

DYNAMIQUE SPATIO-TEMPORELLE D'UN ÉVÉNEMENT MÉTÉO-CLIMATIQUE EXTRÊME LA CANICULE DE L'ÉTÉ 2003 EN EUROPE DE L'OUEST

O. CANTAT

*Laboratoire Géophen, U.M.R 6554 C.N.R.S., LETG
U.F.R. de Géographie, Université de Caen Basse-Normandie olivier.cantat@unicaen.fr*

Résumé

Durant l'été 2003, l'Europe occidentale a connu une période de canicule sans précédent. L'article démontre l'ampleur de cet événement météo-climatique, tant dans son intensité que dans sa durée et son extension spatiale. Les cartes d'altitude et les radiosondages verticaux permettent ensuite d'appréhender la genèse et la dynamique spatio-temporelle tridimensionnelle du phénomène. Dans le cadre d'une approche systémique, la prise en compte simultanée des événements se déroulant en altitude et dans les basses couches de l'atmosphère démontre la complexité de processus en constante interaction. L'analyse prouve que la canicule de 2003 trouve son origine en altitude mais que son caractère exceptionnel est imputable à des phénomènes d'interface air-sol. Des éléments sur l'amélioration attendue de la prévision des phénomènes météorologiques extrêmes concluent cet article.

Mots-clés : système climatique, canicule, été 2003, Europe occidentale, France, situation synoptique, radiosondages, masse d'air

Abstract

Spatio-temporal dynamic of an extreme meteorological-climatic event The scorching heat of the summer 2003 in western Europe

During summer 2003, western Europe knew a period of unprecedented scorching heat since reliable meteorological statements exist (end of the 19th century). From the analysis of the temperatures in three European capitals (Lisbon, Paris and London) and of a regional study more deepened on France, the article demonstrates the dimension of this meteorological-climatic event, both in its intensity and in its duration and its spatial extension. The charts of altitude and the vertical radiosonde investigations of the air allow to understand the genesis of this phenomenon and to consider its spatio-temporal dynamic in the three dimensions of the atmosphere. Within the framework of a systemic approach, the simultaneous study of the events proceeding in altitude and in the low layers of the atmosphere shows the complexity of process in constant interaction. In our case, the analysis proves that the heat wave finds its origin in altitude but that its intensity is ascribable with phenomena of air-to-ground interface. In the end of July 2003, a phenomenon of atmospheric divergence appeared on Europe, what induced the development of the scorching heat on the ground by a vertical movement falling of the air (compression) and a horizontal movement (tropical advection). In altitude, the rough rise of the temperatures and the frank dilation of the air mass preceded by two days the

forming of the scorching heat in the low layers of the atmosphere. This enchainement of facts demonstrates the dynamic origin of the phenomenon and not the simple consequence of clear and quiet weather on the temperatures to the interface in summer. Then, the high dynamic pressures settled on Europe constituted a durable dam in passages of the Atlantic atmospheric disturbances, what allowed the scorching heat to become more marked in a very unusual way with the middle latitudes, particularly for the western frontage of the continent usually under maritime influence. The discussion gives some elements on the awaited improvement of the forecasts concerning the extreme phenomena.

Keywords: climatic system, scorching heat, summer 2003, western Europe, France, synoptic situation, radiosonde explorations, air mass.

Introduction

Au cours de l'été 2003, l'Europe occidentale a vécu la canicule la plus remarquable de son histoire. Il n'avait jamais fait aussi chaud, aussi longtemps et sur une étendue géographique aussi vaste depuis qu'existent des relevés de températures fiables et réguliers, soit aux environs de 1880. Dans cet article, notre propos sera centré essentiellement sur la description et la dynamique spatio-temporelle de ce phénomène atmosphérique hors normes, mais rappelons que cet épisode restera surtout gravé dans la mémoire pour ses conséquences humaines dramatiques. Ainsi, en France, ces conditions climatiques extrêmes ont été à l'origine d'une augmentation considérable du nombre de décès : entre le 1^{er} et le 20 août 2003, la surmortalité a été estimée à plus de 55% avec 41.621 décès observés pour 26.818 attendus (InVS, 2003, site Internet de l'INSERM et synthèse de J.-P. Besancenot dans *Géoconfluences*). Mais avant d'aborder dans le détail l'analyse de cet épisode météo-climatique, il convient de préciser ce que l'on entend par *canicule*.

Dans son usage courant, le terme *canicule* évoque à lui seul un contexte climatique exceptionnel, marqué avant tout par une chaleur intense mais également par une grande sécheresse et un fort ensoleillement rendant l'ambiance éprouvante. Pour le climatologue, il s'agit de définir un seuil de température pour répertorier, classer et comparer ces types d'épisodes extrêmes. Or, en fonction du lieu et de la période de l'année, une forte chaleur ne présente ni la même fréquence, ni les mêmes effets sur la santé... Aux latitudes moyennes, domaine géographique de notre étude, la *canicule* désigne communément une période d'au moins deux jours consécutifs au cours desquels les températures ont atteint ou dépassé la valeur de 35°C. Depuis le 1^{er} juin 2004, en retour d'expertise à la suite des conséquences humaines dramatiques de l'été 2003, une nouvelle définition de la *canicule* a été mise en application à Météo-France. Celle-ci inclut les températures minimales et le degré de vulnérabilité des populations, variable selon les régions (Météo-France, 2004 ; Cantat, 2005). Si elle constitue un apport indéniable pour la prévention du risque sanitaire, cette nouvelle approche « météo-médicale » n'a cependant pas

été utilisée dans cet article car elle crée artificiellement des discontinuités spatiales incompatibles avec une étude géographique globale du phénomène naturel, tant dans sa description que dans son explication (Cantat, à paraître). Ajoutons par ailleurs que la canicule de l'été 2003 n'a constitué que le paroxysme d'une saison chaude en tout point remarquable sur l'Europe occidentale. C'est pourquoi l'intervalle d'étude a été élargi aux cinq mois allant de mai à septembre, période jalonnée par de nombreuses poussées chaudes, même si elles n'ont pas nécessairement atteint le seuil caractérisant la canicule. Aussi, pour envisager la saison chaude 2003 dans toute sa dimension, le développement s'appuiera également sur la notion plus souple, car non chiffrée, de *vague de chaleur*, c'est-à-dire, d'après l'Organisation Météorologique Mondiale, « *un réchauffement important de l'air, ou une invasion d'air très chaud sur un vaste territoire, généralement de quelques jours à quelques semaines* ». En accord avec les seuils définis par Météo-France, l'étude fera donc avant tout référence aux journées de *très forte chaleur* (température maximale (T_x) $\geq 35^\circ\text{C}$), mais aussi aux journées de *forte chaleur* ($T_x \geq 30^\circ\text{C}$) et de *chaleur* ($T_x \geq 25^\circ\text{C}$).

Dans une première partie, après avoir présenté les principaux caractères thermiques de la canicule de l'été 2003 sur l'Europe occidentale, une attention plus particulière sera portée sur la France, pays où la diversité des configurations géographiques offre un panel représentatif des différents climats ouest européens (océanique, semi continental, méditerranéen et montagnard). Pour comprendre les causes profondes de cet épisode météo-climatique hors normes, la deuxième partie de l'article analysera plus spécialement les caractères originaux de la *circulation atmosphérique générale* qui ont engendré la persistance d'un type de temps quasi saharien sur une grande partie de l'Europe occidentale durant la première quinzaine du mois d'août 2003. Les cartes synoptiques d'altitude et les radiosondages verticaux permettront de visualiser dans les trois dimensions de l'atmosphère la formation et le développement de ce paroxysme thermique. Dans l'optique du *Développement durable* et des problèmes environnementaux, économiques et politiques posés par le *changement climatique*, des éléments sur l'amélioration des prévisions concernant les phénomènes extrêmes seront abordés dans la troisième partie.

1. Principaux caractères de la canicule de l'été 2003 en Europe occidentale

Pour traiter notre sujet – la canicule de l'été 2003 en Europe de l'Ouest – il convient tout d'abord de définir l'espace géographique concerné : arbitrairement, du sud au nord, seront essentiellement pris en compte la Péninsule ibérique, l'Italie, la France, la Suisse, le Benelux, l'Allemagne, le Danemark, les Îles britanniques et la façade atlantique du sud de la Scandinavie. Concrètement, il s'agira donc des pays situés à l'ouest du 5ème méridien Est.

1.1 Canicule et organisation climatique « moyenne » sur l'Europe occidentale en été

1.1.1 L'aire d'étude et ses composantes climatiques

L'aire d'étude précédemment définie a été partitionnée car l'espace géographique concerné recoupe deux entités aux caractères climatiques très distincts : au nord, une composante « tempérée », où la canicule est un phénomène rare et de courte durée ; au sud, une composante méditerranéenne, où les très fortes chaleurs sont récurrentes à cette saison, avec toutefois des années plus ou moins affectées par le phénomène. Pour illustrer cette opposition climatique majeure, un ensemble de stations représentatives de l'**Europe occidentale atlantique** et de l'**Europe occidentale méditerranéenne** sera analysé dans la suite de cet article. A l'intérieur de ce découpage très classique, malgré son appartenance au climat méditerranéen, on individualisera la côte sud du Portugal car la chaleur estivale y est atténuée du fait d'influences atlantiques (cf. Lisbonne).

1.1.2 L'originalité des mécanismes atmosphériques

L'**Europe occidentale atlantique** est généralement épargnée en été par les longues périodes de très forte chaleur grâce aux influences maritimes véhiculées par la circulation d'ouest dominant aux latitudes moyennes. Après quelques jours de canicule, le scénario est classique : en liaison avec des avancées d'air plus frais par l'Atlantique, la formation de fronts orageux vient systématiquement interrompre l'installation des influences subtropicales chaudes et sèches en provenance de la Péninsule Ibérique ou de la Méditerranée. En ouvrant à nouveau la « porte » aux masses d'air adoucies par leur passage au-dessus de l'océan, ces fronts annoncent le retour à des conditions plus « normales ». Les températures deviennent alors brutalement moins excessives, avec cependant un contraste marqué entre la partie sud du domaine au contact de l'anticyclone des Açores, donc au temps généralement agréable, et la partie nord souvent fraîche et pluvieuse car à nouveau affectée de façon épisodique par les perturbations circulant plus au nord à cette saison...

En Europe, l'étendue géographique concernée par les influences maritimes est vaste en raison l'absence de reliefs côtiers vigoureux et perpendiculaires aux flux d'ouest qui pourraient s'opposer à la pénétration des masses d'air océanique. Ce domaine s'étire du sud de la Scandinavie à la façade nord du Portugal, couvrant ainsi les Iles Britanniques, le Benelux, la partie ouest de l'Allemagne, la France (excepté sa bordure méditerranéenne) et le nord-ouest de l'Espagne. Ces régions sous influences océaniques plus ou moins prononcées, donc peu propices aux canicules, correspondent globalement à l'aire du climat « tempéré de façade ouest » proposé par Flohn (1968). Ce découpage géographique est cohérent avec l'objet de notre étude car cette classification est fondée sur la délimitation d'ensembles relativement homogènes dans leur fonctionnement (*classification génétique*), c'est-à-dire sur la prise en compte de facteurs dynamiques communs. Dès lors, nous pouvons proposer dans la figure 1



Figure 1 : Aire d'influence des masses d'air à caractère atlantique en Europe et localisation des trois capitales de référence (Lisbonne, Paris et Londres). *Area of influence of atlantic air masses in Europe and location of the 3 main cities used as a reference (Lisbon, Paris and London).*

une carte de l'aire d'influence des masses d'air à caractère atlantique sur l'Europe. Cette typologie des climats *océanisés*, donc peu propices aux canicules, a été complétée par les limites descriptives à la base des grandes

classifications physionomiques du climat établies au 20^{ème} siècle successivement par Köppen, Sidow-Wagner et Viers¹, entre autres. A l'ouest de cette limite schématique, les chaleurs fortes et durables présentent donc un caractère exceptionnel.

En ce qui concerne l'**Europe occidentale méditerranéenne** (Portugal, Espagne, Sud de la France, Italie), l'entrée de masses d'air adoucies provenant de l'ouest est très rare à cette saison en raison de la prédominance de conditions aérologiques stables (anticyclone subtropical dynamique couvrant le domaine). Cette configuration est donc très favorable à l'établissement d'un temps très sec et très chaud, la canicule prenant par conséquent ici un caractère plus habituel. Toutefois, quand le flux d'ouest est bien établi plus au nord sur le domaine « tempéré » des latitudes moyennes, des vents « froids » de nord ou nord-ouest, canalisés par le relief, peuvent affecter certains secteurs et rafraîchir considérablement l'air (Tramontane et Mistral en France). Enfin, sur une frange côtière variable, rappelons que des phénomènes de brise de mer peuvent modérer également la chaleur (Planchon, 1998).

