

Une analyse des changements climatiques régionaux en France entre 1956 et 1997. Réflexions en terme de conséquences pour les écosystèmes forestiers

François Lebourgeois^{1,*}, André Granier² et Nathalie Bréda³

¹ Écosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage, ENGREF, 54042 Nancy Cedex, France

² Unité d'Écophysiologie Forestière, Équipe Bioclimatologie, INRA, Centre de Recherches Forestières de Nancy, 54280 Champenoux, France

³ Unité d'Écophysiologie Forestière, Équipe Phytoécologie, INRA, Centre de Recherches Forestières de Nancy, 54280 Champenoux, France

(Reçu le 20 avril 2001 ; accepté le 12 juin 2001)

Résumé – À partir des données journalières de 68 stations du réseau national Météo-France, une analyse des variations climatiques régionales a été effectuée sur la période 1956–1997. Les changements mensuels et saisonniers s'expriment par une augmentation des températures minimales de 1,6 °C en été (0,9 à 2,2 °C ; maximum en août) et 1,2 °C (0,6 à 2,3 °C) pour l'année. Les températures maximales ont varié moins fréquemment sauf en été (moyenne : +1,8 °C). La diminution des épisodes les plus froids s'exprime à travers une augmentation du nombre de jours « chauds » ($T_{\text{moy}} > 5$ °C) en hiver et à l'automne (14 à 31 jours ; moyenne = 19 jours) et, dans une moindre mesure, par une diminution de la fréquence des gelées annuelles ($T_{\text{min}} < 0$ °C). Les cumuls des précipitations ont moins varié et aucune tendance régionale n'est observable sauf pour les pluies du mois d'août qui ont diminué dans le quart nord-est de la France. La tendance la plus nette est une diminution de la fréquence des jours sans pluie, principalement au printemps et en automne (il pleut donc plus souvent). La durée d'insolation tend à diminuer en juin et à augmenter en août et en novembre. Les tendances saisonnières concernent principalement les stations du Sud de la France. Les effets des biais d'échantillonnage et des facteurs anthropiques sont discutés comme causes possibles de ces variations.

changement climatique / tendance saisonnière / réchauffement France / température / précipitation / durée d'insolation

Summary – An analysis of regional climate change in France between 1956 and 1997. Daily climatological data (temperature, precipitation, sunshine duration) covering the period from 1956 to 1997 for 68 locations in France has been analysed. Seasonal and monthly climate change is characterized by increases in minimum temperatures of about 1.6 °C in summer (0.9 to 2.2 °C ; maximum in August) and 1.2 °C (0.6 to 2.3 °C) for the year, a less frequent increase in maximum temperatures (with the exception in summer ; mean value = 1.8 °C), a frequent increase in the number of "warm" days ($T_{\text{moy}} > 5$ °C) in autumn and winter (14 to 31 days ; mean = 19 days), a more modest decrease of frost days ($T_{\text{min}} < 0$ °C), little trend in the precipitation totals (decrease in August precipitation in the northeastern France) but a higher frequency of change in rainless days (decrease in spring and autumn). The sunshine duration decreases in June and increases in August and November and seasonal trends mainly concerned southern France. Sampling bias and anthropic factors are discussed as possible causes of the observed trends.

climate change / seasonal trends / warming / France / temperature / precipitation / sunshine duration

* Correspondances et tirés-à-part

Tél. : (33) 3 83 39 68 74 ; Fax. : (33) 3 83 39 68 78 ; e-mail : lebourgeois@engref.fr

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, l'analyse des changements climatiques au cours du XX^e siècle est devenue une des préoccupations majeures de la communauté scientifique internationale [36]. En effet, les modèles climatiques indiquent, depuis près de vingt ans, que sous l'action d'une augmentation de la quantité des gaz à effets de serre, la température moyenne à la surface de la planète doit augmenter [1, 21]. À partir de l'analyse des données récoltées sur les différents réseaux météorologiques mondiaux [53], de nombreux auteurs ont ainsi montré que le régime des précipitations a changé dans différentes régions [13, 26] et que la température moyenne du globe a augmenté de 0,3° à 0,6 °C au cours des dernières décennies [29, 37, 40, 51]. Sur la période 1950–1993, Easterling et al. [29] ont également montré que l'augmentation de la température minimale (T_{\min}) avait été supérieure à celle de la température maximale (T_{\max}) entraînant une diminution de l'amplitude thermique diurne. Pour les hémisphères Nord et Sud, les augmentations ont été respectivement de 1,74 et 0,77 °C/100 ans et 1,81 et 0,91 °C/100 ans. D'autres travaux ont analysé les changements climatiques à une échelle régionale comme aux États-Unis [41, 46, 49], au Canada [43], en Chine [64]. En Europe Centrale et du Sud, Brazdil et al. [16] ont montré une augmentation des températures minimale et maximale annuelles de 0,52 °C et 0,60 °C pour la période 1951–1990. À partir de l'analyse des longues séries disponibles en Europe, Balling et al. [6] ont mis en évidence une augmentation de l'ordre de 0,5 °C pour la période 1751–1995 avec un réchauffement rapide entre 1890 et 1980. Dans les Alpes Suisses, Beniston et al. [10] et Beniston et Rebetez [9] ont montré que la température minimale annuelle avait augmenté de 2 °C sur la période 1901–1992 et que la durée d'ensoleillement avait diminué depuis les années 1980. Des tendances similaires ont été observées en République Tchèque [17] et en Autriche [32] pour les périodes 1961–1992 et 1961–1990.

