,5^{\circ}\text{C}$).

Le nombre de jours de canicule selon la définition de l'INVS est très faible pour la région de la Haute-Normandie : en moyenne sur la période [1971-2000], on dénombre ainsi entre 0 à 1 jour de canicule par an.

I.4-2 DJU (Degré Jour Unifié)

I.4-2/1 Degré jour chauffagiste



Cet indicateur permet de réaliser des estimations de consommation d'énergie pour le chauffage d'un bâtiment, en proportion de la rigueur de l'hiver. Il est calculé grâce à une méthode type déficit avec un seuil S égal à 18°C :

si $S \leq T_{\text{moy}}$
alors $\text{DJU} = 0^{\circ}\text{C}$,
sinon
 $\text{DJU} = 18^{\circ}\text{C} - T_{\text{moy}}$.

L'indicateur est égal à la somme des DJU par an.

Illustration 13: DJU chauffage annuel [1971-2000] en $^{\circ}\text{C}$

Les valeurs de cet indicateur dans la région varient entre 2650°C dans le sud-ouest de L'Eure et 2900°C vers le nord de la Seine-Maritime et le sud-est de L'Eure.

Les DJU observés correspondant à la station d'Évreux valent 2873°C et sont bien en accord avec les valeurs obtenues par le modèle. A titre de comparaison, les DJU pour la station d'Aix-en-Provence sont d'environ 2000°C .

I.4-2/2 Degré jour climaticien

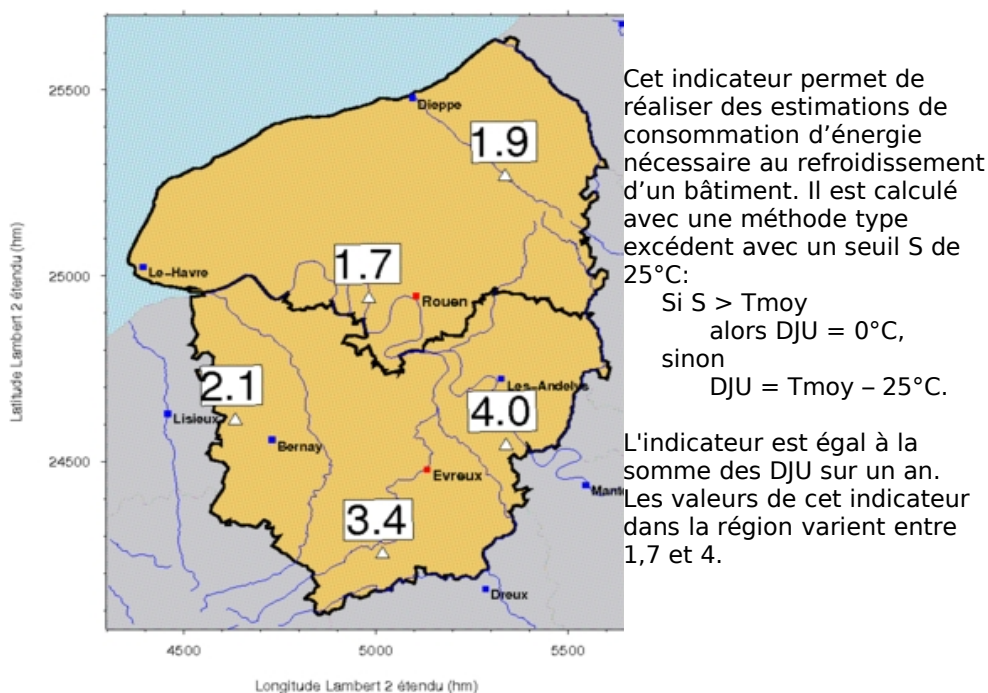


Illustration 14: DJU climatisation annuel [1971-2000] en $^{\circ}\text{C}$

I.4-3 Longues pluies hivernales

Cet indicateur est représentatif du phénomène de pluies stratiformes plus fréquent lors de la saison hivernale. Il s'agit de pluies le plus souvent faibles à modérées, mais de longue durée.

L'indicateur choisi est défini comme le nombre d'épisodes de précipitations sur 4 jours consécutifs au moins. Un jour de pluies est un jour pour lequel les précipitations sont supérieures à 0,2mm. Le seuil fixé de 4 jours permet de filtrer des événements remarquables, mais ayant une durée de retour limitée de l'ordre du mois. On atteint ainsi sur la période 1971/2000 un ordre de grandeur de 8 événements d'octobre à mars.

On interprète ces épisodes non pas forcément comme une pluie ininterrompue de 4 jours au moins, mais comme une succession rapprochée d'épisodes pluvieux stratiformes.

I.4-4 La sécheresse

Nous nous reportons à l'étude pour la DATAR pour ce paramètre. La variable employée pour présenter l'évolution des sécheresses dans le cadre du changement climatique est le temps passé en état de sécheresse, exprimé en pourcentages de jours par an.

La sécheresse est définie comme un déficit en eau au cours du cycle hydrologique modélisé par la chaîne SIM. SIM est le modèle hydrologique de référence de Météo-France. Il couvre tout le territoire à résolution $8 \times 8 \text{ km}$. Il simule les caractéristiques du sol, de la végétation, le débit des rivières et le niveau de certaines nappes phréatiques.

Dans la climatologie actuelle, l'indicateur a une valeur faible, partout inférieure à 10% de jours par an en situation de sécheresse.

I.5 - Séries homogénéisées de température

Météo-France est chargé d'apporter le diagnostic du climat passé sur l'ensemble du territoire français. Pour cela, l'établissement gère et analyse de longues séries climatiques qui sont des sources d'information indispensables pour mieux comprendre et détecter la variabilité et les changements du climat.

A partir de ces longues séries de données, il est possible d'analyser les tendances d'évolution du climat pour certains paramètres comme la température minimale et la température maximale et de les valider statistiquement. Ces tendances peuvent être calculées sur les 50 dernières années pour les longues séries de données ayant fait l'objet d'une homogénéisation.

L'homogénéisation consiste à analyser précisément la chronologie des données et à détecter et corriger les discontinuités d'origine non climatique.

Ces longues séries homogénéisées, issues de traitements élaborés, sont relativement peu nombreuses. Il s'agira donc de sélectionner les longues séries les plus à même de représenter l'évolution du climat local. Pour ce qui est de la Haute-Normandie, 2 stations sont retenues, l'une sur le littoral de la Seine-Maritime (Dieppe) et l'autre près d'Évreux (à savoir Guichainville). La série de Dieppe est considérée comme étant de bonne qualité. Celle de Guichainville a connu quelques ruptures, mais elle reste largement exploitable.