1.2 La canicule de l'été 2003 vue à travers l'exemple de trois capitales européennes

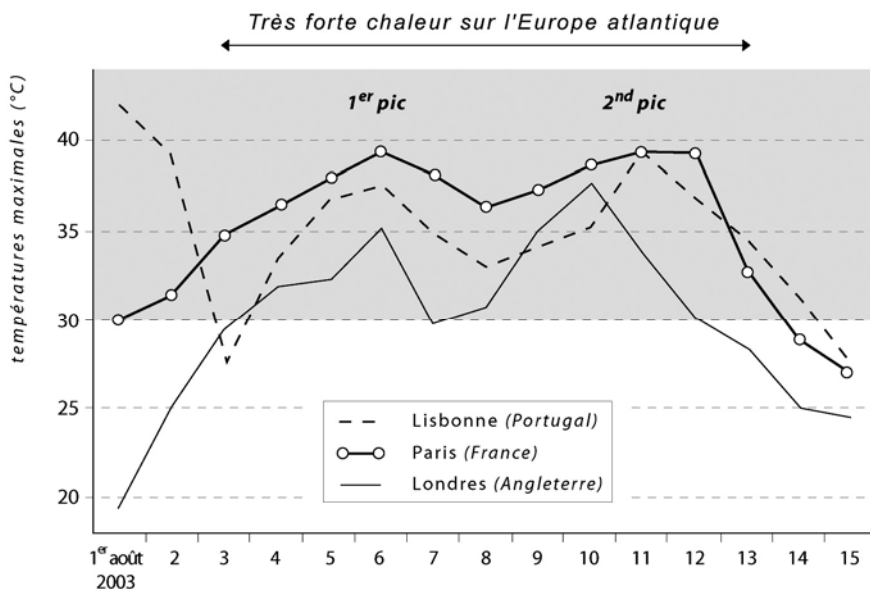
C'est durant la première quinzaine du mois d'août 2003 que la situation climatique a été la plus originale sur l'Europe occidentale en raison d'une interruption totale du flux d'ouest. Ce blocage des entrées maritimes a permis aux masses d'air subtropicales de remonter très au nord et d'engendrer une chaleur exceptionnelle dans des régions aux caractères thermiques habituellement très modérés. Les températures ont ainsi dépassé fréquemment 30°C et à plusieurs reprises 35°C, parfois même 40°C, établissant à cette occasion un grand nombre de records absolus de chaleur.

De Lisbonne à Londres, en passant par Paris, les températures maximales journalières traduisent l'intensité et l'étendue géographique de la canicule au cœur de l'été 2003 pour des stations « atlantiques » donc a priori modérées car influencées par la proximité de la mer (figure 2).

La **cité portugaise** est naturellement plus propice aux fortes chaleurs du fait de sa position la plus méridionale des trois capitales (environ 38° Nord). En effet, à cette latitude, les données astronomiques occasionnent plus d'apports énergétiques (soleil haut sur l'horizon) et les données aérologiques propres au domaine méditerranéen à cette saison (subsidence anticyclonale dynamique) favorisent un fort ensoleillement. Mais cette double caractéristique est

¹ Le lecteur intéressé par les problèmes de classification climatique pourra trouver des développements synthétiques dans les manuels de climatologie générale, tels ceux de Vigneau (2000, 2005), Leroux (2000), Hufty (2001) ou Beltrando (2004), pour les plus récents. Une réflexion plus approfondie sur la classification des climats est proposée par Vigneau dans un article du n° 619 des *Annales de Géographie* (2001).

généralement atténuée par l'influence sur les basses couches de l'atmosphère des eaux relativement froides qui longent du nord au sud la façade du pays d'une part, et par les entrées possibles de brises marines qui adoucissent le littoral, d'autre part. Sur une large bande côtière le caractère méditerranéen du climat est donc plus à associer à la fréquence durable du « beau temps » et à l'indigence presque totale des précipitations, qu'aux températures somme toute relativement modérées pour cette latitude et sous ce type de climat à fortes connotations subtropicales en été. L'influence maritime apparaît nettement sur les températures moyennes maximales dont la Normale ne dépasse pas 28°C en juillet, contre 38°C à Séville, au sud de l'Espagne, à la même latitude mais dans les terres. C'est pourquoi les valeurs enregistrées début août 2003 à Lisbonne - huit valeurs maximales journalières supérieures à 35°C, dont trois supérieures à 39°C - peuvent être qualifiées d'exceptionnelles, autant par leur intensité que par leur regroupement sur quelques jours.



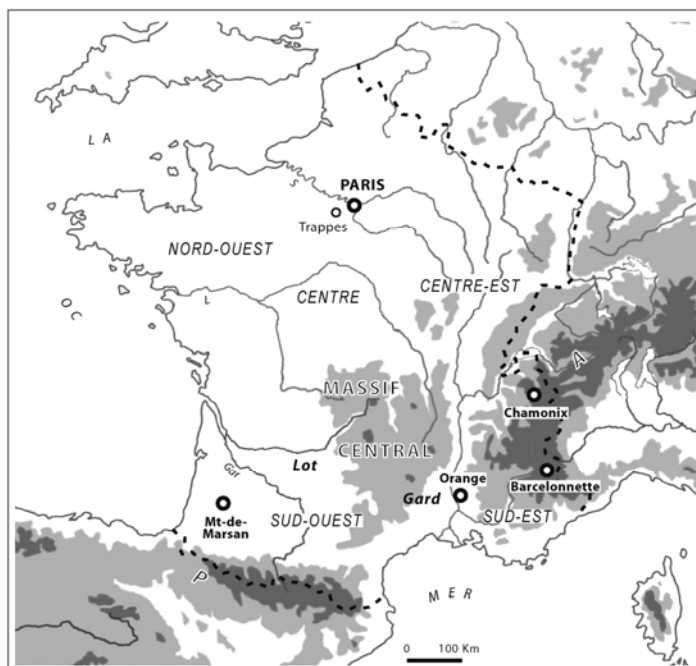
graphique établi d'après données Météo-France (O. Cantat, 2004)

Figure 2 : Evolution des températures maximales journalières en Europe de l'Ouest du 1^{er} au 15 août 2003 (Lisbonne, Paris et Londres)

Que dire aussi de **Londres**, près de mille cinq cents kilomètres plus au nord (51°30' Nord) où, chaque après-midi durant neuf jours consécutifs, la température a dépassé 30°C alors que les valeurs maximales quotidiennes ont souvent du mal à franchir la « barre » des 20°C ? Du jamais vu, bien loin de l'image traditionnelle que l'on attribue au « temps anglais », d'autant plus que le soleil fut longuement présent sur la capitale anglaise, plus souvent habituée à des ciels changeants accompagnés de fréquents passages pluvieux. A titre de

comparaison, notons qu'en août à Londres l'insolation moyenne est de l'ordre de 6 heures par jour et que le cumul pluviométrique mensuel atteint près de 60 millimètres, contre environ 12 heures d'ensoleillement et seulement 4 millimètres de précipitations à Lisbonne.

En raison d'une continentalité légèrement plus marquée et d'une latitude plus basse ($48^{\circ}50'$ Nord), **Paris** a enregistré des températures encore plus chaudes que la capitale anglaise, flirtant à plusieurs reprises avec les 40°C , et dépassant de ce fait largement le record de chaleur absolu établi sur la Normale 1961-1990 ($36,0^{\circ}\text{C}$). Une approche plus exhaustive du cas parisien, associant l'ensemble des paramètres climatiques, fera l'objet d'un développement complet ultérieurement (voir 1.4).



O. Cantat, 2004

Figure 3 : Localisation des différents espaces géographiques et des principales stations météorologiques mentionnées dans le texte. *Location of the geographical features and main meteorological stations mentioned in text.*

Au cours de cette quinzaine véritablement exceptionnelle, ces trois courbes font également clairement apparaître deux « pics » de chaleur autour du 6 et du 11 août. Ces paroxysmes thermiques sont semble-t-il à associer à deux « poussées » tropicales nettement identifiables sur les radiosondages verticaux de l'atmosphère et les cartes d'altitude (voir description et explication dans la partie 2). Notons que ces quelques valeurs très spectaculaires ne constituent que le point d'orgue d'un été particulièrement

précoce et dont les caractères thermiques extrêmes ont été encore plus prononcés dans les secteurs bénéficiant moins des influences océaniques (maximales absolues voisines de l'ordre de 45°C). Pour illustrer concrètement ces propos, analysons plus en détails la situation en France, ce pays proposant sur un espace réduit des climats variés et représentatifs de l'Europe de l'Ouest : un gradient nord-sud prononcé, des influences océaniques marquées à l'ouest, des nuances continentales à l'est et une frange méditerranéenne au sud-est ; enfin, la présence de reliefs complète les deux principales composantes zonale et azonale du climat.

1.3 Les températures en France au cours de l'été 2003

Comme sur l'ensemble de l'Europe occidentale, la France a connu une saison chaude exceptionnelle dont le paroxysme s'est produit dans la première quinzaine du mois d'août. Pour conserver un caractère synthétique à cette présentation, nous ne distinguerons ici que trois sous ensembles : le Nord, le Sud et les espaces montagnards où la chaleur fut aussi bien présente malgré les effets pondérateurs de l'altitude.

1.3.1 La situation en plaine

Intensité et durée de la période chaude

Voici quelques chiffres traduisant l'**intensité** du phénomène sur la France : à Auxerre (région Centre-Est, au sud-est du Bassin Parisien), la température maximale a dépassé 40°C durant huit jours consécutifs ; quant au record national pour l'année 2003, il a été atteint le 12 août dans le Gard (Sud-Est), avec 44,1°C à Conqueyrac et St-Christophe-les-Alès (Météo-France, 2003). Le Sud-Ouest n'a guère été en reste avec près de 44°C à St-Géry dans le Lot et à Cambo-les-Bains, aux pieds des Pyrénées (Avila, 2004). Plus généralement, durant les deux premières semaines du mois d'août, plus de deux tiers des cent quatre-vingt stations météorologiques représentatives de l'espace français a relevé des températures maximales supérieures à 35°C, les rares exceptions correspondant à des sites littoraux du nord du pays (côtes de la Manche) ou à des postes d'altitude. Plus remarquable encore, dans 15% de ces stations le thermomètre a franchi le seuil rarissime des 40°C. Pour un climat qualifié de « tempéré » tous ces faits rendent compte du caractère véritablement exceptionnel de l'été 2003.

Une autre originalité de cette année 2003 apparaît dans la **durée** particulièrement longue des fortes chaleurs. Sur la figure 4, nous constatons que les valeurs supérieures à 30°C se sont étalées sur plusieurs mois, intervenant à plusieurs reprises depuis la fin mai et jusqu'après la mi-septembre. Les stations de référence ont été choisies dans les terres pour ne pas subir les effets côtiers de brises de mer, phénomène d'échelle locale non représentatif de l'ensemble régional (Cantat et Savouret, 2004).

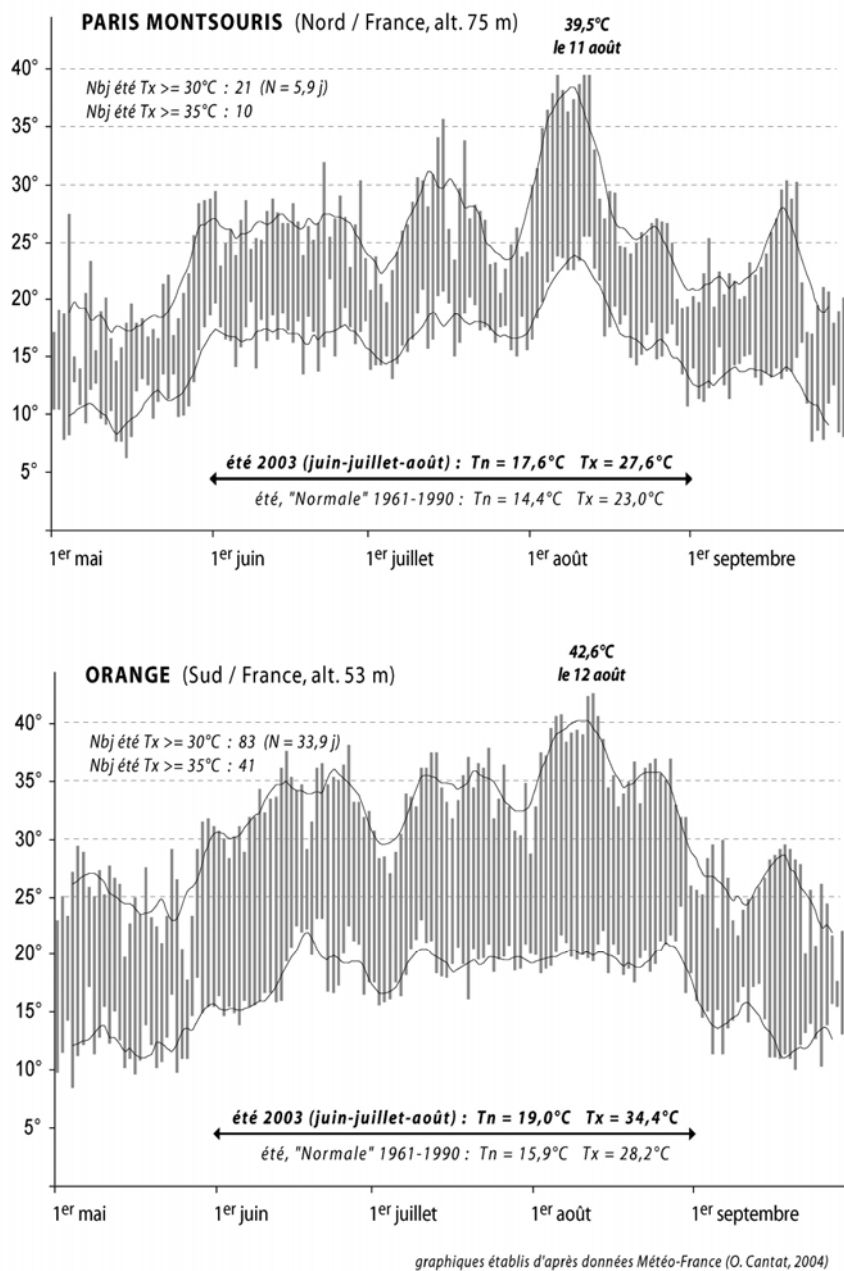


Figure 4 : Températures minimales et maximales en France entre mai et septembre 2003. Comparaison Nord / Sud (températures 'vraies' en bâton et moyennes mobiles glissantes d'ordre 7 en courbe). *Minimal and maximal temperatures in France between may and october 2003. A north/south comparison (actual temperatures and running mean order 7).*

Disparités géographiques régionales de la chaleur

Une distinction assez nette peut être notée entre le nord et le sud du pays où la période chaude a été beaucoup plus durable et intense, conformément à l'appartenance à deux domaines climatiques contrastés : « tempéré océanique (frais) » pour Paris et « méditerranéen (chaud) » pour Orange (tableau 1). Cette opposition méridienne est complétée par la nuance « tempéré océanique (chaud) » proposé par la station de Mont-de-Marsan, dans le Sud-Ouest.