En France, une étude récente menée sur 82 stations de plaine (71 stations ont une altitude inférieure à 400 m) a permis de mettre en évidence une forte augmentation de la température minimale depuis 1965, notamment en été (+0,93 °C) et en automne (+0,88 °C) (période 1910–1986) [22]. Pour la température maximale, les auteurs ont observé, après une période de diminution (–0,62 °C ; 1910 à 1965), une augmentation sensible surtout en été (+0,86 °C ; 1965–1986). En combinant les deux variations, les auteurs estiment ainsi à +0,55 °C l'augmentation de la température moyenne depuis 1965.

Récemment, des observations faites sur des stations « non-urbaines » de montagne ont révélées également des dérives notables. Ainsi, pour quatre stations des Alpes françaises, Rolland et al. [59] montrent une dérive positive des températures minimales, spécialement en juillet, parallèlement à une diminution des températures maximales d'avril à juin pour la période 1946–1993. À l'observatoire pyrénéen du Pic du Midi (2862 m), les dérives de la T_{\min} , T_{\max} et T_{moy} ont été estimées respectivement à +2,39 °C, –0,5 °C et +0,94 °C pour la période 1882–1984 [23, 24].

Bien que ces différents travaux aient révélé des dérives notables en France depuis les dernières années, aucun n'a étudié simultanément les changements de température et de précipitation, ainsi que les variations de paramètres tels que la durée d'ensoleillement, le nombre de jours sans pluie, la fréquence des gelées hivernales et printanières, la longueur de la saison de végétation. Face à l'importance de ces paramètres pour la végétation forestière (conséquences de ces changements sur les évolutions possibles des contraintes hydriques) [3], et dans l'hypothèse du rôle majeur du climat pour expliquer les changements récents de croissance et les vagues de dépérissement (variation de l'état des cimes, mortalité...) observés dans différents écosystèmes forestiers [5, 8], il est paru important d'étudier d'éventuelles tendances de ces paramètres au cours des dernières décennies. Cet article présente les résultats obtenus à partir de l'analyse des données journalières de 68 stations du réseau National Météo-France.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

La localisation et les caractéristiques des 68 stations du réseau National Météo-France utilisées dans cette étude sont présentées dans le *tableau 1* et la *figure 1*. Ces stations ont été choisies sur des critères liés, d'une part, à la longueur des séries des données journalières disponibles (au moins 30 ans de données continues) et, d'autre part, à leur proximité des placettes du réseau RENECOFOR. En effet, ces données ont été acquises dans le cadre d'un projet européen ayant pour objectifs 1) de caractériser le bilan hydrique et les niveaux annuels de contrainte hydrique subis par les arbres du réseau et 2) de relier ces niveaux de stress aux variations interannuelles de croissance radiale [50]. Ces données ont été sélectionnées avec l'aide du Service Central d'Exploitation de la Météorologie (SCEM) de Toulouse et couvrent une grande part de la variabilité climatique française. Les

Tableau I. Description des 68 stations météorologiques étudiées du réseau National Météo-France. Pour toutes les stations, la dernière année prise en compte est 1997. T : température journalière minimale et maximale en °C ; P : précipitation journalière en mm ; DI : Durée d'insolation en heures. % DM : pourcentage de données manquantes pour la période considérée.