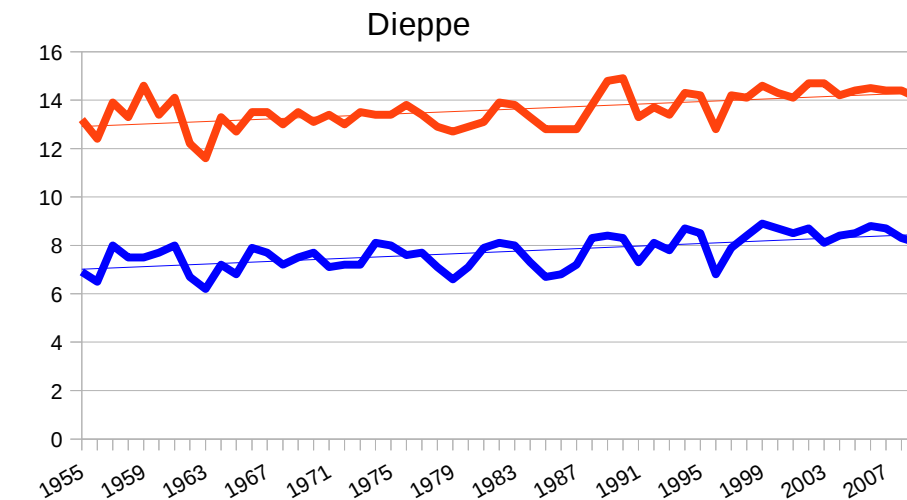


Illustration 15: Série homogénéisée Tmin et Tmax de Dieppe (76) en °C

Guichainville

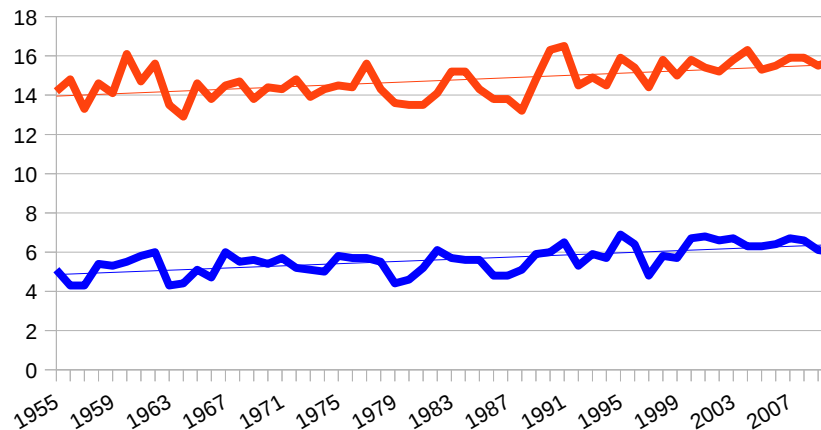


Illustration 16: Séries homogénéisée Tmin et Tmax de Guichainville (27) en °C

Interpretation

L'étude des séries montre que la tendance est de 2,6 °C à 2,9°C par siècle environ sur les 50 dernières années à Dieppe et Guichainville, en Tmax et Tmin. Nous rappelons que le réchauffement observé dans le nord de la France sur le XXe siècle est de 0,8°C environ. La tendance plus élevée des séries concorde avec l'accélération du phénomène de ces dernières décennies. L'ampleur de la différence entre les tendances et le réchauffement observé est dû à la fenêtre temporelle choisie. En effet, les décennies 1950 et 1960 ont connu une stagnation du réchauffement, à l'inverse des 30 dernières années. Les valeurs doivent donc être considérées avec précaution. Le test de significativité de la tendance montre que celle-ci est bien significativement supérieure à 0.

On remarque que la tendance à Guichainville, située à l'intérieur des terres, est légèrement plus marquée qu'à Dieppe, de 0,2°C environ par siècle. Cette disparité entre le littoral et le reste de la région demanderait à être validée par d'autres données, mais elle correspond un fait vérifié au niveau mondial : les continents se réchauffent plus vite que les zones côtières (et a fortiori les océans).

Par ailleurs, la Tmax présente une variabilité légèrement plus élevée que la Tmin. L'écart-type plus important n'empêche toutefois pas la tendance d'être significative.

Paramètre	Tendance sur un siècle (b)	Estimation de l'écart-type (σ) ramenée sur un siècle	Probabilité critique ($P(> b/\sigma)$)	Coefficient de corrélation linéaire R
DIEPPE				
Tmin	2,66°C / siècle	0,46°C / siècle	$3,5 \cdot 10^{-7}$	0,38
Tmax	2,58°C / siècle	0,51°C / siècle	$5,3 \cdot 10^{-6}$	0,31
GUICHAINVILLE				
Tmin	2,77°C / siècle	0,45°C / siècle	$8,5 \cdot 10^{-8}$	0,4
Tmax	2,9°C / siècle	0,63°C / siècle	$2,3 \cdot 10^{-5}$	0,27

La probabilité critique donne, pour une tendance nulle, la probabilité de dépasser la valeur $|b/\sigma|$.

I.6 - Évènements marquants

Les événements marquants emblématiques survenus en Haute-Normandie depuis une cinquantaine d'années sont analysés ci-dessous. Ils sont classés par type d'événement : canicule, vague de froid, tempête, orage, crue et sécheresse.

I.6-1 Canicule : août 2003

Pendant 10 jours, les températures minimales et maximales ont été exceptionnellement chaudes. La moyenne des températures maximales du 03 au 12 août vont de 27°C sur la côte (brises de mer) jusqu'à 38.6°C à Breteuil dans le sud de l'Eure (cf Illustration 17).



Moyenne des températures maximales quotidiennes

Du 03/08/2003 au 12/08/2003

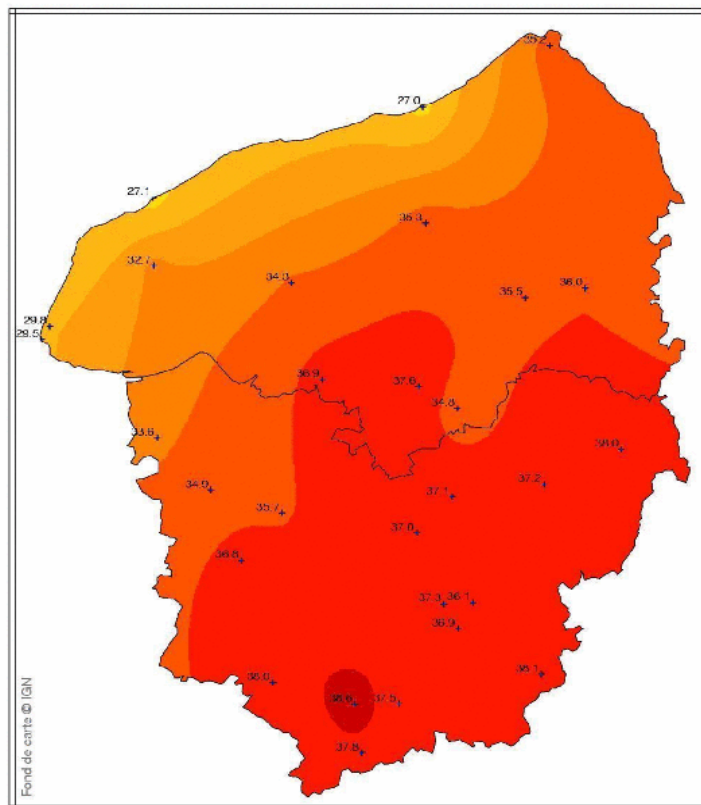


Illustration 17: Moyenne des températures maximales quotidiennes du 3 au 12 août 2003 en °C

Les jours où la température maximale a dépassé les 35°C ont été très fréquents durant ces 10 jours, à l'exception de la côte (cf Illustration 18). Les 40°C ont été dépassés le 10 vers le plateau de l'Eure (27) et ponctuellement vers le Val de Seine (76). Dans le plateau de l'Eure (27), ces 40°C ont également été dépassés les 6, 9 et 11 août 2003. Le record absolu est de 41.4°C à la station d'Evreux-Ville. Auparavant les 40°C n'avaient jamais été atteints dans la région depuis le début des mesures.