	Nord « tempéré » (Paris)			Sud-Est méditerranéen (Orange)			Sud-Ouest « tempéré » (Mont-de-Marsan)		
	été 2003	Normale	Ecart / N	été 2003	Normale	écart / N	été 2003	Normale	écart / N
T° mini moyenne (°C)	17,6	14,4	+ 3,2°C	19,0	15,9	+ 3,1°C	17,1	13,5	+ 3,6°C
T° maxi moyenne (°C)	27,6	23,0	+ 4,6°C	34,4	28,2	+ 6,2°C	31,1	25,9	+ 5,2°C
T° maxi absolue (°C)	39,5	(36,6)	(+ 2,9°C)	42,6	(40,7)	(+ 1,9°C)	41,1	(40,4)	(+ 0,7°C)
Nb jours T° maxi >= 30°C	21	5,9	+ 15,1	83	33,9	+ 49,1	54	17,1	+ 36,9

Tableau établi d'après les données de
Météo-France (O. Cantat, 2004)

Tableau 1 : Températures et nombre de jours de forte chaleur dans le nord et le sud de la France durant l'été 2003. Comparaison avec la Normale climatique 1961-1990. *Temperature and number of days with extreme heat in northern and southern France during the summer of 2003. Comparison with 1961-90 normal values.*

Durant l'été météorologique (de juin à août), la température maximale à Orange a dépassé quasiment tous les jours le seuil des 30°C alors que la Normale est « seulement » proche d'un jour sur trois. Un jour sur deux, le thermomètre a même affiché plus de 35°C. La situation dans le Sud-Ouest, si elle est légèrement moins excessive, est tout aussi remarquable en comparaison des Normales régionales : 54 jours de Tx >= 30°C à Mont-de-Marsan (moyenne = 17). Dans le Nord de la France, les fortes chaleurs sont intervenues de façon plus ponctuelle avec quelques brèves « poussées » fin juin, mi-juillet et mi-septembre, en plus de la première quinzaine d'août véritablement exceptionnelle : 10 jours de températures supérieures à 35°C et un total sur la saison de 21 jours à plus de 30°C (Normale = 6 jours).

De très nombreux records absolus de chaleur sur la période de référence 1961-1990 ont été battus, voire « écrasés » comme à Paris (39,5°C / 36,6°C). Dans beaucoup de villes, le seuil des 40°C a été franchi pour la première fois de leur histoire, plus particulièrement dans le Centre et le Centre-Est où la continentalité accentue la chaleur (Auxerre, Romorantin...) mais également au nord-ouest du pays (Le Mans, Lisieux...), ce qui est beaucoup plus surprenant encore vu la proximité de grandes masses maritimes comme la Manche et l'Atlantique. L'analyse des températures moyennes saisonnières exprime

clairement le caractère inhabituellement durable de la situation chaude : les écarts dépassent 3°C pour les valeurs minimales et plus de 4 à 6°C pour les maximales !

1.3.2 La situation en montagne

Selon la définition stricte du concept de canicule ($T_x \geq 35^\circ\text{C}$), aucune station montagnarde n'a été touchée par le phénomène... Toutefois, d'un point de vue climatique et géographique, il nous a paru intéressant de présenter ces espaces car les écarts à la « normale » ont été tout aussi importants qu'en plaine et parce que ces fortes chaleurs peuvent avoir des répercussions importantes sur l'équilibre des milieux naturels (faune, flore, sol, glaciers...).

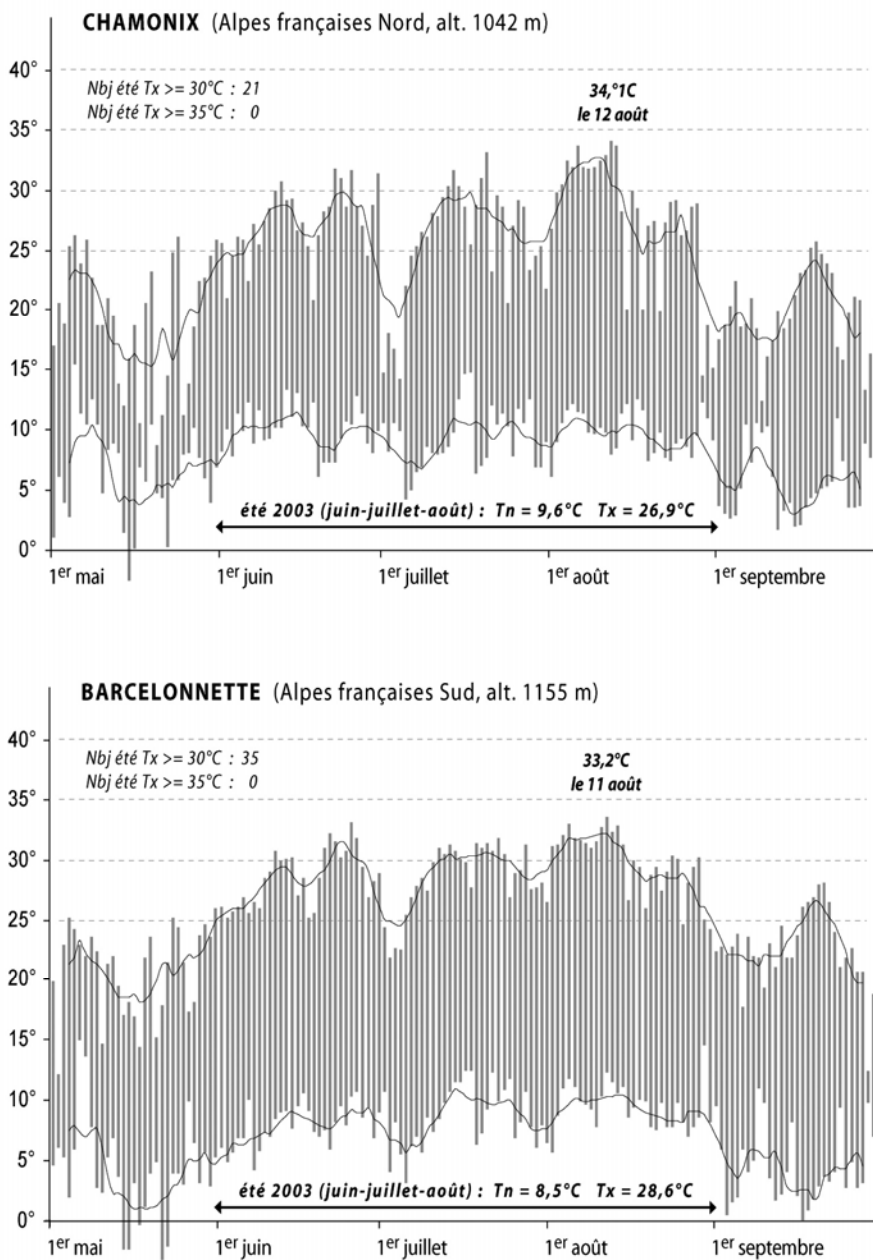
Concrètement, la chaleur a été remarquablement présente dans tous les massifs montagneux, notamment dans les Alpes et les Pyrénées où Météo-France a relevé ponctuellement des températures supérieures à 30°C à plus de 1800 mètres d'altitude. Il convient toutefois de distinguer le comportement très différent des vallées et des versants dans cette période où le calme et la transparence de l'atmosphère ont permis aux températures de « bénéficier » pleinement des facteurs géographiques locaux.

Des vallées aux contrastes diurnes saisissants...

Dans les vallées de moyenne altitude (vers 1000 mètres), le seuil des 30°C a été franchi très fréquemment : ainsi, par exemple, à 35 reprises dans les Alpes du Sud à *forte tendance méditerranéenne* (Barcelonnette, 1155 m), et 21 fois dans les Alpes du Nord à *influence tempérée* (Chamonix, 1042 m).

L'excédent thermique de l'été 2003 est particulièrement prononcé sur les valeurs maximales [+4,9°C à Chamonix (26,9 / 22,0) et +4,7°C à Barcelonnette (28,6 / 23,9)], moins sur les valeurs minimales [+1,5°C à Chamonix (9,6 / 8,1) et +1,2°C à Barcelonnette (8,5 / 7,3)]. L'originalité thermique majeure de ces vallées apparaît dans la figure 5 avec la mise en évidence de contrastes diurnes très importants, la chaleur du début d'après-midi succédant systématiquement à la fraîcheur marquée de l'aube. Ceci peut être illustré par l'exemple des 12-13 août 2003 à Chamonix : le 12, en moins de 10 heures d'affilée la température passa de 7,9°C (04:37 UTC) à 34,1°C (14:21 UTC, record absolu de chaleur), pour « retomber » à 8,5°C le lendemain matin (04:17 UTC) et « remonter » à nouveau à plus de 33°C au tout début de l'après-midi du 13 (33,7°C à 13:02 UTC)... (cf. courbe horaire sur la figure 7 présentée ultérieurement).

Durant l'été 2003, la prédominance d'un temps clair et calme a favorisé cette situation en laissant libre cours à l'expression des effets amplificateurs liés aux sites de vallée : de nuit, la topographie encaissée provoque l'accumulation de l'air « froid » qui se forme et s'écoule par gravité le long des pentes ; de jour, le confinement de la masse d'air permet une hausse rapide et importante de la température. De ce fait, les amplitudes journalières ont dépassé fréquemment 20°C, et parfois plus de 25°C, comme cela fut le cas à Chamonix les 12 et 13



graphiques établis d'après données Météo-France (O. Cantat, 2004)

Figure 5 : Températures minimales et maximales dans les Alpes françaises entre mai et septembre 2003. Comparaison Nord / Sud (températures 'vraies' en bâton et moyennes mobiles glissantes d'ordre 7 en courbe). *Minimal and maximal temperatures in the French Alps between may and october 2003. A north/south comparison (actual temperatures and running mean order 7).*

août, ou bien encore à Barcelonnette le 1^{er} août (et même plus tardivement dans la saison²).

Des versants aux caractères thermiques très atténués

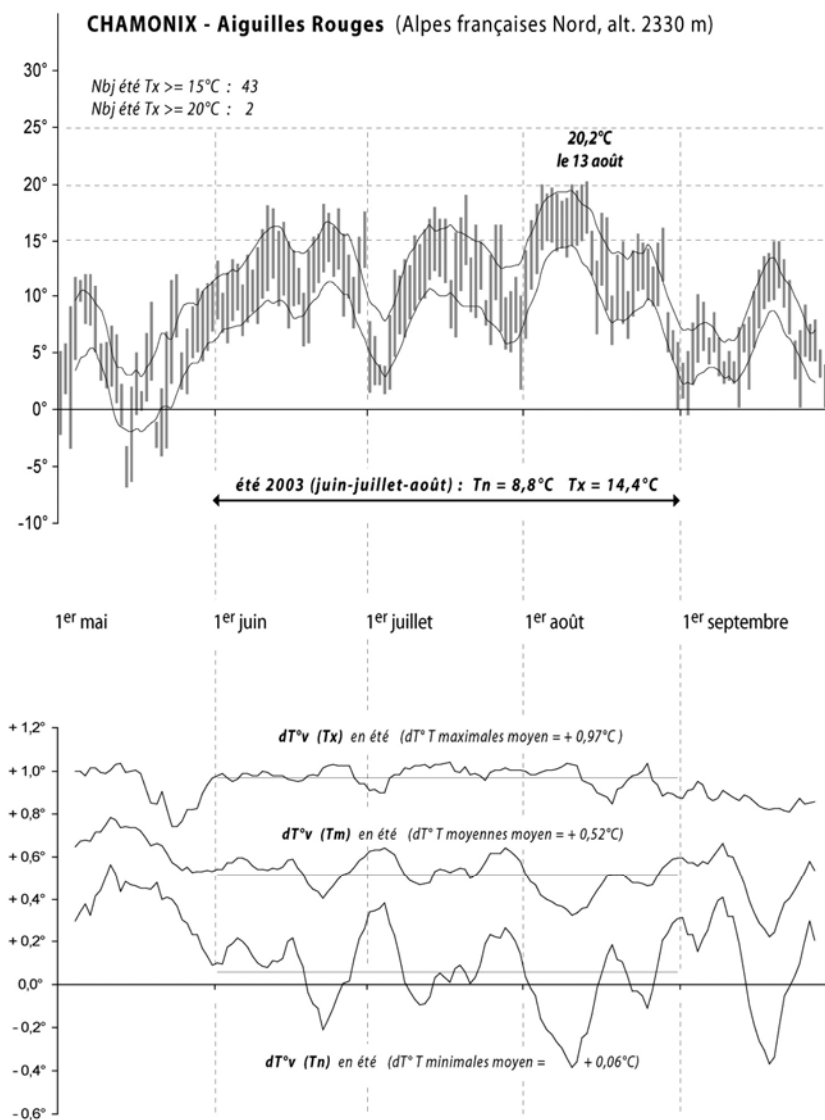
Pour une connaissance approfondie des conditions de températures en montagne, le secteur de Chamonix présente l'avantage de posséder plusieurs stations étagées entre le fond de vallée (poste de référence, 1042 m) et les sommets (*Aiguille du Midi*, 3845 m). Malheureusement nous ne disposons pas des températures de ce site de haute altitude lors de la canicule de l'été 2003. Nous présenterons donc ici des résultats grâce à la station intermédiaire des *Aiguilles Rouges*, située à 2330 mètres d'altitude (figure 6a).