Nom	Latitude (N)	Longitude	Altitude (m)	Début	T °C	P (mm)	DI (heures)	% DM
Accous	42° 56'	0° 36' O	495	1956	x			0,4
Aleçon	48° 26'	0° 06' E	140	1956	x	x		0,9
Ambérieu	45° 59'	5° 20' E	250	1956	x	x	x	0,8
Angers	47° 30'	0° 35' O	57	1956	x	x	x	0,1
Aulus-les-Bains	42° 47'	1° 19' E	733	1956		x		0,4
Besançon	47° 15'	5° 59' E	307	1956	x	x	x	1,4
Betz	49° 09'	2° 57' E	100	1956		x		2,9
Bourges	47° 04'	2° 22' E	161	1956	x	x	x	0,4
Bourg-Saint-Maurice	45° 37'	6° 46' E	865	1960	x	x	x	0,02
Bremoy	48° 59'	0° 46' O	240	1956		x		1,1
Buzy	43° 07'	0° 29' E	303	1956		x		0
Caen	49° 11'	0° 28' O	64	1956	x	x	x	0,02
Chareil-Cintrat	46° 16'	3° 13' E	280	1956	x			0,2
Château-Chinon	47° 04'	3° 56' E	598	1956		x		0,2
Chaumousey	48° 10'	6° 21' E	357	1956		x		1,8
Chevrières	49° 19'	2° 40' E	31	1956		x		0,9
Clermont-Ferrand	45° 47'	3° 10' E	329	1956	x	x	x	0,05
Colmar	47° 56'	7° 25' E	209	1963	x	x	x	0,9
Cordes-sur-Ciel	44° 04'	1° 57' E	175	1956		x		0,3
Danne et Quatre Vents	48° 46'	7° 18' E	377	1956	x			2,9
Dun-sur-Auron	46° 52'	2° 34' E	160	1956		x		1,9
Ébreuil	46° 07'	3° 05' E	310	1956		x		0,6
Embrun	44° 34'	6° 30' E	871	1956	x	x	x	4,4
Étreux	49° 59'	3° 39' E	141	1956		x		0,8
Faulquemont	49° 03'	6° 35' E	278	1956		x		1,4
Fraize	48° 11'	7° 00' E	515	1956		x		0,2
Isle-et-Bardais	46° 39'	2° 43' E	260	1956		x		0,4
Issanlas	46° 23'	3° 59' E	1220	1956	x			2,6
Kruth	47° 56'	6° 57' E	500	1956		x		1
La Chapelle-Moulière	46° 39'	0° 30' E	121	1956		x		1,4
Lamoura	44° 46'	5° 57' E	1120	1962	x			0
Laneuveville-aux-Bois	48° 36'	6° 38' E	240	1958		x		0,9
Langres	47° 51'	5° 20' E	467	1956	x	x	x	0,5
Le Bourget	48° 58'	2° 26' E	51	1956	x	x	x	0,3
Le Mans	47° 57'	0° 12' E	51	1956	x	x		0,1
Les Orres	44° 30'	6° 33' E	1445	1956		x		0,5
Les Rousses	46° 28'	6° 03' E	1110	1956		x		0,5
Longue-Jumelles	47° 23'	0° 06' O	30	1956		x		2,2
Lorient	47° 46'	3° 21' O	42	1965	x	x	x	0,06
Luxeuil	47° 48'	6° 23' E	271	1956	x	x	x	0,2
Mansigne	47° 44'	0° 08' E	73	1956		x		2,9
Marsac-en-Livradois	45° 28'	3° 43' E	550	1956		x		1,5
Montélimar	44° 35'	4° 44' E	73	1956	x	x	x	0,2
Nancy-Tomblaine	48° 41'	6° 13' E	212	1956	x	x		0
Nestier	43° 03'	2° 91' E	504	1956		x		0,1

Tableau I. (continued).

Nom	Latitude (N)	Longitude	Altitude (m)	Début	T °C	P (mm)	DI (heures)	% DM
Neuville-sur-Ain	46° 05'	5° 22' E	275	1956		x		0,5
Nevers	47° 00'	3° 06' E	175	1956	x	x	x	0,5
Nitting	48° 40'	7° 02' E	270	1956		x		0
Pau	43° 23'	0° 25' O	183	1956	x	x	x	0,03
Poitiers	46° 35'	0° 19' E	117	1956	x	x	x	0,2
Quimperlé	47° 52'	3° 33' O	40	1958		x		1,3
Recey-sur-Ource	47° 46'	4° 51' E	330	1956		x		0,5
Remalard	48° 27'	4° 80' E	160	1956		x		0,8
Rolbing	49° 10'	7° 26' E	275	1956		x		0,04
Saint-Auban	44° 04'	5° 59' E	461	1968	x	x	x	1,5
Saint-Dizier	48° 38'	4° 54' E	138	1962	x	x		0
Sainte-Menehould	49° 06'	4° 59' E	210	1956		x		0
Saint-Etienne-de-Lugdares	44° 39'	3° 57' E	1035	1956		x		0,3
Saint-Girons	43° 00'	1° 07' E	411	1956	x	x	x	1,7
Saint-Laurent-en-Grandvaux	46° 34'	5° 57' E	910	1956		x		1,4
Saint-Quentin	49° 49'	3° 12' E	98	1956	x	x	x	0,04
Strasbourg	48° 33'	7° 38' E	150	1956	x	x	x	0,02
Tarbes	43° 11'	0° 00' E	360	1956	x	x	x	0,09
Toulouse-Blagnac	43° 37'	1° 23' E	151	1956	x	x	x	0,2
Vandenesse	46° 54'	3° 46' E	220	1956		x		1,5
Varennnes-en-Argonne	49° 06'	4° 58' E	180	1960		x		0,4
Vichy	46° 10'	3° 24' E	249	1956	x	x	x	0,4
Vierzon	47° 13'	2° 01' E	98	1956		x		0,8

altitudes des stations s'échelonnent de 30 à 1445 m et 5 stations sont localisées à plus de 1000 m d'altitude. Des données de température (minimale et maximale) et de précipitations journalières sont disponibles pour 33 et 63 sites respectivement (*tableau I*). Pour 20 des 68 stations, les données de durée d'insolation ont également été considérées. Afin de minimiser les biais potentiels dus à un changement de matériel ou de localisation des stations [15, 55], les analyses ont porté sur les périodes récentes, périodes pendant lesquelles le réseau national n'a pas varié. Pour 58 stations, les données journalières existent sur au moins 42 ans, soit la période commune 1956–1997. Le pourcentage de données journalières manquantes varie de 0 à 4,4 % (moyenne = 0,8 %) (*tableau I*) avec une répartition « aléatoire » dans les séries. À partir de ces données journalières, les moyennes mensuelles, annuelles et saisonnières ont été calculées pour chaque paramètre. Pour les saisons, quatre périodes ont été prises en compte. L'hiver a été défini comme la période de décembre de l'année $n-1$ à janvier et février de l'année n (DJF) ; le printemps intègre les mois de mars à mai (MAM) ; l'été