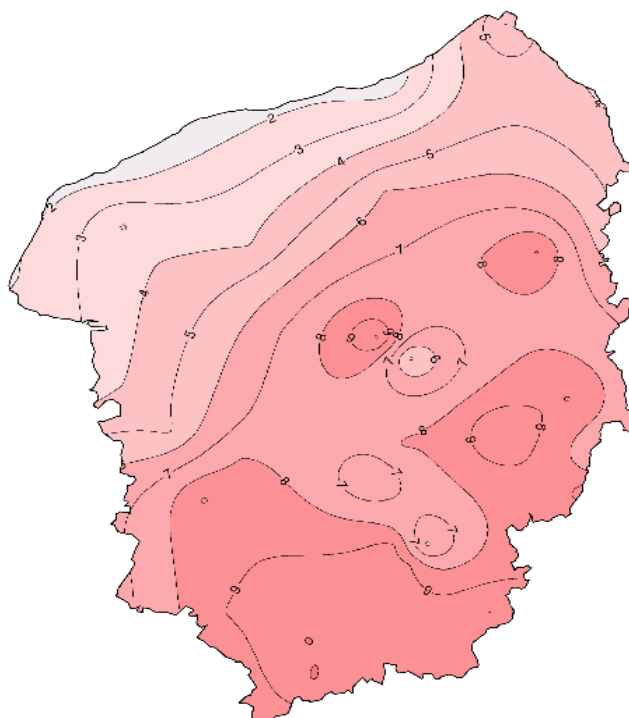


Illustration 18: Nombre de jours en août 2003 avec une température maximale quotidienne $> 35^{\circ}\text{C}$

Les températures minimales ont été elles aussi exceptionnellement chaudes. Le matin du 11, elles sont à peine descendues en dessous des 25°C , niveau de la normale des températures *maximales* : on a mesuré 24.8°C à la station d'Evreux-Huest.

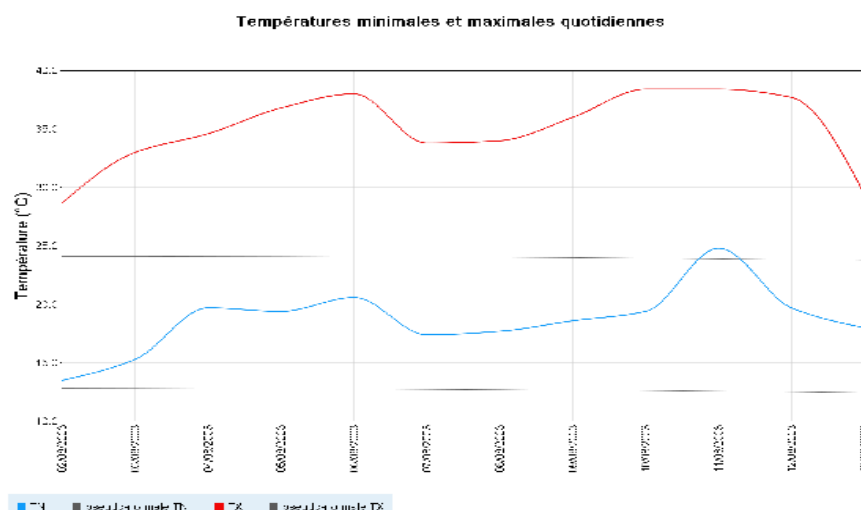


Illustration 19: Températures minimales et maximales quotidiennes à Evreux-Huest (27) en $^{\circ}\text{C}$

I.6-2 Vague de froid : hiver 1962/1963

L'hiver le plus froid et le plus long dans la région fut celui de décembre 1962 à février 1963 (du 23/12/1962 au 26/02/1963). Au cours de cet hiver, plus de 60 jours de gel ont été observés sur la côte et jusqu'à 75 jours de gel dans les terres sur 90 jours au total. Les jours sans dégel ont aussi été nombreux, souvent de 25 à 30 jours.

L'anomalie de température moyenne pour ces 3 mois d'hiver a été de plus de 5°C en dessous des normales (cf Illustration 20 et Illustration 21).

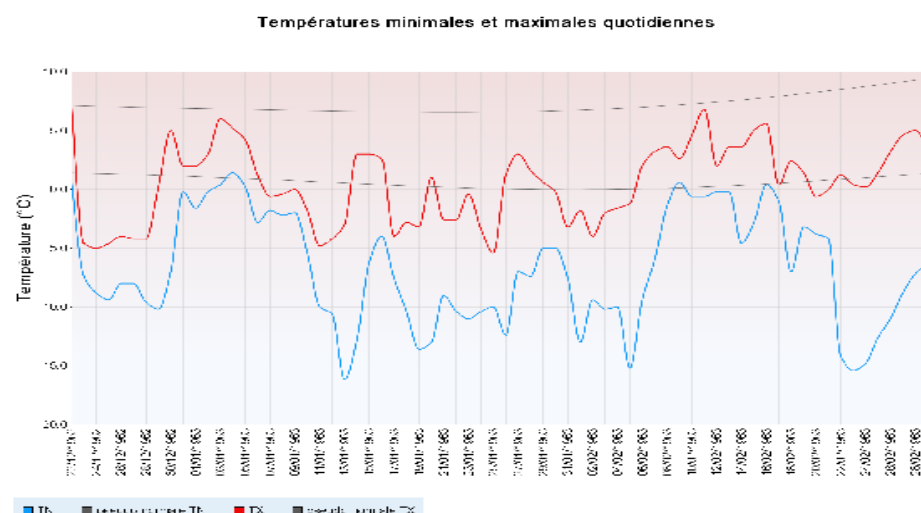


Illustration 20: Températures à Guichainville (27) durant l'hiver 1962/1963 en °C

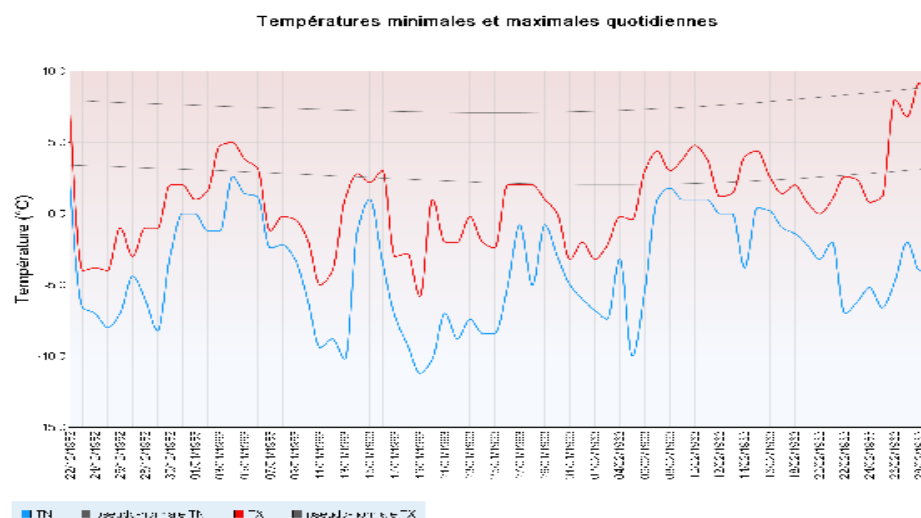


Illustration 21: Températures à Dieppe (76) durant l'hiver 1962/1963 en °C

I.6-3 Tempête : Lothar le 26/12/1999

Les rafales généralisées les plus fortes, à l'intérieur des terres, se sont produites lors de la tempête Lothar du 26/12/99 (centrée vers le sud) avec 140 km/h relevé dans les station d'Evreux-Huest et Rouen-Boos.