Pour ce poste, l'absence de confinement de la masse d'air engendre un régime thermique assez proche de celui de l'air libre, donc bien différent de la vallée au comportement « excessif ». Durant l'été 2003, les amplitudes diurnes ont été faibles (moyenne de l'été de 5,6°C contre 17,5°C dans la vallée) grâce à la douceur relative des nuits (8,8°C) et surtout à la fraîcheur marquée des après-midi (14,4°C). Si le gradient thermique vertical moyen avec la vallée de Chamonix (+0,52°C/100 m) apparaît à peu près conforme avec celui de l'atmosphère standard (+0,65°C/100 m), il masque en fait des comportements très contrastés entre la phase diurne (+0,97) et la phase nocturne (+0,06). Cela est particulièrement frappant lors de la période de canicule (figure 6b et tableau 2) :

- pour les températures maximales **T_x**, la décroissance thermique avec l'altitude s'est établie très régulièrement autour de 1°C par tranche de 100 mètres, marquant ainsi la « surchauffe » chronique du fond de vallée par rapport aux versants, quelque soit le type de temps ;

- pour les valeurs minimales **T_n**, le ciel clair et le temps calme associé à la canicule a entraîné systématiquement une inversion thermique avec la vallée (-0,33°C/100 m). Les valeurs nocturnes sont restées en permanence nettement plus douces aux *Aiguilles Rouges* (T_n = 14,5°C à 2330 m) qu'à la station de Chamonix (T_n = 10,2°C à 1042 m), l'écart pouvant atteindre jusqu'à plus de 7°C à la fin de la période de forte chaleur (les 12 et 13 août).

² En fin d'été et au début de l'automne, ces situations occasionnent parfois des contrastes thermiques spectaculaires quand l'air encore globalement chaud hérité de l'été est « attaqué » au niveau du sol par les pertes radiatives infrarouges de plus en plus efficaces liées aux nuits progressivement plus longues (approche de l'équinoxe). Ce fut notamment le cas à Barcelonnette du 15 au 22 septembre 2003, avec une moyenne des T_n à 2,0°C et 26,0°C pour les T_x. Le 16 septembre 2003 constitua la journée la plus remarquable de la série : la température sous abri passa du gel prononcé (-1,8°C à 5h15) à la chaleur (25,8°C à 13h45), soit une amplitude record de 27,6°C. De l'hiver à l'été en quelques heures !



graphiques établis d'après données Météo-France (O. Cantat, 2004)

Figure 6a : Températures minimales et maximales à Chamonix Aiguilles Rouges entre mai et septembre 2003 (températures 'vraies' en bâton et moyennes mobiles glissantes d'ordre 7 en courbe). *Minimal and maximal temperatures at Chamonix Aiguilles Rouges between May and October 2003.*

Figure 6b : Gradient thermique vertical quotidien ($dT^{\circ}\text{v}$) à Chamonix entre la vallée (1042 m alt.) et les versants (2330 m alt.) (moyennes mobiles glissantes d'ordre 7 en courbe). *Vertical temperature gradient ($dT^{\circ}\text{v}$) in Chamonix from the valley (1042 m) to the high slopes (c. 2230 m).*

	Tn (T°C minimales)				Tx (T°C maximales)				amplitude (Tx - Tn)	
	à 1042 m	à 2330 m	écart	dTv Tn	à 1042 m	à 2330 m	écart	dTv Tx	à 1042 m	à 2330 m
1 août 2003	6,1	6,2	-0,1	-0,01	26,8	14,2	12,6	0,98	20,7	8,0
2 août 2003	9,0	10,6	-1,6	-0,12	29,8	16,8	13,0	1,01	20,8	6,2
3 août 2003	10,6	12,1	-1,5	-0,12	30,5	18,3	12,2	0,95	19,9	6,2
4 août 2003	11,6	14,1	-2,5	-0,19	32,4	19,9	12,5	0,97	20,8	5,8
5 août 2003	12,2	14,9	-2,7	-0,21	31,9	19,1	12,8	0,99	19,7	4,2
6 août 2003	11,5	14,8	-3,3	-0,26	33,6	19,7	13,9	1,08	22,1	4,9
7 août 2003	11,4	14,0	-2,6	-0,20	32,0	19,2	12,8	0,99	20,6	5,2
8 août 2003	9,8	14,3	-4,5	-0,35	31,8	18,5	13,3	1,03	22,0	4,2
9 août 2003	9,6	13,5	-3,9	-0,30	32,0	18,8	13,2	1,02	22,4	5,3
10 août 2003	10,1	14,6	-4,5	-0,35	32,4	20,0	12,4	0,96	22,3	5,4
11 août 2003	9,7	14,5	-4,8	-0,37	32,9	19,4	13,5	1,05	23,2	4,9
12 août 2003	7,9	14,9	-7,0	-0,54	34,1	19,9	14,2	1,10	26,2	5,0
13 août 2003	8,5	15,6	-7,1	-0,55	33,7	20,2	13,5	1,05	25,2	4,6
14 août 2003	11,3	11,9	-0,6	-0,05	28,3	15,8	12,5	0,97	17,0	3,9
15 août 2003	12,2	6,6	5,6	0,43	20,1	13,2	6,9	0,54	7,9	6,6
Moyenne 1-15 août 2003	10,1	12,8	-2,7	-0,21	30,8	18,2	12,6	0,98	20,7	5,4
Moyenne 4-13 août 2003	10,2	14,5	-4,3	-0,33	32,7	19,5	13,2	1,03	22,5	5,0

Tableau établi d'après les données de
Météo-France (O. Cantat, 2004)

Tableau 2 : Températures minimales et maximales, gradients thermiques verticaux (dT_v) et amplitudes thermiques journalières au-dessus de Chamonix durant la première quinzaine du mois d'août 2003. *Minimal and maximal temperatures, thermal vertical gradients and diurnal thermal amplitude above Chamonix during the first half of August 2003.*

Pour préciser l'originalité thermique des vallées par rapport aux sommets, la figure 7 présente l'évolution des températures horaires dans la vallée de Chamonix et aux Ménuires, station alpine de la plus haute altitude dont les données étaient disponibles lors de cette période de canicule (La Masse-Les Ménuires, 2800 m).

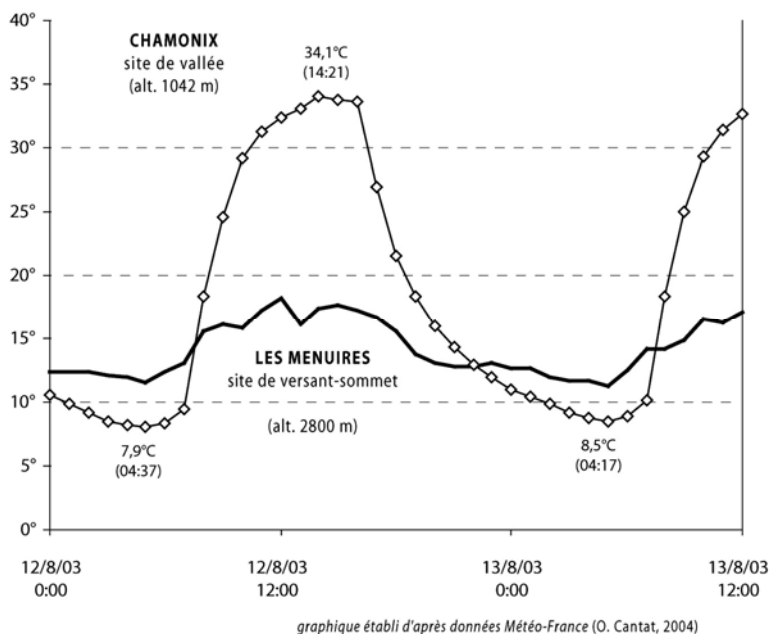


Figure 7 : Evolution horaire des températures dans les Alpes françaises les 12 et 13 août 2003. Comparaison vallée (Chamonix, 1042 m alt.) / versant-sommet (La Masse-Les Ménuires, 2800 m alt.). *Evolution at a 1h/step of temperatures in French Alps on August 12 and 13 2003. Comparison between the valley (Chamonix) and a high slope site (Les Ménuires).*

1.4 Essai d'approche systémique et temporelle des différents paramètres climatiques lors de la canicule de l'été 2003 : l'exemple de Paris

Si la canicule de l'été 2003 a résulté avant tout de mécanismes intéressant la dynamique générale de l'atmosphère (voir partie 2), précisons grâce à l'exemple de Paris la valeur des différents autres paramètres météorologiques dans la mesure où ils ont participé à l'intensité du phénomène (interactions et rétroactions positives sur les températures). Pour avoir une vue objective de la situation, nous avons comparé la première décade d'août 2003 à celles de la période 1961-2004³, séquence la plus longue où toutes les données qui composent l'ambiance atmosphérique étaient disponibles (tableau 3).

A la station de Paris-Montsouris, au cours de la première décade d'août 2003, tous les indicateurs climatiques révélateurs de la canicule apparaissaient au premier rang de ces quarante-quatre dernières années. Les valeurs étaient

³ La série commence en 1873 mais les données relatives au vent, à l'insolation, à l'humidité de l'air, à la pression atmosphérique et à la tension de vapeur d'eau ne sont mesurées ou disponibles qu'à partir de 1958 ; attention, pour les valeurs de rayonnement solaire global la base de données commencent en 1978.

même généralement largement supérieures au 9^{ème} décile (D9), ce qui traduit bien l'intensité et la fréquence rare d'un tel phénomène sur le nord de la France.

Paramètres / 1 ^{ère} décade août	2003	valeurs sur la période 1961-2004						
		rang	moyenne	mini	D1	médiane	D9	maxi
T° moyenne (°C)	28,7	1	20,6	16,9	18,0	19,9	23,7	28,7
T° mini moyenne (°C)	21,4	1	16,0	13,2	13,9	15,4	18,5	21,4
T° maxi moyenne (°C)	36,0	1	25,2	19,7	21,9	24,7	29,2	36,0
nb jours T° maxi >= 30°C	10	1	1,5	0	0	1	4	10
nb jours T° maxi >= 35°C	7	1	0,4	0	0	0	1	7
insolation (heures)	129,9	1	74,2	25,3	40,9	74,8	103,3	129,9
rayonnement global total (Kj/cm²) [à partir de 1978 seulement]	24,5	2	17,7	11,9	14,2	18,0	21,4	24,6
nb jours clairs, insolation >= 80%	10	1	2,0	0	0	2	4	10
cumul hauteurs précipitations (mm)	0,2	3	19,6	0,0	0,4	17,3	40,1	67,9
nb jours précipitations >= 1 mm	0	1	2,7	0	0	3	5	7
humidité relative mini (%)	17	2	34,1	15,0	19,6	35,5	46,7	56,0
humidité relative maxi (%)	91	4	95,4	73,0	91,0	96,5	99,7	100,0
tension moyenne H ₂ O (hPa)	18,4	5	15,8	12,6	13,4	15,5	18,7	20,1
force vent moyen (m/s)	2,2	4	2,8	1,8	2,3	2,7	3,6	4,5
force vent maxi instantané (m/s)	9,0	1	15,1	9,0	11,0	14,5	21,4	23,0
nb jours rafales vent >= 10 m/s	0	1	5,1	0	2	6	8	10
ETP Penman totale (mm)	60,9	1	41,6	27,5	33,1	41,7	49,3	60,9
pression niveau mer moyenne (hPa)	1019,2	9	1016,4	1008,8	1013,5	1016,3	1020,2	1021,7

Tableau établi d'après les données de
Météo-France (O. Cantat, 2004)

Tableau 3 : Principaux paramètres climatiques à Paris-Montsouris durant la première décade d'août 2003 et comparaison avec la période 1961-2004. *Main climate parameters in Paris-Montsouris during the first 10 days of August 2003 and comparison with the 1961-2004 period*

Pour les températures maximales, signalons les 36,0°C de moyenne décadaire contre « seulement » 31,3°C pour le précédent record de 1975 (et 24,7°C pour la médiane...). Tous les jours ont vu le thermomètre dépasser le seuil des 30°C (moyenne 1961-2004 : 1,5 jour) et 7 jours ont même franchi les 35°C ! (moyenne 1961-2004 : 0,4 jour). Il en va de même pour la situation

nocturne avec des minima très excédentaires (21,4°C de moyenne décadaire contre 15,4°C pour la médiane).

Durant cette décade dominée par un « couvercle » de hautes pressions dynamiques inhibant tout mouvement de convection, les précipitations ont été totalement absentes (0,2 mm imputable à la rosée matinale). A contrario, les apports solaires ont bénéficié de la clarté du ciel engendrée par la subsidence généralisée dans la masse d'air et ils enregistrent de ce fait des niveaux exceptionnels : rang 1 pour l'insolation (près de 13 heures par jour / moyenne de 7,4) et rang 2 pour le rayonnement global (2450 joules par jour / moyenne de 1770). Pourtant, la pression moyenne de l'atmosphère réduite au niveau de la mer n'a pas présenté un niveau véritablement remarquable : 1019,2 hPa, soit au 9^{ème} rang seulement de la série 1961-2004. La surchauffe des basses couches était vraisemblablement responsable de ce paradoxe, ce qui met en évidence la nécessité de ne pas limiter l'analyse à la seule interface mais d'envisager l'atmosphère dans toute son épaisseur (voir partie 2.).