les mois de juin à août (JJA) et l'automne la période de septembre à novembre (SON). Le réchauffement régional a été considéré à travers la température minimale (T_{\min}), maximale (T_{\max}) et moyenne ($T_{\text{moy}} = (T_{\min} + T_{\max}) / 2$). Le nombre de jours de gelées ($T_{\min} < 0$ °C) a également été calculé sur l'année et pour le mois de mai, mois particulièrement important pour le débourrement des arbres [3]. Le nombre de jours avec une température journalière moyenne supérieure à 5 °C a été calculé afin de rendre compte d'une éventuelle tendance dans la longueur de la saison de végétation [32, 54]. Outre les sommes des précipitations, le nombre de jours sans pluie (NJS) a été pris en compte. Enfin, les durées totales mensuelles, annuelles et saisonnières d'insolation ont également été calculées ($n = 20$ stations pour la période commune 1956–97). En effet, un changement important de ce paramètre aurait des répercussions notables sur l'évapotranspiration potentielle [31].

Les dérives ont été étudiées par des régressions linéaires sur les nuages de points (test- t pour la signification statistique) sur la période 1956–97. La pente des

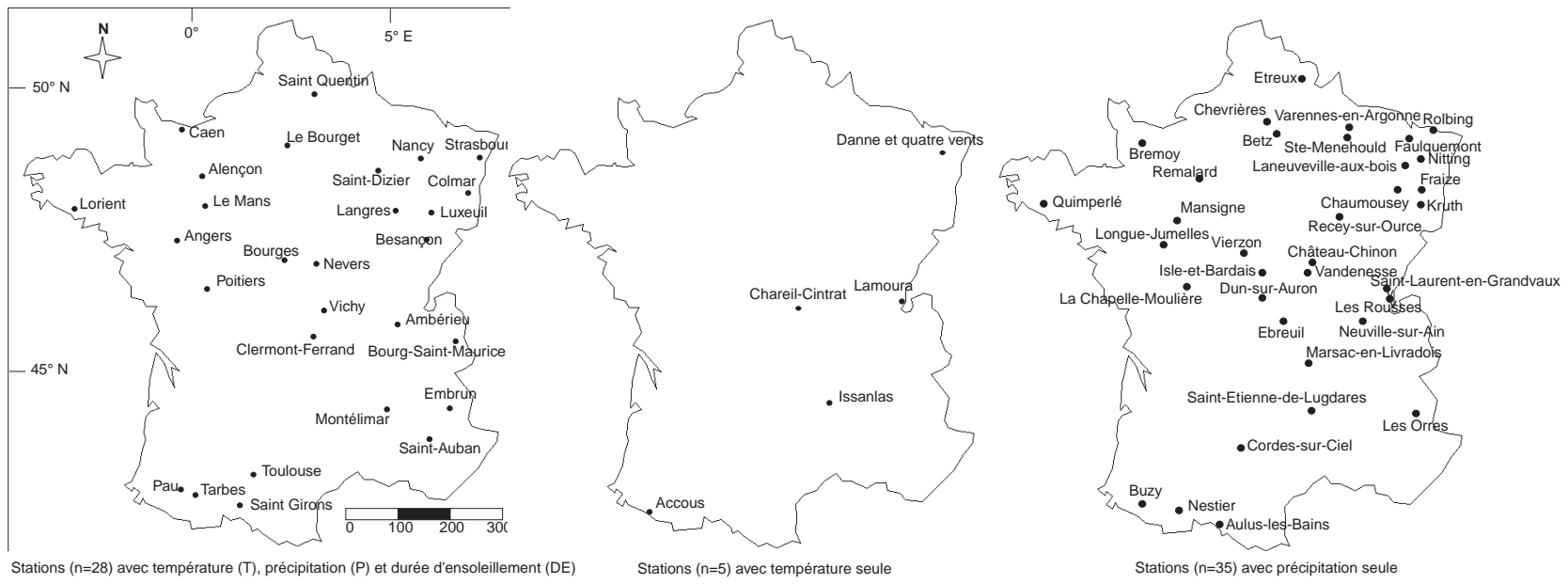


Figure 1. Localisation géographique des 68 stations étudiées du réseau National Météo-France selon les données disponibles à chaque observatoire. Les caractéristiques des séries sont présentées dans le *tableau I*.