La tempête du 16/10/1987 (centrée vers le nord-ouest) a été moins forte à l'intérieur des terres (122 km/h à Evreux et 130 km/h à Rouen) mais plus intense vers les côtes. On a mesuré 137 km/h à Dieppe et 180 km/h au Cap-de-la-Hève, ce qui est le record absolu mesuré sur la Haute-Normandie.

1.6-4 Pluies orageuses exceptionnelles : 16 juin 1997

De violents orages ont provoqué des inondations et des coulées de boue dans le Pays de Caux. Les cumuls quotidiens de précipitations durant ces orages ont atteint 144 mm à Auzebosc (76) et 110 mm à Etrepagny (27) (cf Illustration 22).



Cumul quotidien des précipitations
16 Juin 1997 – Haute-Normandie

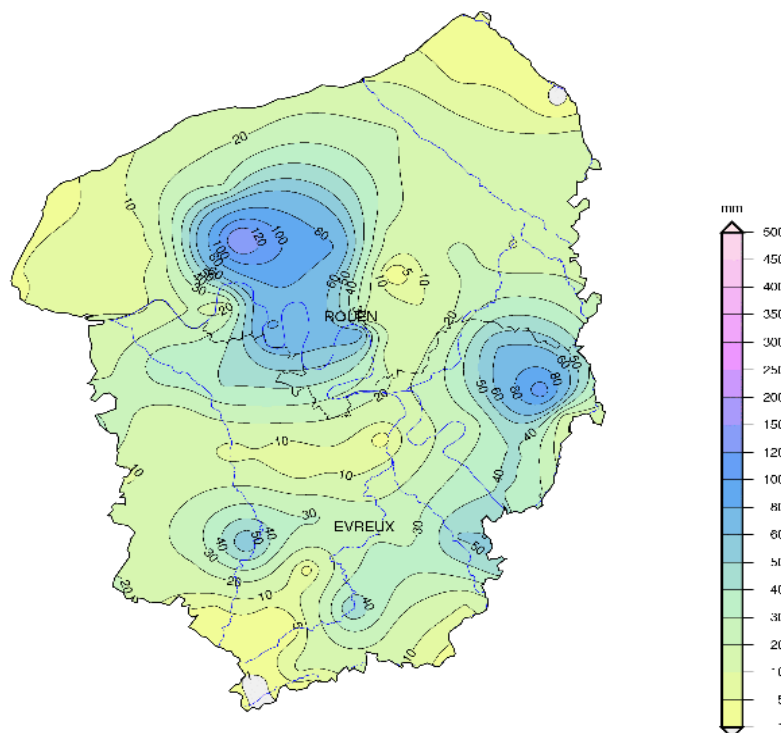


Illustration 22: Cumul quotidien de précipitations le 16 juin 1997.

1.6-5 Crue ou fortes précipitations hivernales : décembre 1999

Des pluies diluviennes associées à la tempête se sont abattues le 25 et 26 décembre sur la région, à la suite desquelles la commune de Fécamp a connu des inondations.

Sur le mois on a mesuré 351.7 mm à Auffay (76) dont 156.1 mm en 6 jours, du 22 au 26 décembre (cf Illustration 23).

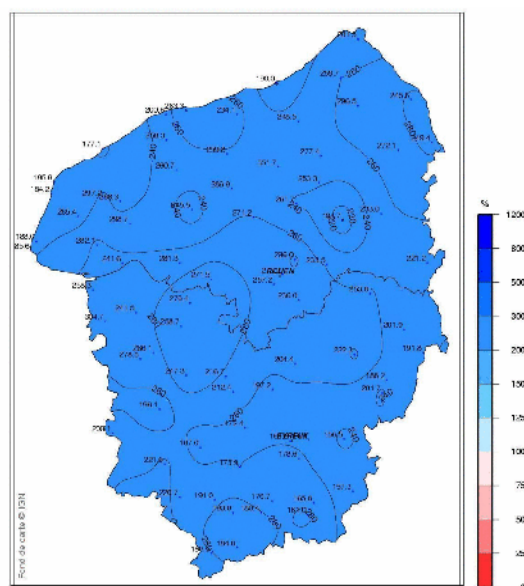


Illustration 23: Pointage du cumul mensuel de précipitations mesuré aux stations météorologiques en mm et rapport aux normales en %

I.6-6 Sécheresse : 1976

Une très longue période sèche intervient de décembre 1975 à août 1976 avec sur ces 9 mois de 60 à 75% de déficit pluviométrique sur la Haute-Normandie.

Pour information, le printemps 2011 a été souvent moins pluvieux que celui déjà très peu pluvieux de 1976. On a mesuré, par exemple, seulement 36.7 mm à Evreux-Huest de mars à mai 2011. De plus, le printemps 2011 a été le printemps le plus chaud et le plus ensoleillé et ceci a pour conséquence que l'état des sols en superficie n'a jamais été aussi sec pour une fin mai. Cependant la situation plus en profondeur est moins critique qu'en 1976 car l'hiver 2011 a été plus humide.

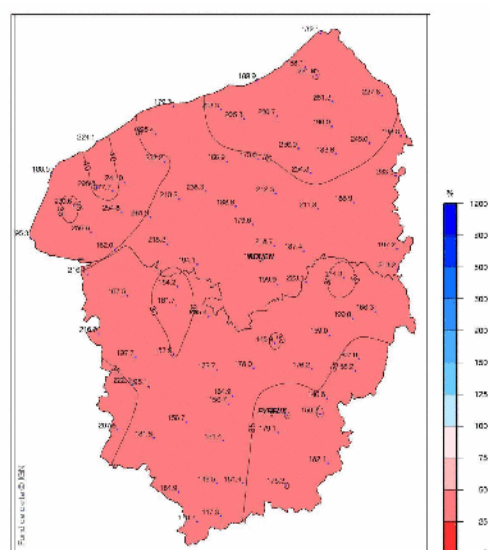
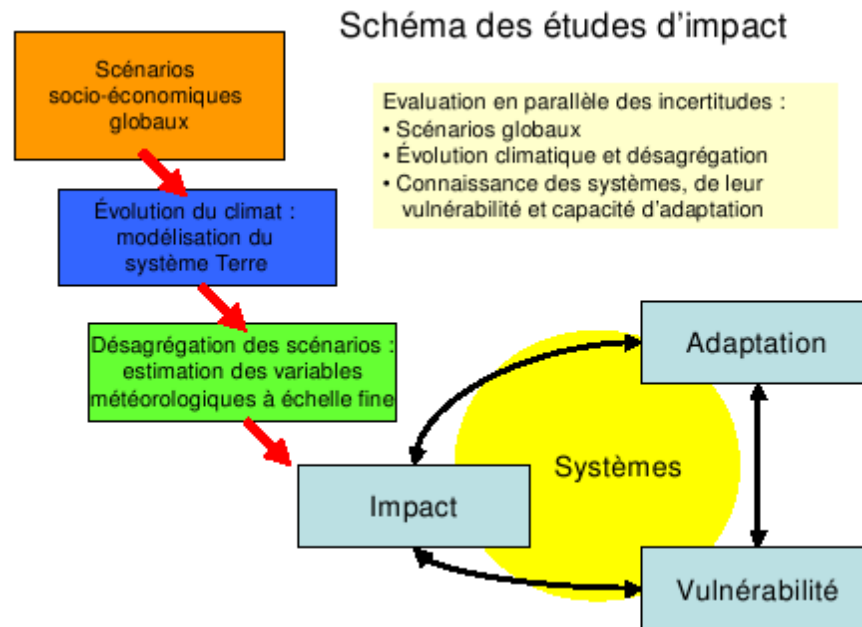


Illustration 24: Pointage du cumul de précipitations de décembre 1975 à août 1976 en mm, et rapport à la normale en %

II – Climat futur

II.1 - Etapes nécessaires à la réalisation d'une étude d'impact

Etudier l'impact du changement climatique au XXI^e siècle sur différents secteurs passe par plusieurs étapes nécessaires, qui sont illustrées sur le schéma générique ci-dessous.