La concomitance de valeurs thermiques et énergétiques remarquables a provoqué une évapotranspiration potentielle encore jamais enregistrée sur la région parisienne à cette période (6,1 mm par jour, contre un peu plus de 4 mm en moyenne). La sensation de chaleur extrême pour les habitants était renforcée par un vent faible (2,2 m/s, rang 4) et l'absence totale de rafales qui auraient permis de donner une impression fugitive et toute relative de fraîcheur : rang 1 pour le nombre de jours de rafales supérieures à 10 m/s (0 pour une moyenne de 5,1). La force maximale décadaire du vent a été également au premier rang des valeurs les plus basses avec seulement 9,0 m/s (moyenne : 15,1 m/s). En raison des très fortes températures éloignant l'air de son point de rosée, l'humidité relative a présenté des niveaux extrêmement bas (rang 2 pour les valeurs minimale avec 17%). Cependant, étant donné l'origine tropicale et le parcours de la masse d'air, la charge réelle en vapeur d'eau était importante (18,4 hPa), ce qui rendait la chaleur plus difficilement respirable, notamment pour les personnes fragiles des bronches.

Soleil de plomb, chaleur extrême, absence de vent... autant de paramètres dont les effets ont été accentués dans les cuvettes topographiques où l'inconfort thermique atteignait son maximum, interdisant raisonnablement toute activité physique à l'extérieur dans l'après-midi. Au centre des villes, c'est même une véritable impression de « fournaise » qui dominait à cause du manque de ventilation naturelle entre les constructions et de la réduction des espaces humides ne favorisant plus de ce fait un rafraîchissement par évapotranspiration (chaleur latente d'évaporation). Conséquence aggravante, les surfaces bâties jouèrent le rôle de véritables accumulateurs de chaleur (conversion presque exclusive du rayonnement solaire en chaleur sensible). Le stockage de cette énergie dans les matériaux à forte capacité thermique propres aux aires urbaines explique aussi que, la nuit, une chaleur lourde perdura dans les grandes

agglomérations, gênant la récupération physiologique des citadins et expliquant en partie la surmortalité dans les villes...

Aujourd'hui, grâce aux progrès des sciences et des techniques, il nous est permis de mieux appréhender la genèse et l'évolution des phénomènes atmosphériques, notamment par une approche tridimensionnelle et en continu des processus. La deuxième partie de cet article propose dans cette optique une analyse explicative de la canicule de l'été 2003 en Europe occidentale.

2. Genèse et dynamique spatio-temporelle de la canicule de l'été 2003 en Europe occidentale

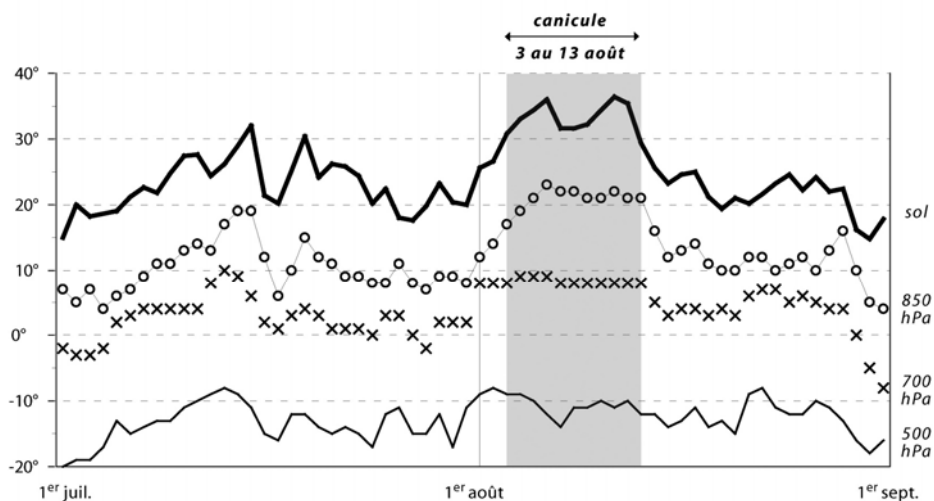
En *Europe occidentale atlantique*, les années marquées par de longues périodes de chaleur correspondent à des remontées précoces, prononcées et durables des anticyclones subtropicaux (1947, 1959, 1976, 1983, 1994...). A contrario, certains étés frais, nuageux et venteux s'expliquent par la translation insuffisante vers le nord de ces mêmes hautes pressions, laissant ainsi le champ libre aux perturbations océaniques des latitudes moyennes, habituellement rejetées plus au nord de l'Europe à cette saison (1948, 1954, 1956, 1977-1978...). Tous ces phénomènes s'intègrent pleinement dans la variabilité interannuelle des climats aux latitudes moyennes, espaces soumis aux conséquences du « balancement » saisonnier plus ou moins marqué de la *dépression subpolaire d'Islande* et de l'*anticyclone subtropical des Açores*, en accord avec la position et la courbure variables des courants jets d'altitude. Sur l'*Europe occidentale méditerranéenne*, la variabilité interannuelle est moins prononcée car la position plus méridionale du domaine géographique lui assure quasi systématiquement en été la « couverture » des hautes pressions subtropicales. De ce fait, la canicule est inscrite naturellement dans son climat, les différences apparaissant surtout ici par la durée du phénomène et son intensité plus ou moins marquée.

En 2003, conformément à ce schéma explicatif, la canicule a trouvé ses racines dans la présence de hautes pressions dynamiques imposant chaleur et sécheresse par la subsidence généralisée et la compression de la masse d'air. La ceinture des anticyclones subtropicaux s'est décalée puis a stationné durablement à nos latitudes moyennes, dépassant le cadre du bassin méditerranéen qui constitue généralement la limite septentrionale de son extension méridienne en été sur l'Europe. Dans son rapport daté du 4 septembre 2003, repris ensuite dans le *Bulletin Climatique Mensuel* de septembre, Météo-France souligne qu'il s'agit d'une « *situation météorologique classique pour l'été avec des hautes pressions sur l'Europe de l'Ouest. Le caractère singulier de cette situation est qu'elle dure longtemps et qu'elle amène de l'air très chaud et très sec en provenance du sud de la Méditerranée, près de la surface comme en altitude* » (Météo-France, 2003). Pour le climatologue, si cette configuration barométrique n'est pas « anormale », elle constitue néanmoins une exagération

du système peu fréquente par sa durée dont les causes profondes nous restent en grande partie inconnues, par conséquent difficilement prévisibles à longue échéance... Une analyse de la situation synoptique sur l'hémisphère nord à différentes altitudes permettra de dégager globalement les caractères singuliers de l'été 2003 en Europe. Les documents présentés dans les figures 8 à 12 ont été établis d'après les cartes du *Bulletin Météorologique Européen* à 850, 700, 500 et 100 hPa et d'après les relevés des radiosondages de Trappes, en région parisienne.

2.1 L'évolution des températures et de la pression en altitude sur le nord de la France

Les radiosondages de Trappes traduisent une situation durablement chaude à tous les niveaux de l'atmosphère, ici visualisée du sol jusqu'à la surface de référence 500 hPa, soit sur une couche de près de 6 kilomètres d'épaisseur (figure 8, 9 et 10).



graphique établi d'après les données du Deutscher Wetterdienst, Europäischer Wetterbericht et de l'University of Wyoming (Department of Atmospheric Science) (O. Cantat, 2004)

Figure 8 : Evolution de la température de l'air au sol et en altitude de juillet à août 2003 sur le nord de la France (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12 :00 UTC). *Evolution of air temperature in July and August 2003 near the ground and in the upper air above northern France from the radiosonde data of Trappes.*

2.1.1 Les températures

La première quinzaine du mois d'août 2003 se singularise nettement avec des températures au sol voisines ou supérieures à 30°C à 12:00 UTC, principalement entre le 3 et le 13 août (en grisé). Au niveau de la surface 700 hPa – soit à plus de 3200 m d'altitude durant la canicule – la température de 9°C équivaut à près de 30°C au niveau de la mer (réduction de la température selon le gradient vertical standard de 0,65°C/100 m). Par le même procédé de

« réduction », le tableau 4 permet d'élargir l'analyse en comparant la température dans toute la troposphère inférieure durant les mois de juillet et août 2003, et plus particulièrement durant la canicule.

Niveau de pression	T° réduite niveau mer Moyenne 10-12 août 2003 Pic de la canicule	T° réduite niveau mer Moyenne 3-13 août 2003 Période de canicule	T° réduite niveau mer Moyenne juillet-août 2003
1000 hPa (voisinage du sol)	36,4°C	34,2°C	25,4°C
850 hPa	31,7°C	31,3°C	22,4°C
700 hPa	29,1°C	29,4°C	24,3°C
500 hPa	28,1°	27,7°C	24,9°C

Tableau établi d'après les données du Department of Atmospheric Science (University of Wyoming) (O. Cantat, 2004)

Tableau 4 : Températures réduites au niveau de la mer à divers niveaux de pression atmosphérique et écart avec la température au sol (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12:00 UTC, juillet-août 2003). *Sea level reduced temperatures at different pressure levels and difference with near-ground temperatures (from the radiosonde data of Trappes, 12h UTC, july-august 2003).*

Les valeurs de ce tableau mettent également en évidence le phénomène diurne de surchauffe de la « couche géographique » qui se produit par temps clair et calme. Au contact d'un sol littéralement brûlé par le soleil, la chaleur se communique d'abord aux basses couches de l'atmosphère, puis se dilue progressivement avec l'altitude. Ainsi, durant la période de canicule la température équivalente au niveau de la mer est progressivement moins chaude du sol jusqu'au niveau 500 hPa. Le phénomène présente un maximum d'intensité lors des 3 journées les plus chaudes enregistrées à Trappes à 12:00 UTC : écart de 8,3°C : 36,4 / 28,1°C (colonne gauche). Le phénomène est encore très marqué pour l'ensemble de la période de canicule enregistrée dans cette partie du pays : écart de 6,5°C (colonne centrale). Cette configuration de la structure verticale de l'atmosphère diffère sensiblement de la situation sur l'ensemble de l'été où les températures « réduites » restent relativement homogènes sur toute l'épaisseur d'air : écart moyen de 0,5 à 3°C maximum (colonne de droite).

2.1.2 Les variations de l'altitude de l'isotherme 0°C

Les variations de l'altitude de l'isotherme 0°C au-dessus de la région parisienne confirment l'ampleur de l'advection tropicale en altitude et laisse entrevoir son rôle précurseur dans la genèse de la canicule au niveau du sol. Nous pouvons constater dans le tableau 5 que le maximum d'altitude de l'iso-0 a été enregistré très tôt, durant la première pentade du mois d'août (4515 m).

Trappes 12:00 UTC	26-31 jul.	1 ^{er} -5 août	6-10 août	11-15 août	16-21 août	1-2 août	10-12 août
Altitude moyenne iso-0	3307 m	4515 m	4227 m	4018 m	3786 m	4569 m	4141 m
T° niveau mer	21,4°C	29,4°C	29,3°C	27,2°C	24,0°C	27,1°C	36,4°C

Tableau établi d'après les données du Department of Atmospheric Science (University of Wyoming) (O. Cantat, 2004)

Tableau 5 : Variations de l'altitude de l'isotherme 0°C et de la température au sol entre le 26 juillet et le 21 août 2003 (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12:00 UTC, juillet-août 2003). *Variation of the 0°C isotherm height and near-ground temperature between July 26 and August 21 2003 (from radiosonde data of Trappes, 12h UTC, July-August 2003).*

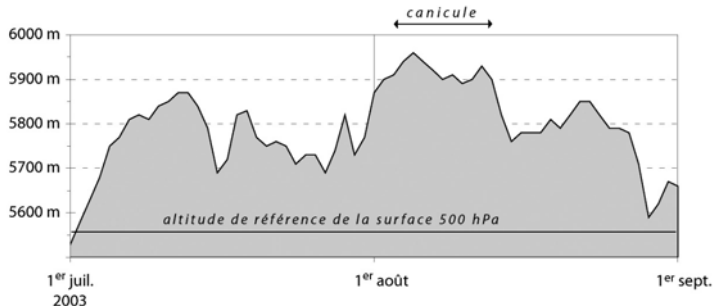
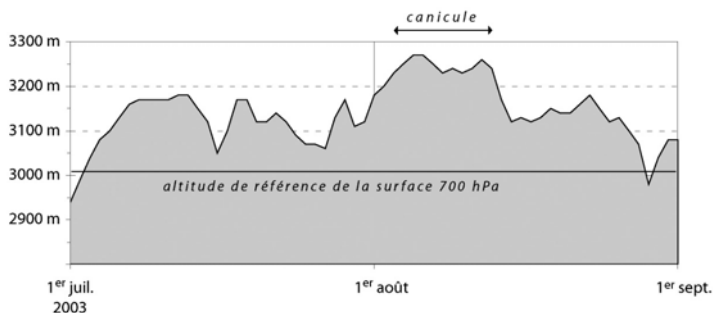
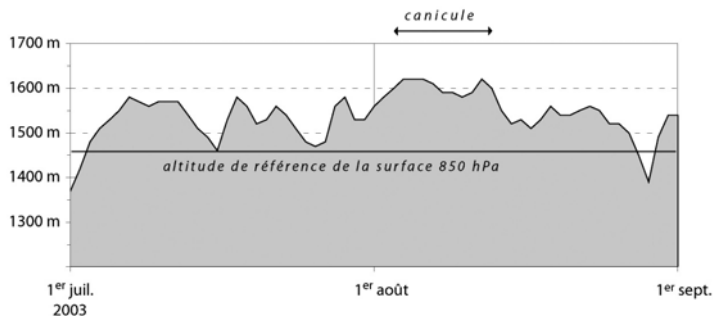
Le maximum s'est produit les 1^{er} et 2 août 2003, avec près de 4600 m alors qu'au sol les températures étaient chaudes, mais sans plus (26-27°C). Cette situation correspond en fait au début de la poussée tropicale d'altitude que nous pouvons matérialiser à travers l'élévation brutale de la température aux niveaux 700 et 500 hPa (figure 9 et 10). Inversement, le pic de canicule au sol du 10 au 12 août sur le nord de la France s'est produit alors qu'en altitude l'essentiel de la poussée tropicale chaude avait déjà nettement reflué, l'iso-0 étant redescendue à moins de 4200 m. Ce déphasage, a priori paradoxal, est à mettre en relation avec l'inertie du substratum et les effets d'accumulation énergétique à l'interface sol/air.