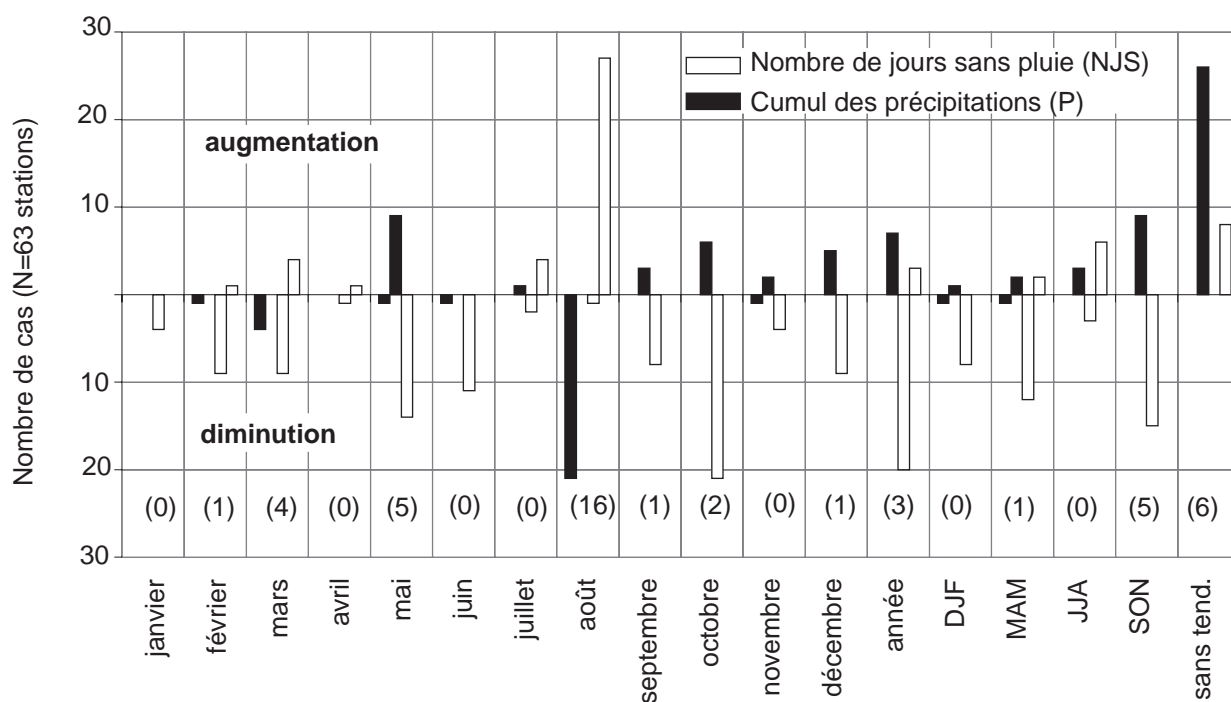


Figure 2. Fréquence de variations mensuelles et saisonnières des cumuls des précipitations (P) et du nombre de jours sans pluie (NJS) pour les 63 stations étudiées. Seules les tendances significatives aux seuils de 5 % et 10 % ont été prises en compte (période 1956-1997). DJF = Décembre année $n-1$ à janvier et février année n ; MAM = mars-avril-mai; JJA = juin-juillet-août; SON = septembre-octobre-novembre. Le chiffre entre parenthèses correspond au nombre de stations présentant à la fois une variation de P et NJS pour le mois ou la période considérés. La colonne « sans tend. » correspond aux stations pour lesquelles aucune dérive n'a été observée.

paramètres de ces ajustements indique le sens (diminution ou augmentation) et l'amplitude des changements sur un pas de temps donné.

3. RÉSULTATS

3.1. Variations des précipitations

3.1.1. Les totaux

Au niveau mensuel, les dérives les plus importantes apparaissent en mai et août (figure 2). Sur la période 1956-1997, les précipitations du mois de mai ont augmenté significativement pour 9 des 63 stations (+6,2 à +12,9 mm par décennie; moyenne = +10,4 mm par décennie) et diminué pour une station. Pour le mois d'août, une diminution est observée pour 21 stations (-8,4 à -23 mm par décennie; moyenne = -12,7 mm par décennie) principalement localisées dans le grand quart

nord-est de la France (figure 3). Pour cette région, 12 des 17 stations disponibles présentent une tendance négative en août. Pour les autres mois, les tendances sont moins fortes et moins uniformes. Une augmentation des pluies annuelles est observable sur 7 stations avec une amplitude variant de +24 à +78 mm par décennie. L'analyse saisonnière ne révèle aucune tendance générale dans les cumuls de pluie (tableau II). Le changement le plus notable est une augmentation des pluies en automne pour 9 des 63 stations (5,3 à 10,2 mm par décennie). Enfin, 26 des 63 stations ne présentent aucune dérive pour aucun des mois ou aucune des saisons considérés (figure 2).

3.1.2. Le nombre de jours sans pluie

Le nombre de stations présentant une dérive du nombre de jours sans pluie est nettement supérieur à celui présentant une dérive du total pluviométrique (tableau II et figure 3). D'une façon générale, la tendance est à la diminution, c'est-à-dire qu'il pleut plus souvent. Par exemple, pour le mois de mars, 4 stations présentent une

Tableau II. Variations saisonnières des cumuls des précipitations (P) et du nombre de jours sans pluie (NJS) pour les 37 stations des 63 stations étudiées du réseau national de Météo-France présentant une dérive. Seules les tendances significatives aux seuils de 5 % et 10 % (valeurs entre parenthèses) sont présentées. Pour chaque station, la dernière année est 1997. Les valeurs correspondent aux pentes (en mm et nombre de jours par décennie) des ajustements linéaires des nuages des points sur la période 1956-1997 (sauf pour 8 stations périodes plus courtes). Un signe – indique une diminution. DJF = Décembre année $n-1$ à janvier et février année n ; MAM = mars-avril-mai ; JJA = juin-juillet-août ; SON = septembre-octobre-novembre. Les données ont été triées par ordre décroissant de la variation annuelle du NJS.