On trouve, d'une part, un enchaînement d'actions sur les paramètres météorologiques qui aboutit à des projections climatiques régionalisées (*partie gauche du schéma*). D'autre part, il faut une connaissance du système à étudier, qui peut être une culture agricole, les débits des rivières, le transport,... (*partie en bas à droite*). L'effet des paramètres climatiques projetés sur le système étudié donne l'impact du changement climatique, l'adaptation et la vulnérabilité face au phénomène.

Dans le présent rapport, nous étudierons la partie purement météorologique, c'est à dire les projections climatiques régionalisées sur la Haute-Normandie, sans prise en compte d'un système en particulier.

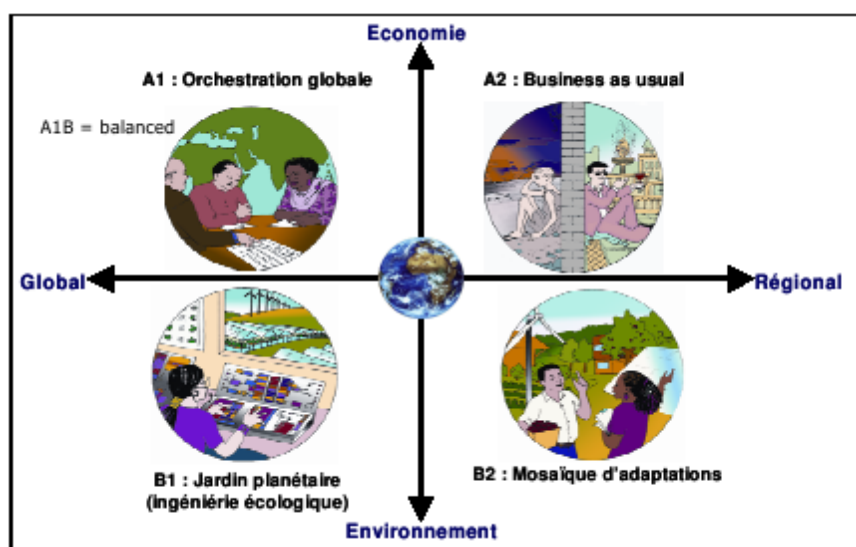
On détaille ci-dessous les ingrédients nécessaires à la réalisation d'une telle étude :

- les scénarios socio-économiques,
- les modèles climatiques,
- la prise en compte et l'évaluation des projections climatiques.

II.1-1 Les scénarios

Les scénarios socio-économiques sont ceux associés au dernier rapport du GIEC de 2007. Ils correspondent chacun à une hypothèse d'évolution de la société sur le globe : sources d'énergie, expansion de l'industrie et de l'agriculture, démographie,... Cette hypothèse se traduit en taux d'émission des différents Gaz à Effet de Serre (GES).

La prise en compte de plusieurs scénarios rend compte de l'incertitude associée aux orientations économiques et politiques. A noter qu'aucun scénario du 4^{ème} rapport du GIEC, même le plus environnemental, n'envisage une politique volontaire de réduction des gaz à effet de serre.



II.1-2 Les modèles du climat

Les modèles climatiques sont une représentation du système climatique, c'est à dire de l'atmosphère, de l'océan, des surfaces continentales, de la cryosphère, de la végétation,... (cf Illustration 25).

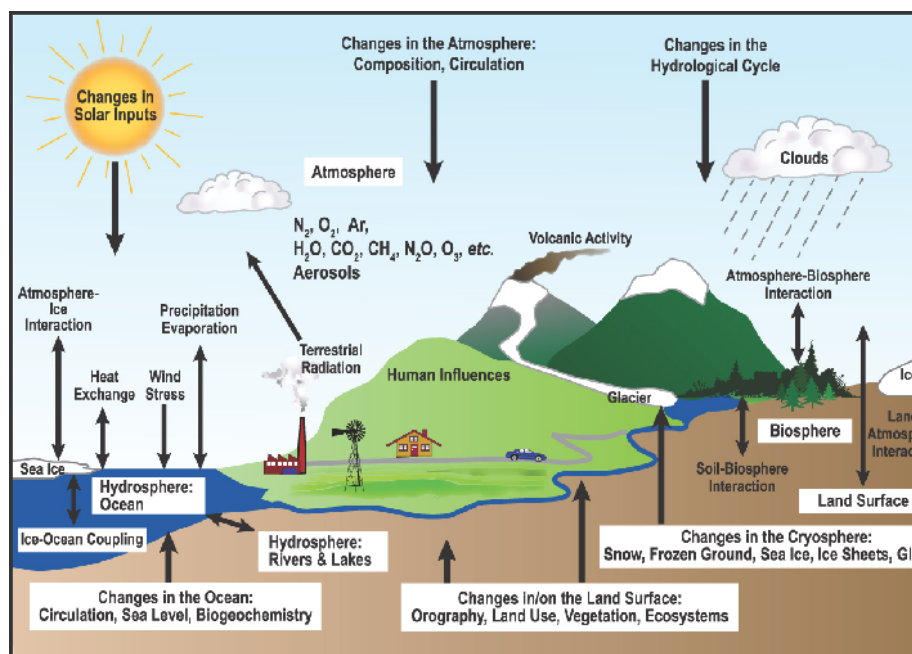


Illustration 25: Schéma des constituants du système climatique et de leurs interactions (source : GIEC AR4 WG I)

Comme les paramètres climatiques sont des paramètres moyennés sur plusieurs années, ils ont une grande prévisibilité. Les projections climatiques couvrent l'ensemble du XXI^e siècle. La période la plus pertinente est d'ailleurs la 2^{ème} moitié du siècle, car c'est alors que les scénarios se démarquent nettement les uns des autres et que l'incertitude liée aux différents modèles devient relativement plus faible. Les projections de la fin du siècle montrent ainsi l'importance des politiques qui sont prises aujourd'hui.

Les modèles du 4^{ème} rapport du GIEC ont une maille de l'ordre de 150 km, ce qui leur permet d'avoir une bonne représentation des variations spatiales à l'échelle mondiale. Par contre cette résolution n'est pas suffisante pour une étude d'impact régionale. C'est pourquoi on applique sur ces sorties modèles des outils de régionalisation, dits de descente d'échelle. Attention, l'augmentation de la résolution implique que l'incertitude relative à la représentation cartographiée est plus grande.

II.1-3 Les incertitudes

Tout exercice de scénario sur le XXI^e siècle est de nature probabiliste en raison des nombreuses sources d'incertitude existante (certaines sont fondamentalement irréductibles). Les simulations climatiques ne sont pas des prévisions et aucune échelle de probabilité ne leur est attachée (aucun scénario n'est plus probable qu'un autre). Elles représentent à priori des évolutions plausibles du climat de la France sur le 21^{ème} siècle basées sur nos connaissances actuelles, et qui permettent d'éclairer les décideurs.

Il existe principalement quatre sources d'incertitude :

- l'incertitude associée aux scénarios d'émission des GES. Cette incertitude peut être approchée en analysant différents scénarios
- l'incertitude naturelle liée au climat. Elle correspond à la variabilité climatique intrinsèque et chaotique qui est un phénomène naturel et irréductible
- l'incertitude « modèle » liée à la représentation des processus physiques. Elle peut être prise en compte en s'appuyant sur plusieurs modèles du GIEC
- l'incertitude liée à la régionalisation des sorties modèle.