2.1.3 La dilatation de l'atmosphère

La présence de ces températures chaudes en altitude apparaît indirectement aussi par une très nette dilatation de l'atmosphère (figure 9). De fait, on observe sur ces documents un relèvement important de l'altitude des surfaces barométriques de référence en raison de la décroissance plus lente de la pression avec l'altitude dans l'air chaud (que dans l'air froid).

En 2003, durant la première quinzaine du mois d'août, la surface 500 hPa a ainsi atteint plus de 5900 mètres d'altitude sur le nord de la France, contre environ 5600 mètres habituellement (figure 9a). Le phénomène est révélateur d'une masse d'air tropical, cette isohypse (5900) se rencontrant généralement à cette saison au cœur du Sahara.

La dilatation est également bien marquée au niveau de la surface 700 hPa (figure 9b), en revanche elle est moins flagrante dans les basses couches correspondant à la surface 850 hPa (figure 9c). Mais peut-on comparer directement ces valeurs entre elles ? Pour une lecture objective, l'analyse doit maintenant être complétée par une approche en valeur relative des variations de l'altitude des différents niveaux de pression (figure 10).

9a Altitude de la surface 500 hPa (m)**9b** Altitude de la surface 700 hPa (m)**9c** Altitude de la surface 850 hPa (m)

graphiques établis d'après les données
du Deutscher Wetterdienst, Europäischer Wetterbericht
et de l'University of Wyoming (Department of Atmospheric Science)
(O. Cantat, 2004)

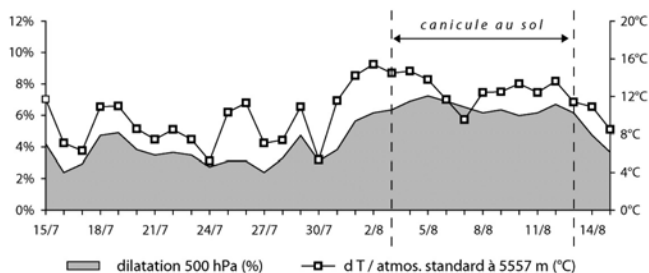
Figure 9 : Evolution de l'altitude de différents niveaux de pression standard de juillet à août 2003 sur le nord de la France (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12:00 UTC). *Evolution of the height of standard pressure levels in July-August 2003 above northern France (from daily radiosonde data of Trappes, 12hUTC).*

2.1.4 Approche globale de la situation aux différents niveaux de pression

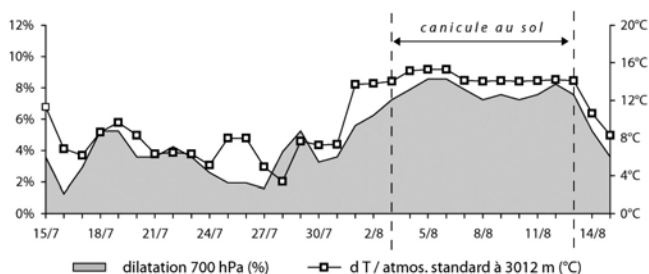
Pour visualiser de façon objective la colonne d'air dans toute son épaisseur, nous avons calculé sur la période du 15 juillet au 15 août 2003 la dilatation de l'atmosphère et l'excédent de chaleur par rapport aux valeurs de référence données pour l'atmosphère standard (figure 10). Afin de rendre les données comparables entre elles, la dilatation de la masse d'air a été exprimée en pourcentages et l'écart de température a été calculé pour une altitude constante correspondant à l'altitude de référence de chaque niveau standard de l'atmosphère (ajustement par réduction selon un gradient thermique vertical de 0,65°C).

- ● A **700 hPa** (figure 10 b), la courbe de l'excédent de chaleur marque une très nette augmentation le 1^{er} août, le surplus moyen saisonnier passant de +7°C à +14°C. Cette arrivée d'air tropical chaud à moyenne altitude (environ 3000 mètres, voir figure 9b) précède donc de deux jours l'installation de la canicule dans les basses couches, ce qui traduit bien l'origine dynamique du phénomène et non pas un simple phénomène d'interface sol-air lié à un temps clair et calme. Cette élévation brutale de la température précède également de deux jours la dilatation franche de la masse d'air, celle-ci passant progressivement d'environ 4 à 8% (de 3100 à 3250 m) par rapport à son épaisseur standard d'environ 3000 mètres. La fin de cette canicule sur le nord de la France intervient le 14 août, les courbes d'excédent de chaleur et de dilatation de la masse d'air retrouvant cette fois-ci simultanément un niveau conforme à la saison.
- ● La situation est à peu près identique à plus haute altitude (surface **500 hPa**) mais les variations altimétriques et thermiques présentent des transitions plus douces et un déphasage temporel moins net. Cette différence est probablement due à un phénomène d'inertie induit par l'épaisseur considérable de la tranche d'air considérée (altitude supérieure à 5900 mètres durant la canicule, soit près du double qu'à 700 hPa).
- ● Dans les basses couches de l'atmosphère (surface **850 hPa**), les variations plus fortes ainsi que la montée progressive et retardée des courbes semblent traduire l'influence de la chaleur accumulée au sol qui se propage lentement par conduction puis mélange aux couches d'air sus-jacentes. Vers 1500 m d'altitude, la dynamique du phénomène canicule révélerait donc clairement le couplage thermique substratum / basse troposphère (« couche géographique »), comparativement aux niveaux 700 et 500 hPa qui reflètent davantage la dynamique des masses d'air (circulation générale de l'atmosphère et types de temps associés).

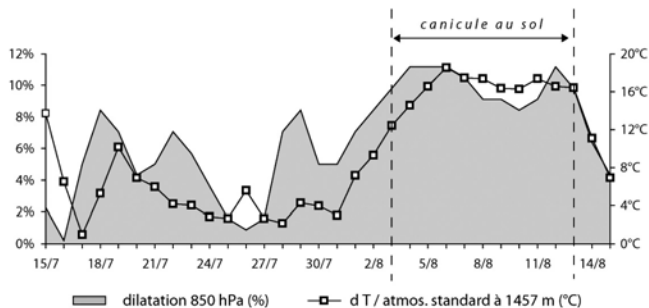
10a Dilatation de la surface 500 hPa (%) et excédent de chaleur (°C)



10b Dilatation de la surface 700 hPa (%) et excédent de chaleur (°C)



10c Dilatation de la surface 850 hPa (%) et excédent de chaleur (°C)



graphiques établis d'après les données
du Deutscher Wetterdienst, Europäischer Wetterbericht
et de l'University of Wyoming (Department of Atmospheric Science)
O. Cantat, 2004)

Figure 10 : Dilatation de la masse d'air et excédent de chaleur par rapport à l'atmosphère standard de juillet à août 2003 sur le nord de la France (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12:00 UTC). Air mass dilatation and heat excess in comparison with standard atmosphere in July and August 2003 above northern France (from radiosonde data of trappes, 12h UTC).

Le tableau 6 propose une synthèse chiffrée des résultats pour la période caniculaire au sol du 3 au 13 août. Nous analyserons plus en détails la situation à 700 hPa qui apparaît très significative de la genèse de cette canicule intense et durable (compléments sur la figure 12).

Niveau standard	Altitude référence	T° référence	Altitude moyenne 3-13 août 2003	d Alt.	T° moyenne 3-13 août 2003 au niveau de pression de référence	d T°	T° moyenne 3-13 août 2003 Réduction à l'altitude de référence	d T°
850 hPa	1457 m	+5,5°C	1604 m	+10,0%	+20,9°C à 850 hPa (1604 m)	+15,4°	+21,9°C à 1457 m	+16,4°
700 hPa	3012 m	-4,6°C	3246 m	+7,8%	+8,3°C à 700 hPa (3246 m)	+12,9°	+9,8°C à 3012 m	+14,4°
500 hPa	5557 m	-21,2°C	5918 m	+6,5%	-10,8°C à 500 hPa (5918 m)	+10,4°	-8,5°C à 5557 m	+12,7°

Tableau établi d'après les données du Department of Atmospheric Science (University of Wyoming) (O. Cantat, 2004)

Tableau 6 : Valeurs de références de l'atmosphère standard et moyenne du 3 au 13 août 2003 (d'après radiosondages verticaux de Trappes, 12:00 UTC). *Reference values for standard atmosphere and mean values for the period August 3-13 2003.*

Aux latitudes moyennes « atlantiques », le système thermodynamique menant à la canicule est généralement vite interrompu à cause de l'instabilisation naturelle de la masse d'air par les basses couches surchauffées, phénomène relayé par l'aspiration due à l'air plus froid d'altitude toujours plus ou moins proche, en embuscade, au-dessus de l'océan. Ce ne fut pas le cas en 2003 en raison de l'imposant « couvercle » d'air chaud qui bloqua toute ascendance. Sur *l'Europe occidentale atlantique*, contrairement aux épisodes de chaleur habituels, d'une durée moyenne de 2 à 4 jours, cette séquence s'est donc prolongée en raison de la stabilité du phénomène engendrée par l'advection massive et à tous niveaux d'altitude d'air très chaud et très sec, créant un véritable blocage pour les perturbations océaniques (Jan et Baraer, 2004 ; Cantat et Savouret, 2004). Sur *l'Europe occidentale méditerranéenne*, certes plus habituée aux vagues de chaleur, cette configuration a occasionné

également des excès thermiques et des records en durée comme en intensité (Fazzini, 2004 ; Gomez *et al.* 2004 ; Nicoletta *et al.*, 2004...). L'exemple en France de la ville d'Orange nous l'a démontré.

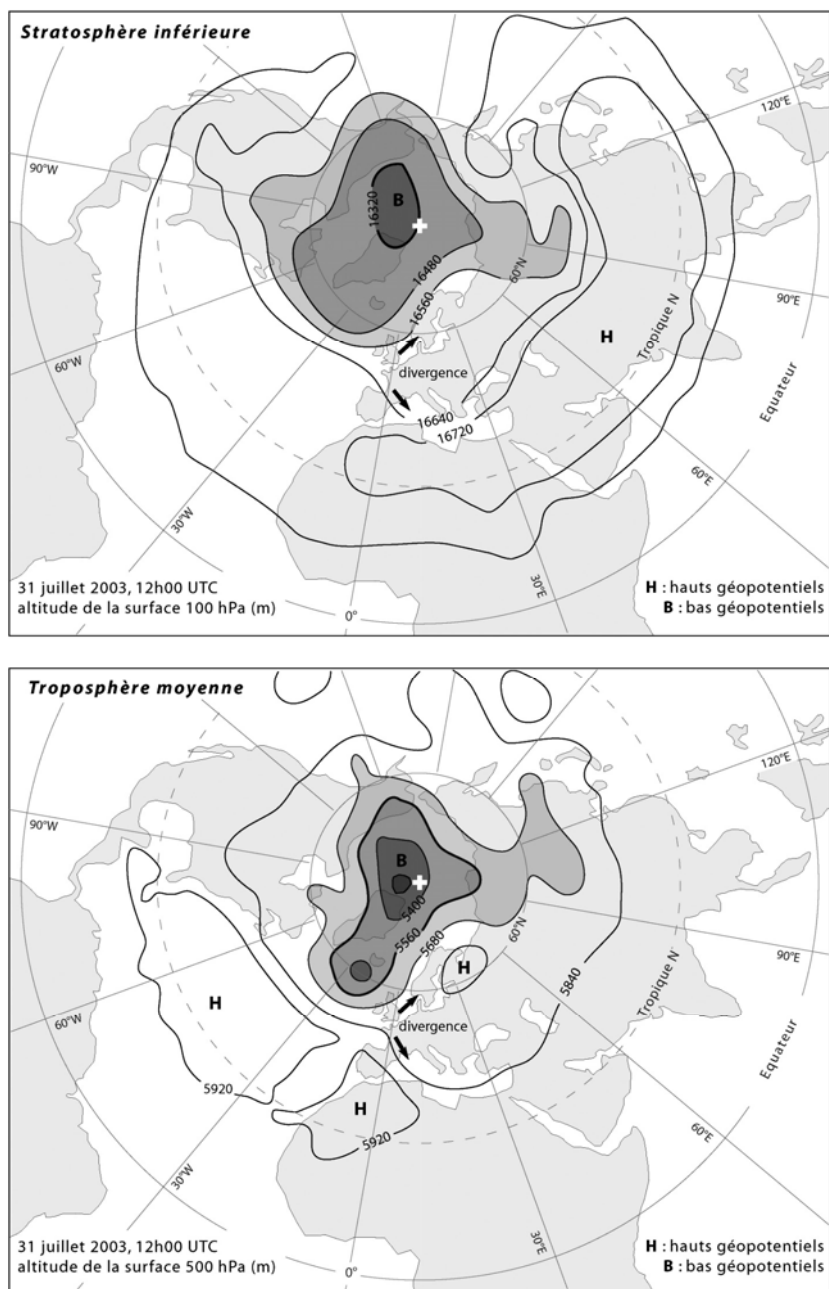
Il convient donc maintenant de procéder à une analyse géographique de l'évolution de la situation synoptique pour comprendre le cheminement de cette masse d'air tropicale d'Afrique en Europe.