Station	Altitude (m)	Début	DJF		MAM		JJA		SON		Année	
			P	NJS	P	NJS	P	NJS	P	NJS	P	NJS
Varennes-en-Argonne	180	1960		-7		-7		-6		-7		-27
Chaumousey	357	1956		-3		-4		-3	7,4	-5		-16
Fraize	515	1956		-4		-4		-2	9,4	-6	53,6	-16
Longue-Jumelles	30	1956		-5		-3				-5		-15
Recey-sur-Ource	330	1956		-3		-2			6,7	-4	48	-12
Dun-sur-Auron	160	1956		-3		-3				-3		-12
Vierzon	98	1956								-4		-10
Rolbing	275	1956				-3			(4,7)	-4		-10
Cordes-sur-Ciel	175	1956		-2		-3				-3		-9
Etreux	171	1956		(-2)	4,1					-3		-8
Sainte-Menehould	210	1956				-2				-3		-8
Bremoy	240	1956										-7
Chevrières	31	1956				-2	-4,6			(-2)		-7
Marsac-en-Livradois	550	1956				-3						-7
Quimperlé	40	1958										-7
Kruth	500	1956				(-2)						-6
Buzy	303	1956										-5
Betz	100	1956										(-5)
Vandenesse	220	1956							7,4	-4	48,4	-4
Les Orres	1445	1956										-4
Angers	57	1956									30,2	
Colmar	220	1963				3	-5,3					
Faulquemont	278	1956								-2		
Isle-et-Bardais	260	1956						2				
Laneuveville-aux-Bois	240	1958	8,3						10,2		78	
Langres	467	1956						2				
Le Bourget	51	1956				3,9						
Le Mans	51	1956						3				
Les Rousses	1100	1956						2				
Luxeuil	271	1956							(5,8)			
Nitting	270	1956							8,8		50,4	
Saint-Girons	411	1956					(-6,4)					
Strasbourg	150	1956							5,3		(24,3)	
Vichy	249	1956								-2		
Nestier	504	1956						2				4
Poitiers	117	1956						2				6
Saint-Auban	461	1968	(-9,2)		-8,7	4						6
Nbre de cas :			2	8	3	14	3	9	9	15	7	23
Fréq ($n = 63$) :			0,03	0,13	0,05	0,22	0,05	0,14	0,14	0,24	0,11	0,37

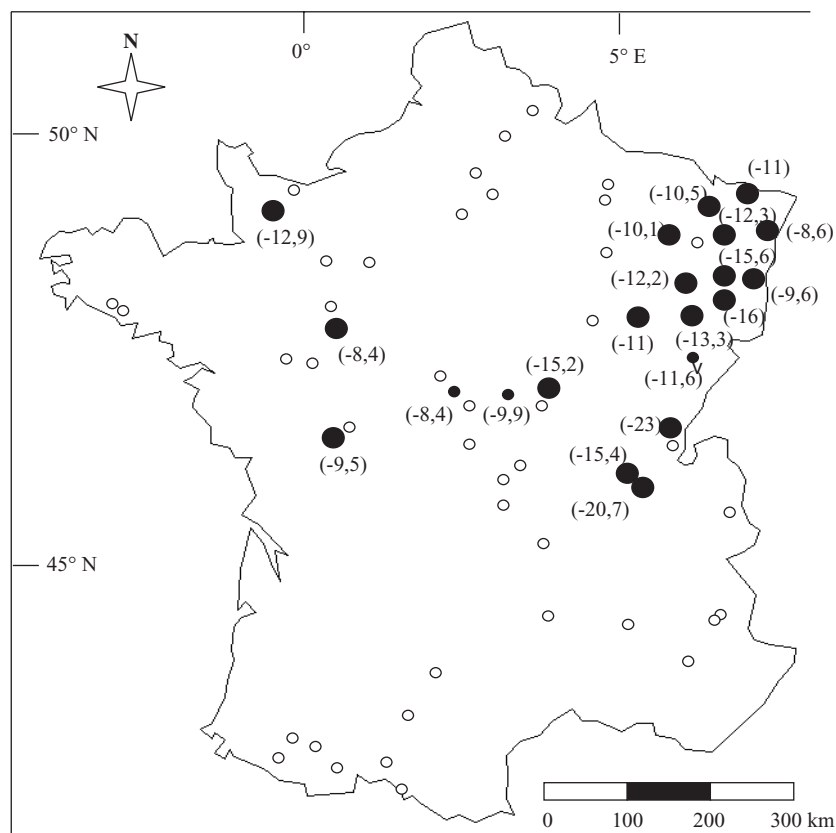


Figure 3. Localisation géographique des 21 stations (ronds noirs) présentant une dérive négative des précipitations au mois d'août. Les grands ronds noirs indiquent une tendance significative au seuil de 5 % (10 % sinon). Les valeurs entre parenthèses correspondent aux pentes (en mm par décennie) des ajustements linéaires (période 1956-1997). La diminution varie de 8,4 à 23 mm par décennie. Les noms et les caractéristiques de chaque site sont présentés dans le *tableau I*.

diminution du total des pluies alors qu'une variation du nombre de jours sans pluie est observée pour 13 stations (9 cas de diminution) (*figure 2*). De la même façon, 1 station se caractérise par une diminution des pluies au mois de juin et 11 par une diminution du nombre de jours sans pluie. La même constatation peut être faite sur le mois d'octobre avec 6 cas d'augmentation des pluies et 21 cas de diminution du nombre de jours sans pluie (pluies plus fréquentes). Au niveau saisonnier, les diminutions les plus notables apparaissent au printemps (12 cas) et en automne (15 cas) (*figure 2*). Sur l'année, 20 stations présentent une diminution du nombre de jours sans pluie variant de 4 à 15 jours par décennie et 3 une augmentation (*tableau II* et *figure 4*).