II.1-4 Méthodologie et recommandations

Les caractéristiques de la présente étude sur le changement climatique dans la région Haute-Normandie sont les suivantes :

- Modèle climatique : **Arpège-Climat** version 4.6, qui est un modèle à maille étiré avec une résolution de 50 km sur la France.

Bien que le nord de la France ne soit pas une région contrastée par son relief, il est important de souligner que le relief modélisé est une approximation relativement grossière de la réalité (cf Illustration 26).

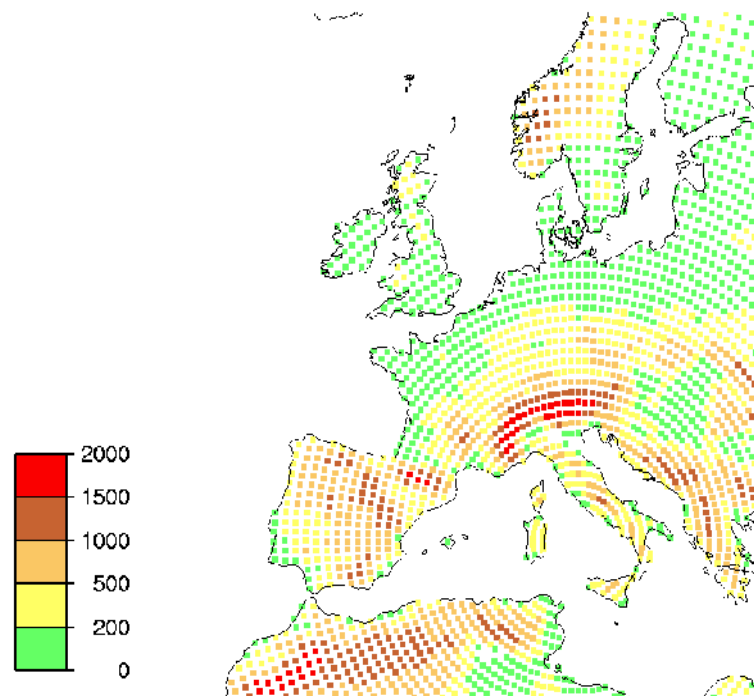


Illustration 26: Relief vu par le modèle Arpège-Climat (en m)

- Scénarios socio-économiques : A1B, A2 et B1.

Le scénario **A1B** décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. C'est un scénario **médian**.

Le scénario **A2** décrit un monde très hétérogène. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que pour les autres scénarios. C'est un scénario dit **pessimiste**.

Le scénario **B1** décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le scénario A1B, mais avec des changements rapides dans les structures économiques, vers une économie de service et d'information, des progrès dans les matériaux utilisés et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. C'est un scénario dit **optimiste**. *(Remarque : il ne s'agit pas d'un scénario de réduction volontariste des GES)*

- Climatologie de référence : **1971/2000**.

Le climat actuel est illustré 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 à Météo-France

- Horizons étudiés : **2030** (2015-2045), **2050** (2035-2065) et **2080** (2065-2095). Les horizons futurs sont désignés par l'année médiane d'un intervalle de 30 ans.
- Méthodes de régionalisation : méthode des « deltas », qui a été utilisée dans l'étude DATAR, et la méthode quantile-quantile.

La **méthode des deltas** fait l'hypothèse forte que l'évolution climatique est relativement stable spatialement. De ce fait, la résolution fine peut être apportée par la même méthode de krigeage et spatialisation que celle utilisée sur la période de référence (méthode développée par Météo-France dénommée « Aurélhy »). Il s'agit d'une interpolation et non d'une méthode de descente d'échelle. La résolution de l'information finale relative au changement climatique reste identique à celle du modèle, donc de cinquante kilomètres.

La méthode de correction des données est la suivante (par exemple pour la température) :

$$T = T_{1971-2000} + (T_{\text{mod}} - T_{\text{ref.mod}})$$

La **méthode quantile-quantile** permet de corriger les plus gros défauts du modèle notamment en terme d'intensité des phénomènes extrêmes ou de fréquence de jours pluvieux. Cette méthode possède en particulier l'avantage de corriger les biais du modèle.

Le détail de la méthodologie n'est pas décrit dans le présent rapport. Il fait référence aux travaux menés par Michel Déqué au centre de recherche de Météo-France « CNRM ».

Les projections issues de cette méthode sont présentées en annexe aux points de grille Arpège-Climat de la région Haute-Normandie.

Tous les paramètres climatiques spatialisés par la méthode des deltas sont aussi disponibles en point de grille par la méthode quantile-quantile, à l'exception de l'indicateur « sécheresse », car il résulte d'une simulation supplémentaire par le modèle hydrologique SIM. On trouve également en point de grille quelques indicateurs spécifiques : les Degrés Jour Unifiés chauffage et climatisation, les longues pluies hivernales et les rafales.

Dans la comparaison des 2 types de données, on pourra trouver des différences notamment sur les indicateurs extrêmes. Elles sont une illustration de l'incertitude due à la méthode de régionalisation. D'une manière générale les valeurs quantile-quantile doivent être préférées. Néanmoins il faut garder en tête qu'elles ne représentent pas l'indicateur localement en un point, mais sur une maille de 50x50 km.

Nous rappelons ci-dessous les **précautions** nécessaires à l'usage de l'analyse et des projections climatiques. La première des recommandations est de bien lire et de s'imprégner de ces précautions, car elles accompagnent les cartes et permettent une juste compréhension de l'analyse.

Pour les paramètres climatiques au cours du XXI^e siècle, on parle de projections et non de prévisions. La nuance est importante et est liée aux incertitudes accompagnant les sorties des modèles climatiques.

Afin de pallier à ces sources d'incertitude, on utilise plusieurs scénarios et plusieurs modèles. Il faut garder à l'esprit que les cartes issues de la méthode des deltas (DATAR) et quantile-quantile ne prennent en compte qu'un seul modèle.

Par ailleurs, il est nécessaire d'effectuer l'analyse d'un paramètre sur au moins 2 scénarios, ou si ce n'est pas possible de spécifier clairement qu'il ne s'agit que d'un seul scénario parmi d'autres.

Une recommandation essentielle est de ne pas se laisser abuser lors de la lecture des cartes zoomés sur la région, qui affichent une résolution de 1km. La partie de l'information portant sur les éventuels changements climatiques demeure en effet à résolution 50 km. Toutes les structures de plus petite taille sont calquées sur la climatologie 1971/2000. La résolution kilométrique est en quelque sorte artificielle, mais cela n'empêche pas le résultat d'être pertinent. Utiliser la climatologie actuelle permet en effet d'avoir un rendu des

phénomènes de petites échelles (dû au littoral, au relief, aux fleuves, ...). Le résultat est donc réaliste si l'on admet l'hypothèse que ces phénomènes de petites échelles évolueront peu lorsque le climat global changera, pour ces horizons d'étude.

Par conséquent il sera très délicat de mettre en évidence des nuances dans le changement climatique à une échelle infra-régionale.

Pour information, il faut avoir à l'esprit que les sorties des modèles climatiques sont davantage exploitables à des horizons de 50 ou 100 ans que sur une ou deux décennies, bien que cela semble peu intuitif. Pour effectuer une prévision dite décennale (échéance inférieure à 20 ans), il faut en effet une connaissance plus fine du système climatique. De plus, le climat est en quelque sorte déjà joué à ces échéances proches, à cause de sa forte inertie et de la durée de vie des GES émis.