2.2 La spatialisation du déroulement de « l'invasion » tropicale en altitude

2.2.1 Les éléments précurseurs

Avant d'aborder le déroulement de la canicule à 700 hPa – niveau qui nous est apparu le plus révélateur de cette invasion tropicale (cf. figure 10b) –, un point sur la situation synoptique sur l'ensemble de l'hémisphère nord permettra d'apprécier la répartition des principaux centres d'action qui ont été les éléments moteurs à l'origine de cette « bouffée de chaleur » exceptionnelle (figure 11).

Trois jours avant la manifestation au sol de cette longue période de canicule, les cartes à haute et moyenne altitude sur l'hémisphère nord (surfaces 100 et 500 hPa) montraient des signes avant-coureurs à la formation d'une situation de blocage « chaud » sur l'Europe de l'Ouest. Soulignons les grands traits de la situation synoptique visibles sur la figure 11 : on observait des bas géopotentiels polaires associés à de l'air froid se prolongeant par deux excroissances loin vers le sud, bien en-dessous du 60^{ème} parallèle : une localisée sur le centre de l'Atlantique (sud de l'Islande), l'autre vers le centre de l'Asie (Plateau de Sibérie centrale). Entre ces deux *vallées froides* encadrant le nord de l'Europe, une *crête chaude* (dorsale) se dessinait nettement sur la Scandinavie, les hauts géopotentiels subtropicaux étant comme aspirés vers le nord dans un grand mouvement de compensation. Au niveau de la Méditerranée, au contraire, on remarquait un « enfoncement » des bas géopotentiels relatifs (ligne 16640 m à 100 hPa et ligne 5840 m à 500 hPa) occasionnant un mouvement de divergence propice à la subsidence de l'air sur l'Europe occidentale (flux de sud-ouest des Iles britanniques à la Scandinavie ; flux de nord-ouest de la France aux côtes algéro-tunisiennes). Cette séparation en deux du grand courant d'ouest d'altitude s'accompagna d'une circulation atmosphérique à forte composante méridienne de sud, ce qui constitua certainement un élément essentiel dans la genèse de la canicule par advection d'air chaud en provenance directe d'Afrique du Nord et de Méditerranée.



synthèse cartographique établie
d'après les cartes du Deutscher Wetterdienst, Europäischer Wetterbericht (O. Cantat, 2004)

Figure 11 : Géopotentiels sur l'hémisphère nord dans la stratosphère inférieure (surface 100 hPa) et dans la troposphère moyenne (surface 500 hPa), le 31 juillet 2003 à 12:00 UTC. *Geopotential values above the northern hemisphere at the lower troposphere level (100 hPa), for July 31, 2003 at 12h UTC.*

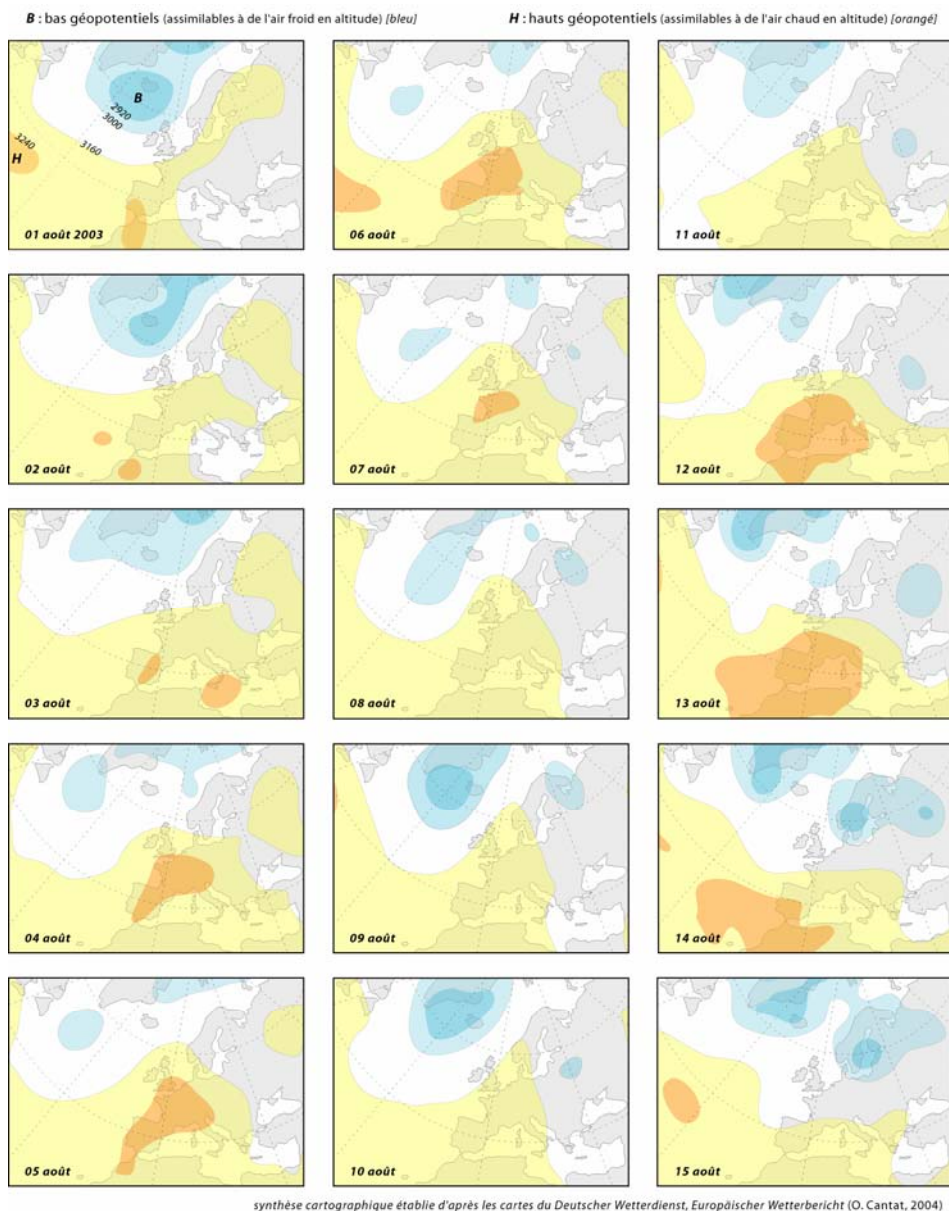


Figure 12 : Evolution de la situation synoptique sur l'Atlantique Nord et l'Europe du 1^{er} au 15 août 2003 (d'après l'altitude de la surface 700 hPa à 12:00 UTC, exprimée en mètres). *Evolution of the meteorological situation at synoptic scale for Northern Atlantic and Europe during August 1-15 2003 (from the height of the 700 hPa level at 12h UTC).*

2.2.2 L'évolution de la situation synoptique sur l'Atlantique Nord et l'Europe

Pour préciser le déroulement de cette « invasion tropicale », quinze cartes de la surface 700 hPa entre le 1^{er} et le 15 août 2003 retracent la dynamique spatiale et temporelle de cet épisode exceptionnel (figure 12).

Le phénomène marquant sur l'ensemble de la période est le développement en deux phases sur la France et l'Espagne d'une cellule de hauts géopotentiels, ce qui a engendré sur l'Europe une advection d'air chaud et stable. Nous avons vu précédemment que le relèvement de la surface isobare s'est opéré rapidement entre fin juillet et début août, la surface 700 hPa passant de 3050 à plus de 3250 mètres sur Trappes (figure 9b), les géopotentiels restant ensuite constamment supérieurs à 3200 mètres du 2 au 13 août.

2.2.3 Brefs commentaires et analyses sur le déroulement de la situation à 700 hPa

1) du 1^{er} au 4 août 2003 : mise en place du système

Le 1^{er} août (en haut à gauche de la figure 12), la poussée tropicale se matérialise par une *crête chaude* qui se développe du Golfe de Gascogne au nord de la Russie. A partir du 4 août, une cellule de hauts géopotentiels (H) se forme sur la France et l'Espagne, tandis que les bas géopotentiels (B) subpolaires se rétractent très au nord du Bassin arctique et au sud du Groenland.

2) du 4 au 13 août 2003 : blocage du système et mise en évidence de 2 pulsations chaudes

La situation évolue peu sur l'Europe occidentale qui est dominée par des hauts géopotentiels, tandis qu'une amorce de changements se profile par l'Atlantique Nord et la Scandinavie où des bas géopotentiels se reconstituent et se propagent vers le sud. Cette situation entraîne « l'étranglement » de l'air chaud sur un axe allant du Sahara à la Scandinavie. Les tâches de couleur orange sur l'Europe occidentale mettent en évidence le développement des deux pulsations tropicales associées aux paroxysmes thermiques enregistrées au niveau du sol : la première du 4 au 7, la seconde les 12-13. Le 11 août (en haut à droite de la figure 12), on assiste à un prolongement des bas géopotentiels au cœur de l'Atlantique (couloir « blanc » entre Islande et Açores). Par effet de compensation, un renforcement des hauts géopotentiels sur l'Europe se produit sur l'Europe les 12 et 13 août. Mais cette dernière poussée chaude annonce aussi la fin de la canicule avec le 13 une organisation plus zonale des isohypses sur l'Atlantique à la latitude de la France, signe d'un retour imminent à un flux d'ouest et du retrait de la masse d'air tropical vers ses latitudes d'origine...

3) à partir du 14 août 2003 : retour au flux d'ouest...

Le 14 août, la circulation zonale d'ouest est rétablie sur la moitié nord de l'Europe occidentale. Parallèlement à la jonction des bas géopotentiels scandinaves et groenlandais, l'abaissement de la surface isohypse se poursuit le 15 août sur la France. Une *vallée froide* s'amorce même au niveau du Portugal : cette incursion d'air relativement plus froid en altitude pouvant générer une

instabilisation de la masse d'air au contact de l'air chaud encore présent dans les basses couches.

3. Synthèse et discussion : les canicules d'aujourd'hui et celles de demain...

Après un point de synthèse sur les origines et le déroulement de la canicule de l'été 2003 en Europe occidentale, cette dernière partie permettra d'aborder le problème de la prévision des phénomènes extrêmes d'origine atmosphérique dont les conséquences sont souvent dramatiques sur la nature et les sociétés humaines.

3.1 Le scénario de la canicule : des causes et des effets en étroites interrelations...

Dans un système aussi complexe que l'atmosphère, les interactions permanentes rendent difficiles l'appréciation des causes et des effets. La prise en compte simultanée des événements se déroulant en altitude et dans les basses couches de l'atmosphère nous a cependant permis de mieux cerner les mécanismes et la chronologie de la canicule de l'été 2003.

Dans un premier temps, il semble que la puissance de l'advection tropicale d'altitude ait pu créer les bases d'un système thermodynamique capable de perdurer longtemps et d'accentuer lui-même la chaleur (autocatalyse). L'analyse démontre que ce phénomène météo-climatique exceptionnel a trouvé son origine en altitude mais que son intensité et sa durée sont en grande partie imputables à des processus d'interface air-sol. Dans le plan vertical, le scénario de la canicule peut donc se résumer par un enchaînement logique en deux temps, composé à l'origine par un grand mouvement vertical descendant (compression)^(a), suivi par un léger mouvement vertical ascendant au contact d'un substratum surchauffé, accentuant et distribuant la chaleur dans les très basses couches (conduction et mélange)^(b) :

^(a) advection tropicale d'altitude : → *subsidence* → *réchauffement* + *assèchement de la colonne d'air* → *constitution d'un « matelas » d'air chaud* : **formation d'une masse d'air calme, clair et chaud**

^(b) air calme, clair et chaud + données astronomiques (soleil haut et jour long) :

→ *de jour, intense échauffement du substratum* → **canicule à l'interface** → *propagation de la chaleur dans les très basses couches (ascendances instabilisatrices limitées par l'air chaud d'altitude)*

→ *de nuit, rafraîchissement limité de l'air malgré le rayonnement IRT (« matelas » chaud)*

Autrement dit, la chaleur serait venue « d'en haut » et aurait ensuite été renforcée « par le bas ». Toutes choses égales par ailleurs, rappelons que début août la situation est particulièrement propice à l'établissement d'une période de

forte chaleur au sol et dans les basses couches car à cette saison l'élévation du soleil au-dessus de l'horizon et la longueur des jours engendrent encore un bilan radiatif positif, phénomène d'origine astronomique renforcé par l'inertie thermique du système Terre-Atmosphère. La conjonction de facteurs planétaires saisonniers (fixes) et d'éléments météorologiques (aléatoires) dans une configuration optimale est donc à l'origine de cette canicule exceptionnelle.

Cet exemple met donc en valeur le rôle précurseur des processus d'altitude dans la genèse du phénomène, mais n'oublie pas le relais essentiel des conditions de surface pour en expliquer les caractères, ce qui affirme la nécessité d'une approche systémique. Une fois établie, l'anticyclone dynamique d'origine subtropicale a ensuite déterminé par sa puissance une aire de très forte stabilité sur l'Europe occidentale et par sa position géographique un afflux d'air méditerranéen d'origine sub-désertique. Ces hautes pressions ont alors constitué un barrage durable au passage des perturbations atlantiques et permis à la chaleur de s'intensifier de façon très inhabituelle, particulièrement pour la façade ouest du continent qui « baigne » régulièrement dans les influences maritimes. Comme nous l'avons évoqué en introduction, cette situation exceptionnelle a engendré des impacts sanitaires majeurs, avec notamment la multiplication alarmante de décès directement imputables à de telles conditions climatiques. Plus généralement, les conséquences humaines des tempêtes, inondations, vagues de froid ou de chaleur et autres « caprices » de l'atmosphère justifient les moyens considérables mis en œuvre pour améliorer la prévision de ces événements météo-climatiques extrêmes.