On constate également que, dans la grande majorité des cas, il n'apparaît pas de relation systématique entre l'évolution du nombre de jours sans pluie et celle des totaux pluviométriques, ce qui peut suggérer un changement du régime pluviométrique. Pour le mois d'octobre, parmi les 6 augmentations de pluies observées, seuls 2 cas présentent également une diminution du nombre de

jours sans pluie ; le nombre de jours sans pluie ayant diminué significativement dans 21 cas (*figure 2*). Les mêmes observations peuvent être faites pour les mois de mars et de mai. Pour le mois d'août, les différences sont moindres et, parmi les 33 stations présentant des dérives significatives des paramètres pluviométriques, 16 présentent à la fois une diminution des pluies et une augmentation du nombre de jours sans pluie. Au niveau annuel, pour seulement 3 des 20 stations (Recey-sur-Ource, Vandenesse, Fraize), la diminution du nombre de jours sans pluie correspond à une augmentation significative des pluies annuelles sur les périodes correspondantes (*tableau II* et *figure 2*). Pour l'automne, cette diminution correspond à une augmentation des pluies pour seulement 5 des 15 cas (*figure 2*). L'absence de variation du total des pluies malgré un nombre de jours sans pluie moins important suggère une diminution de l'intensité des pluies les jours où il pleut. Inversement, l'absence de variation du total des pluies malgré un nombre de jours sans pluie plus important suggère une augmentation de l'intensité des pluies les jours où il pleut.

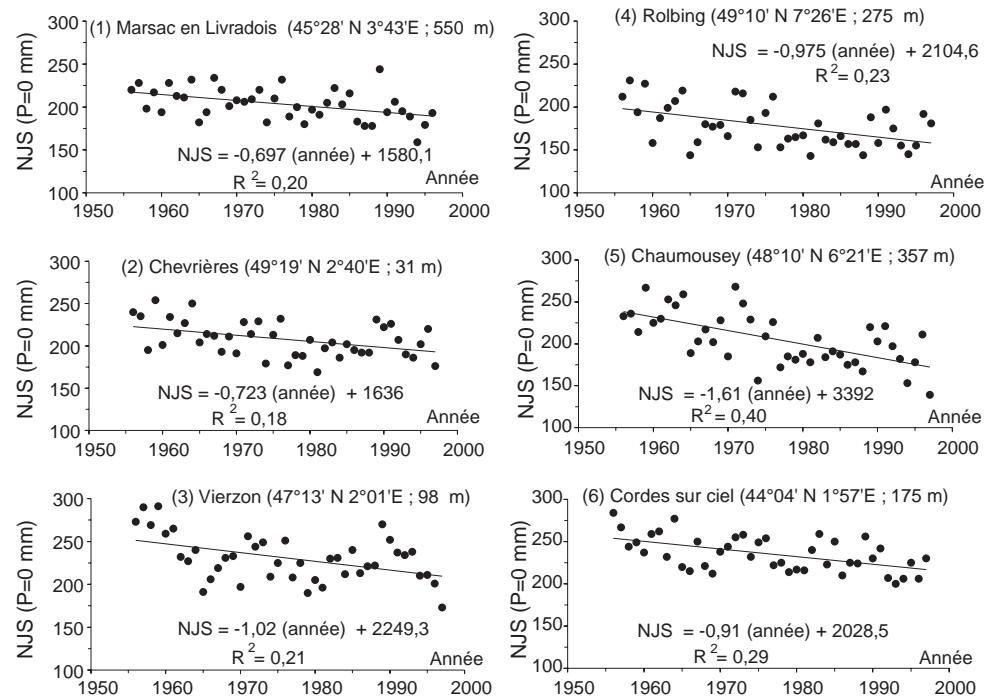
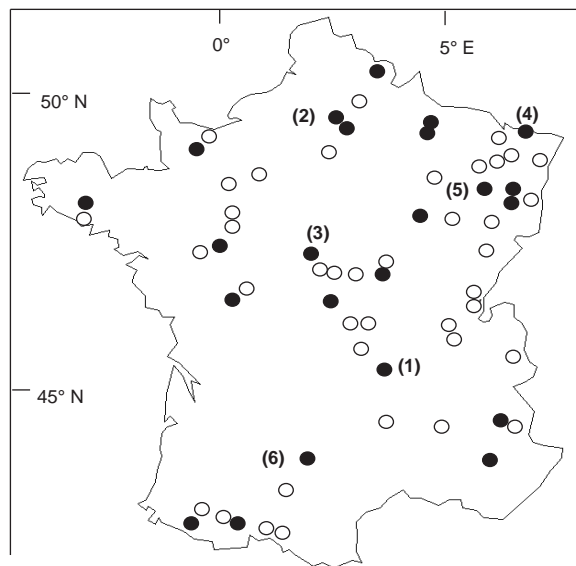


Figure 4. Évolution du nombre annuel de jours sans pluie (NJS) sur la période 1956–1997 pour 6 des 23 stations présentant une variation significative (ronds noirs).