L'analyse renvoie aux projections placées en annexe, pour une meilleure lisibilité.

II.2 - Évolution des paramètres de température

Remarque : étant donné le grand nombre de paramètres de température utilisé dans l'étude pour la « DATAR » et repris ici, les cartes des saisons intermédiaires, printemps et automne, ne sont pas commentées. Cela ne remet pas en cause leur intérêt, notamment pour des domaines spécialisés. De plus, par souci de simplification, seulement 5 palettes de couleur ont été employées pour les paramètres Tmoy, Tmin et Tmax : une pour chaque saison, plus l'année.

II.2-1 La tendance moyenne annuelle

La température moyenne poursuit sa hausse au cours du XXI^e siècle d'après les projections d'Arpège-Climat. Cette tendance aurait même tendance à s'accroître.

On trouve +1°C environ en 2030 par rapport à la climatologie actuelle. L'incertitude entre les scénarios est alors relativement faible, inférieure à 0,5°C. La dispersion devient importante à l'horizon 2080, avec une augmentation de température allant de +1,5°C (B1) à +3,5°C (A2). Nous rappelons à titre de comparaison que l'augmentation de température au XX^e siècle est de 0,8°C environ sur le nord de la France.

On note que l'intérieur des terres est légèrement plus marqué par le réchauffement climatique, d'autant plus que le scénario est pessimiste. Cette différence est modérée jusqu'en 2050, mais devient non négligeable à l'horizon 2080.

L'examen des températures minimales et maximales montre que ce sont les températures les plus chaudes qui seront le plus impactées. En effet la Tmax augmente davantage que la Tmoy alors que la Tmin augmente dans une mesure légèrement moindre. On arrive à des différences de l'ordre de 1°C dans l'évolution des Tmax et des Tmin à l'horizon 2080.

B1 se démarque significativement des 2 autres scénarios à partir de 2050. D'une part l'augmentation de température reste en-deçà de la barre symbolique des +2°C à l'horizon 2080. D'autre part, la progression de la tendance est moins visible. Il n'y a quasiment pas d'évolution entre 2030 et 2050. Si bien qu'à la fin du siècle, le scénario B1 a, en quelque sorte, 30 ans de retard sur les 2 autres scénarios.

II.2-2 L'évolution en été

Pour ce qui est de la température moyenne, son augmentation la plus importante pendant l'année est lors de la saison estivale. La différence est nette à l'horizon 2080. L'anomalie moyenne estivale est à cette échéance plus importante de 0,7°C environ par rapport à l'anomalie moyenne annuelle.

On retrouve les mêmes éléments que sur l'ensemble de l'année, de manière encore plus prononcée. Un réchauffement plus marqué à l'intérieur des terres et une dispersion importante des scénarios à l'horizon 2080. La Tmoy varie ainsi de +2°C à +5°C.

Les Tmax connaîtraient une très forte augmentation au cours du XXI^e siècle (+2°C à +6°C), ce qui explique l'évolution spectaculaire des paramètres « fortes chaleurs » et « canicule ». Les jours de fortes chaleurs (Tmax > 30°C) passeraient du statut d'événement rare aujourd'hui (~ 5 cas par an en Seine-Maritime, jusqu'à 15 cas dans l'Eure) à celui d'événement courant, avec 10 à 40 jours concernés selon les scénarios et les zones, étalés sur 3 mois.

De même pour la canicule, on note une explosion du paramètre à la fin du siècle pour les scénarios A1B et A2, de moins de 1 cas par an aujourd'hui à 5 à 15 cas en moyenne en 2080. Ce paramètre évolue peu aux échéances les plus proches.

Enfin on remarque une augmentation continue des DJU climatisation, faible aujourd'hui, qui suit l'évolution de la température moyenne.

II.2-3 L'évolution en hiver

L'anomalie de température en hiver est légèrement en-deçà de la moyenne annuelle. On note, par ailleurs, une plus faible disparité d'évolution entre l'intérieur des terres et la côte.

La baisse des températures minimales suffit à réduire considérablement le nombre de jours de gel et les DJU chauffage. Pour le gel, on observerait une diminution de moitié environ de ce paramètre à la fin du siècle, de 40 environ aujourd'hui, à 15 à 25 en 2080. Cette évolution conduirait à une très faible occurrence de gelée sur la zone littorale.

Les DJU chauffage baissent fortement aussi, de 10% dès 2030 à 15% à 30% en 2080.

II.3 - Évolution des paramètres de précipitations et de rafales

II.3-1 Evolution des paramètres moyens

Les précipitations évoluent de manière moins linéaire que la température. Par ailleurs le scénario le plus pessimiste n'est pas systématiquement celui qui a la tendance la plus marquée, notamment à l'horizon 2030. Cela est un signe de la part d'incertitude liée au climat.

Les précipitations annuelles sont à la baisse pour toutes les échéances et tous les scénarios. La diminution est maximale à la fin du siècle avec -70mm à -150mm, soit -10% à -20% du cumul actuel. Elle est moins significative aux échéances proches. L'évolution non linéaire du scénario B1 s'explique par les cumuls saisonniers.

En été, les projections montrent une baisse des précipitations de -10% environ dès 2030 et allant de -10% à -30% à l'horizon 2080, sur un total de 300mm environ. Une grande partie de la baisse des précipitations se concentre donc sur les 6 mois les plus chauds.

En hiver, l'évolution des précipitations est atypique. On remarque tout d'abord une période stable, voire de légère augmentation (B1) jusqu'en 2050 inclus. Cependant, la tendance s'inverse à la fin du siècle, ce qui explique la baisse marquée du cumul annuel. L'ampleur de la baisse entre 2050 et 2080 est de l'ordre de -30 à -50mm sur 6 mois. A noter un gradient nord/sud dans l'anomalie de précipitations hivernales.

Les diverses évolutions sont légèrement plus importantes près des côtes. Néanmoins c'est également sur cette zone que les cumuls sont les plus forts (1000mm contre 700mm au sud de l'Eure).

II.3-2 Evolution des paramètres extrêmes

L'évolution des fortes pluies n'est pas significative, moins de 10% en valeur relative par rapport à la climatologie 1971/2000, même si en 2080 la tendance semble plutôt négative. On peut donc s'attendre à ce que la fréquence des épisodes de fortes pluies reste à peu près constante. La baisse du cumul total ne serait pas issue d'une diminution de l'intensité des phénomènes pluvieux, mais de leur fréquence. Cela signifierait une part croissante des fortes précipitations par rapport aux épisodes de pluie faible à modérée.

Le paramètre longue pluie en hiver est globalement à la baisse sur toutes les échéances et tous les scénarios, même si l'ampleur de la diminution est peu significative. On a environ 1 événement en moins en 2080 sur 8 au total en 6 mois. Cet indicateur est à étudier en complément des précipitations hivernales. L'évolution du nombre de longues pluies est grossièrement corrélée avec l'allure du cumul hivernal, même si les variations sont atténuées. Ce résultat va dans le sens de la persistance d'épisodes de fortes pluies et donc de la diminution des jours de pluies par baisse du cumul total. Ce phénomène n'est toutefois pas marqué au point de rendre rare les épisodes de pluies sur plusieurs jours consécutifs en hiver.

L'indicateur sécheresse suit les variations du cumul annuel de précipitations et est également en lieu avec l'augmentation de température. Le nombre de jours en situation de sécheresse augmente déjà de 20% environ en 2030 et de 35% à 60% à l'horizon 2080.