3.2 Quelle prévision demain pour les phénomènes atmosphériques extrêmes ?

Dans l'optique du *Développement durable*⁴, la prévision du climat futur occupe une place privilégiée pour les responsables politiques et économiques (Carrega, Dubreuil et Richard, 2004) et ce d'autant plus que l'Homme semble aujourd'hui directement impliqué dans les modifications du système... En effet, les rejets de pollution issus de nos activités altèrent la composition de l'atmosphère et modifient de façon rapide (et peut-être irréversible) l'équilibre climatique de la Terre, par conséquent les grands équilibres mondiaux qui en découlent... Pour le scientifique, en dehors de ces considérations socio-économiques essentielles, la question de *prévisibilité* se pose différemment selon l'approche météorologique ou climatologique du problème, c'est-à-dire selon un avenir envisagé à courte et moyenne échéance (prévision du temps) ou à long terme (évolution du climat).

⁴ En 1987, face aux préoccupations croissantes liées aux effets du développement économique sur la santé, les ressources naturelles et l'environnement, les Nations Unies publient le 'Brundtland Report', texte dans lequel est défini le concept de Développement durable : 'qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité de futures générations de répondre à leurs propres besoins'.

1) Dans le **court et moyen terme**, pour être opérationnelle, la prévision doit être précise dans le temps et dans l'espace. Un gain de quelques jours, ou même de quelques heures seulement, peut s'avérer déterminant pour prévenir les populations et minimiser les conséquences dramatiques des excès de l'atmosphère (particulièrement importantes pour les événements courts et très violents tels que les tempêtes de décembre 1999). Il s'agit dans ce cas de prévoir le plus tôt et le plus finement possible la configuration météorologique générale, et d'estimer sa probabilité d'évoluer en situation extrême. Pour le prévisionniste, cette expertise est délicate étant donné le faible nombre de cas auxquels il peut se référer. Les ordinateurs sont alors d'une aide limitée car les indicateurs atteignent des niveaux « hors normes » que les modèles ne savent pas interpréter. D'après Météo-France, il paraît très difficile de prévoir ce type d'événements plus d'une semaine à l'avance, même si l'on prend en compte la température de l'océan observée après coup, cette dernière intervenant beaucoup dans les évolutions plus longues à l'échelle du mois, voire de la saison (André *et al.*, 2004). Pour la canicule de 2003, le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) a estimé la prévisibilité de l'épisode à seulement deux jours (Juvanon du Vachat, 2004). Cette durée coïncide avec la hausse brutale de l'excédent de chaleur que nous avons clairement identifiée à 700 hPa au-dessus de Trappes (figure 10b).

A une échelle de temps plus longue, une dizaine de centres producteurs se sont investis dans la prévision saisonnière. Ainsi, depuis 1999, Météo-France fournit à titre expérimental des prévisions pour les trois mois à venir. Actuellement la qualité des prévisions varie beaucoup avec la saison et la localisation géographique. Pour l'Europe, diverses études ont montré que le signal est beaucoup moins net que pour la zone tropicale et que c'est en hiver et pour le paramètre température qu'on obtient les meilleurs scores alors qu'en « *été par contre la qualité des prévisions est très faible* » (Bessemoulin, 2003).

Dans les années à venir, des progrès sensibles sont attendus dans la prévision des phénomènes extrêmes, notamment avec la mise en place à l'échelle internationale de THORPEX, programme pour la recherche en météorologie équivalent au programme mondial de recherche sur le climat (WCRP) (Béland, 2005) : « *un des objectifs importants du programme Thorpex est d'améliorer la prévision des phénomènes météorologiques dangereux plusieurs jours à l'avance* » (Bougeault, 2005). Plus généralement, ce programme a pour objectif d'améliorer la prévision du temps sur l'ensemble de la planète à toutes les échéances entre 1 et 14 jours, voire au-delà... Le gain de fiabilité attendu reposera entre autres sur le croisement dans un « super ensemble » des prévisions déterministes et probabilistes des divers participants.

2) Pour le **long terme**, il ne s'agit plus de prévoir un phénomène en particulier mais d'envisager l'évolution globale du climat, dans ses caractères moyens comme dans ses excès, à l'échelle zonale et régionale (Houghton *et al.*,

2001). Beaucoup ont vu dans l'« anomalie » de l'été 2003 un exemple de manifestations climatiques extrêmes qui deviendraient de plus en plus fréquentes dans les décennies à venir... Pour Serge Planton, expert à Météo-France du réchauffement climatique, « *il n'est pas possible d'associer directement un événement particulier comme la vague de chaleur actuelle [2003] au réchauffement de la planète* » (Planton, 2003). En ce qui concerne le futur, en revanche, plusieurs études concluent à la possibilité de fréquence cinq fois supérieure pour l'échéance 2070-2100 (Schär *et al.*, 2004). Les températures moyennes estivales exceptionnelles connues en 2003 seraient quant à elles considérées « normales » à la fin du 21^{ème} siècle, d'après les projections du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) pour un scénario A2 (Déqué, d'après Juvanon du Vachat, 2004)⁵.

Pour arriver à ces résultats, le climat futur est simulé à partir de modèles numériques faisant appel aux lois de la physique et de la thermodynamique, couplé à des perspectives d'évolution socio-économiques à l'échelle mondiale. Mais qui peut dire ce que sera le Monde économique de demain ? La complexité des interrelations entre processus naturels et anthropiques dont dépend l'évolution du climat rend ces projections encore incertaines, avec des scénarios très variables dans le temps et dans l'espace. Si la plupart des scénarios converge aujourd'hui vers un réchauffement global et une multiplication des phénomènes extrêmes, les chercheurs restent malgré tout très prudents dans la mesure où ils savent combien leurs modèles restent imparfaits en raison de la compréhension encore très partielle du fonctionnement du système Terre-Atmosphère. Cependant, jour après jour, météorologie et climatologie bénéficient du progrès continu des sciences, de l'amélioration des modèles numériques et de la puissance de calcul sans cesse croissante des ordinateurs. Mais si un jour prochain les prévisions à long terme devenaient possibles, que ferions-nous de ce pouvoir ?

Conclusion

Toutes les études récentes soulignent la complexité du système climatique et notamment la nécessité de « *se défier des causalités simples et de privilégier les fonctionnements interactifs* » (Vigneau, 2005). L'atmosphère formant un tout indissociable et en perpétuel réajustement, il est en effet difficile de concevoir son fonctionnement en séparant en plusieurs couches indépendantes les divers facteurs et processus qui la régissent. Au même titre que les grands courants d'altitude qui animent la haute atmosphère, la prise en compte de l'interface tient de ce fait une place essentielle dans l'explication globale des phénomènes

⁵ Schématiquement, A2 est le scénario le plus proche de l'évolution actuelle (croissance continue de la population, développement industriel rapide et mondialisation modérée) et le plus mauvais pour le climat : à l'horizon 2100, pour un scénario A2, la hausse moyenne de température serait comprise entre 2,6 et 4,7°C.

météorologiques « *dans la mesure où les facteurs géographiques, situés dans les basses couches de la troposphère, jouent un rôle thermique et dynamique fondamental* » (Leroux, 2000). Dans une optique associant le *haut* et le *bas*, et ne cherchant pas à définir préalablement les *causes* et les *effets*, la canicule de l'été 2003 en Europe occidentale a été le support à un essai d'approche systémique du fonctionnement parfois excessif de l'atmosphère aux latitudes moyennes.

Au terme de cette étude, à partir d'une analyse croisée des données météorologiques enregistrées au sol et en altitude, nous avons pu appréhender les principaux mécanismes qui ont conduit à la formation puis à la dynamique spatio-temporelle de cet épisode de chaleur sans précédent. Si le scénario proposé ici met en avant les processus d'altitude, il souligne également que sans le relais des basses couches et de l'interface air-sol, la canicule n'aurait pas présenté ce caractère exceptionnel d'intensité, de durée et d'extension géographique. Est-il possible de généraliser ce scénario ? Rappelons qu'il ne s'agit là que d'une étude de cas dans un contexte latitudinal et saisonnier bien déterminés. Pour être extrapolable, cette hypothèse devrait d'abord être appliquée à d'autres situations, « normales » et « anormales », et vérifiée dans d'autres cadres climatiques. Peut-être verrions-nous alors apparaître dans un autre ordre et avec un autre « poids » les divers constituants du système climatique à l'origine de la *circulation atmosphérique globale* ?

Bibliographie

- ANDRE J-C., DEQUE M., ROGEL P., PLANTON S., 2004 : La vague de chaleur de l'été 2003 et sa prévision saisonnière. *Géoscience*, n° 336, pp. 491-503.
- ATMOSPHERIQUES, 2005 : Climat. Quel avenir ? *Atmosphériques*, n° 26, 39 p.
- AVILLA F., 2004 : Eté 2003 : canicule historique en Aquitaine. Etude à partir des données des postes climatologiques d'Aire-sur-l'Adour (Landes, France). *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 109-112.
- BELAND M., 2005 : Révolutionner la prévision du temps à moyenne échéance. *Atmosphériques*, n° 26, pp. 30-31.
- BELTRANDO G., 2004 : *Les climats. Processus, variabilité et risques*. Armand Colin, coll. U, 261 p.
- BESANCENOT J.-P., 2004 : Une vague de chaleur meurtrière : les enseignements de l'été 2003 en France, *Géoconfluences - DESCO - ENS LSH*, Brève - n° 6.
- <http://www.ens-lsh.fr/géoconfluence/doc/breves/2004/6.htm>
- BESSEMOULIN P., 2003 : Interview de Pierre Bessemoulin sur les Prévisions Saisonnières. Site Internet Météo-France.
- BOUGEAULT P., 2005 : Marions-les (programme THORPEX). *Atmosphériques*, n° 26, pp. 31.

- CANTAT O., SAVOURET E., 2004 : La diversité géographique de la canicule de l'été 2003 en Basse-Normandie. *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 135-138.
- CANTAT O., 2005 : La canicule de l'été 2003 : un épisode météorologique « hors normes » ? Expertise d'un risque climatique en Basse-Normandie. *Cahiers de la MRSH*, n°42, Université de Caen Basse-Normandie, pp. 83-101.
- CARREGA P., DUBREUIL V., RICHARD Y., 2004 : Climatologie et développement durable. *Historiens et Géographes*, n°387, pp. 205-209.
- DEQUE M., 2003 : Les contours du temps futur. *Atmosphériques*. Météo-France, n°18, pp. 24-25.
- FAZZINI M., 2004 : Les excès météo-climatiques de l'année 2003 dans les grands massifs des Abruses Adriatique (Italie centrale). *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 157-160.
- FLOHN H., 1968 : *Le temps et le climat*. Hachette, Paris, 253 p.
- GOMEZ L., RASO J.M., MARTIN-VIDE J., MORENO M.C., PROHOM M., 2004 : Les températures exceptionnelles de l'été 2003 enregistrées à l'Observatoire Fabra (Barcelone). *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 161-164.
- HOUGHTON J.T., DING Y., GRIGGS D.J., NOGUER M., VAN DER LINDEN P. J., XIAOSU D., 2001 : *Climate Change 2001 : The scientific basis. Contribution of working group 1 to the third assessment report of IPCC*. Cambridge University Press, 944 p.
- HUFTY A., 2001 : *Introduction à la climatologie*. Liège, De Broeck Université, 542 p.
- InVS, 2003 : *Rapport annuel 2003*, 112 p.
- JAN J., BARAER F., 2004 : Episodes climatiques marquants sur le nord-ouest de la France. *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 177-184.
- JUVANON DU VACHAT R., 2004 : Prévision et climatologie des phénomènes extrêmes. Vers une perspective historique. *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 185-188.
- LEROUX M., 2000 : *La dynamique du temps et du climat*. Paris, Dunod, 367 p.
- METEO-FRANCE, 2003 : Une canicule historique. *Bulletin Climatique Mensuel*, septembre 2003.
- METEO-FRANCE, 2004 : La vigilance s'étoffe d'un nouveau paramètre : la canicule. *Eole, Information mensuelle de la direction interrégionale ouest*, juin 2004, pp. 2-3.
- NICOLELLA M., TEDECI L., CADUM E., 2004 : Vague de chaleur : l'événement d'août 2003 et les effets sur la santé. *Actes du 17^{ème} colloque de l'AIC, « Climat, mémoire du temps... »*, pp. 201-204.
- PLANCHON O., 1998 : La notion d'échelle en climatologie : l'exemple des climats maritimes et côtiers en Europe. *Annales de Géographie*, n° 602, pp.363-380.

- PLANTON S., 2003 : Interview de Serge Planton, expert à Météo-France du réchauffement climatique. Site Internet Météo-France.
- SCHÄR C. et al., 2004 : The role of increasing temperature variability in European summer heat-waves. *Nature*, N°427, pp. 332-336
- VIGNEAU J.-P., 2000 : *Géoclimatologie*. Ellipse, 334 p.
- VIGNEAU J.-P., 2001 : La zone « supratropicale » dans le monde... et en France. Réflexion sur la classification des climats. *Annales de Géographie*, n° 619, pp. 227-242.
- VIGNEAU J.-P., 2005 : *Climatologie*. Armand Colin, coll. Campus, 200 p.