L'indicateur du nombre de jours de rafales est à considérer avec précaution. Tout d'abord le vent est un paramètre moins robuste que les températures ou les précipitations, que l'on ne peut pas étudier avec le même niveau d'incertitude à de fines résolutions. De plus le phénomène étudié est ici relativement rare, environ 2 occurrences par an, et souvent associé à des phénomènes marquants (tempête, orage,...) ce qui le rend d'autant moins robuste. L'examen des résultats montre que le modèle ne projette pas de changement notable, ni à la hausse, ni à la baisse.

Conclusion

Les paramètres moyens semblent parfois changer dans une faible proportion, mais l'évolution des « extrêmes » est plus parlant et plus spectaculaire. Citons notamment le gel, les fortes chaleurs, la canicule et la sécheresse. Ces fortes tendances sont dues à des effets de seuil.

Les températures poursuivent leur hausse au cours du XXI^e siècle. La tendance s'accélère nettement pour les scénarios A2 et A1B. On observe une forte dispersion des anomalies de température en 2080 (+1,5°C à +3,5°C en Tmoy annuelle), selon le scénario, la saison, la zone géographique et selon qu'il s'agisse du minimum ou du maximum de la journée.

En température moyenne annuelle, on arrive à une hausse de +1°C environ dès 2030. L'anomalie la plus importante a lieu en été avec une anomalie de Tmax +2°C à +6°C (A2, à l'intérieur des terres) en 2080.

Les précipitations estivales sont à la baisse dès 2030, alors que celles hivernales ne le deviennent que dans la 2^{ème} moitié du siècle. En 2080, le cumul annuel accuse ainsi une diminution de 10% à 30% par rapport à la climatologie 1971/2000.

Les changements sur les extrêmes qu'engendrent ces évolutions sont les suivants :

- Forte augmentation du nombre de jours de fortes chaleurs et de canicule, dans une région qui est aujourd'hui relativement épargnée. Les projections en 2080 sont du même ordre que l'indicateur actuel dans la région Centre (10 à 40 jours/an de fortes chaleur, 2 à 15 jours/an de canicule).
- Diminution importante du nombre de jours de gel, de l'ordre de moitié jusqu'à 15 à 25 jours/an à l'horizon 2080, ce qui correspondrait à ce que connaît la Bretagne aujourd'hui.
- La fréquence des fortes pluies resterait la même qu'aujourd'hui, d'où une augmentation de la proportion de tels épisodes parmi l'ensemble des épisodes pluvieux. Le nombre de cas de longues pluies en hiver (4 jours consécutifs au moins) serait en légère baisse à la fin du siècle, sans que ce phénomène ne se raréfie. Il n'y a donc pas disparition des épisodes pluvieux marquants.
- À l'opposé, les épisodes de sécheresse se multiplieraient, ce qui concorde avec la baisse des précipitations estivales et l'augmentation généralisée des températures. On arriverait à un niveau critique de 35% à 70% de jours de sécheresse par an à l'horizon 2080.

On remarque que la saison estivale concentre les changements les plus significatifs.

Nous rappelons qu'une part d'incertitude est inhérente aux valeurs des projections climatiques. Cela ne doit toutefois pas masquer le rôle et le contenu de ces projections. En effet, elles ne sont pas des

prévisions, mais des tendances dans l'état actuel des connaissances, basées sur des hypothèses vraisemblables d'évolution de la société.

Les études sur le siècle à venir ne permettent pas encore ou difficilement de se prononcer sur l'évolution d'événements extrêmes, comme les tempêtes ou les inondations. Le tableau ci-dessous récapitule les événements marquants analysés dans la première partie du rapport, et permet de placer l'évolution climatique dans le contexte actuel.

<i>Type d'événement</i>	<i>Date</i>	<i>Zone</i>	<i>Observations</i>
<i>Canicule</i>	Août 2003	Phénomène généralisé, plus marqué à l'intérieur des terres	Moyenne des Tmax entre le 03/08 et le 12/08 : entre 27°C sur les côtes et 38,6°C à Breteuil (27). Record : Tmax de 41,4°C à Evreux.
<i>Vague de froid</i>	Hiver 1962-1963	Phénomène généralisé, plus marqué à l'intérieur des terres	60 à 75 jours de gel. Anomalie de 5°C en-dessous des normales.
<i>Vent</i>	26 décembre 1999	Phénomène généralisé, plus marqué au sud	140 km/h de rafales à Evreux-Huest et Rouen-Boos
<i>Orage</i>	16 juin 1997	Pays de Caux	144 mm à Auzebosc (76) 110 mm à Etrepagny (27)
<i>Fortes Précipitations</i>	Décembre 1999	Pays de Caux	Sur le mois, 352 mm à Auffray
<i>Sécheresse</i>	Décembre à août 1976	Phénomène généralisé	60 à 75% de déficit pluviométrique sur 9 mois

Index des illustrations

Illustration 1: Température moyenne annuelle [1971-2000] en °C.....	4
Illustration 2: Température maximale moyenne annuelle [1971-2000] en °C.....	5
Illustration 3: Température minimale moyenne annuelle [1971-2000] en °C.....	5
Illustration 4: Nombre de jours de gel par an, $T_n < 0^{\circ}\text{C}$ [1971-2000].....	6
Illustration 5: Nombre de jours de fortes chaleurs, $T_x > 30^{\circ}\text{C}$ [1971-2000].....	6
Illustration 6: Température moyenne hivernale [1971-2000] en °C.....	7
Illustration 7: Température moyenne estivale [1971-2000] en °C.....	7
Illustration 8: Cumul annuel de précipitations [1971-2000] en mm.....	8
Illustration 9: Cumul de précipitations hivernal [1971-2000] en mm.....	8
Illustration 10: Cumul de précipitations estival [1971-2000] en mm.....	8
Illustration 11: Nombre de jours par an de précipitations $> 10\text{mm}$ [1971-2000].....	9
Illustration 12: Rose des vents moyens à 10m [1981-2000].....	9
Illustration 13: DJU chauffage annuel [1971-2000] en °C.....	10
Illustration 14: DJU climatisation annuel [1971-2000] en °C.....	11
Illustration 15: Série homogénéisée T_{\min} et T_{\max} de Dieppe (76) en °C.....	12
Illustration 16: Séries homogénéisée T_{\min} et T_{\max} de Guichainville (27) en °C.....	13
Illustration 17: Moyenne des températures maximales quotidiennes du 3 au 12 août 2003 en °C.....	14
Illustration 18: Nombre de jours en août 2003 avec une température maximale quotidienne $> 35^{\circ}\text{C}$	15
Illustration 19: Températures minimales et maximales quotidiennes à Evreux-Huest (27) en °C.....	15
Illustration 20: Températures à Guichainville (27) durant l'hiver 1962/1963 en °C.....	16
Illustration 21: Températures à Dieppe (76) durant l'hiver 1962/1963 en °C.....	16
Illustration 22: Cumul quotidien de précipitations le 16 juin 1997.....	17
Illustration 23: Pointage du cumul mensuel de précipitations mesuré aux stations météorologiques en mm et rapport aux normales en %.....	18
Illustration 24: Pointage du cumul de précipitations de décembre 1975 à août 1976 en mm, et rapport à la normale en %.....	18
Illustration 25: Schéma des constituants du système climatique et de leurs interactions (source : GIEC AR4 WG I).....	21
Illustration 26: Relief vu par le modèle Arpège-Climat (en m).....	22