Enfin, parmi les 63 stations étudiées, 6 ne présentent aucune variation pour aucun des mois considéré et aucun des paramètres.

3.2. Variations des températures

3.2.1. Températures moyennes, minimales et maximales

Pour l'année, un réchauffement est observable dans plus de 90 % des cas avec une augmentation comparable des températures diurne (T_{\max}) et nocturne (T_{\min}) de l'ordre de +1,2 °C sur la période 1956–1997 (0,29 °C par décennie). L'amplitude thermique annuelle a augmenté dans 6 cas et diminué pour 6 stations (*tableau III* et *figure 5*). Il n'apparaît pas de liaison évidente entre le réchauffement et l'altitude de la station.

Au niveau saisonnier, la tendance est presque généralisée en été avec un réchauffement légèrement plus fort pendant la journée (+1,8 °C pour T_{\max} ; 0,44 °C par décennie) qu'en fin de nuit (+1,6 °C pour T_{\min} ; 0,38 °C par décennie) (*tableau III*). Pour la période estivale, la température moyenne a ainsi augmenté de 1,7 °C depuis 42 ans. La tendance est particulièrement marquée au mois d'août (+2,2 °C pour la T_{moy}). Les changements pendant l'hiver et le printemps sont moins fréquents et concernent essentiellement un réchauffement nocturne : augmentation de la T_{\min} pour 1 station sur 2 et seulement 1 sur 4 pour la T_{\max} (*tableau III*). Bien que moins fréquentes, les tendances sont néanmoins très marquées en hiver (+1,9 °C et +2,0 °C pour T_{\min} et T_{\max}). Elles sont plus faibles au printemps (+1,2 °C et +1,8 °C). Pour l'automne, seule 1 station sur 3 présente un réchauffement avec une amplitude plus faible de +1,3 °C et +1,0 °C pour respectivement T_{\min} et T_{moy} ; la T_{\max} variant très peu (5 cas sur 32 stations).

Concernant l'amplitude thermique, les variations sont peu fréquentes. En hiver et au printemps, la tendance est à la diminution dans 6 et 5 cas et à l'augmentation dans 1 et 3 cas respectivement. En été et au printemps, l'amplitude a augmenté dans 6 et 3 cas et diminué dans 2 et 3 cas respectivement.

Concernant la température moyenne, parmi les 33 stations analysées, 5 présentent un réchauffement pour toutes les saisons, 8, pour 3 saisons, 7, pour 2 saisons, 12, pour une saison (JJA) et 1, aucune tendance (Nevers).

3.2.2. Les gelées

Pour le mois de mai, aucune dérive du nombre et de la fréquence des jours de gelées ($T_{\min} < 0$ °C) n'a été observée pour les 32 stations analysées. Sur l'année, le nombre des jours de gelées a diminué pour 14 stations (*tableau IV*). En comparant la période 1956–1965 à la période récente 1990–1997, la diminution varie de 9 jours à Accous à 20 jours à Saint-Dizier.

3.2.3. Nombre de jours avec $T_{\text{moy}} > 5$ °C

Aucune tendance significative n'est observée pour les mois considérés isolément. En revanche, pour la période automnale et hivernale (cumul du nombre de jours pour les mois de novembre et décembre de l'année $n-1$ et des mois de janvier, février, mars de l'année n), le nombre de jours avec une $T_{\text{moy}} > 5$ °C a augmenté pour 17 des 33 stations analysées. Entre 1956 et 1997, les augmentations varient de 14 à 31 jours pour une moyenne de 19 jours (*figure 6*). Pour la période janvier à mars, les tendances sont significatives pour seulement 10 des 33 stations avec des augmentations variant de 10 à 19 jours pour une moyenne estimée à 14 jours entre 1956 et 1997.

3.3. Variations de la durée d'insolation

Sur la période 1956–97, 16 des 20 stations analysées présentent une dérive pour un des mois ou une des périodes considérés. Au niveau mensuel, les variations les plus fréquentes concernent les mois de juin (diminution de la durée d'insolation dans 6 cas sur 20), d'août (augmentation dans 7 cas) et novembre (augmentation dans 7 cas) (*figure 7*). Les diminutions en juin varient de 8 à 16 heures par décennie (moyenne = -13 heures par décennie). Pour les augmentations, les amplitudes sont respectivement de 9 à 14 heures par décennie (moyenne = 10 heures) et 6 à 9 heures par décennie (moyenne = 8 heures) pour août et novembre. Aucune dérive n'a été observée pour les mois de février, avril et septembre.

L'analyse saisonnière révèle une variation de la durée d'insolation pour seulement 8 stations ; stations localisées essentiellement dans le sud de la France (*figure 7*). Pour 4 des 6 stations, la durée d'insolation a diminué en été et pour 2 stations, l'ensoleillement a augmenté en hiver.

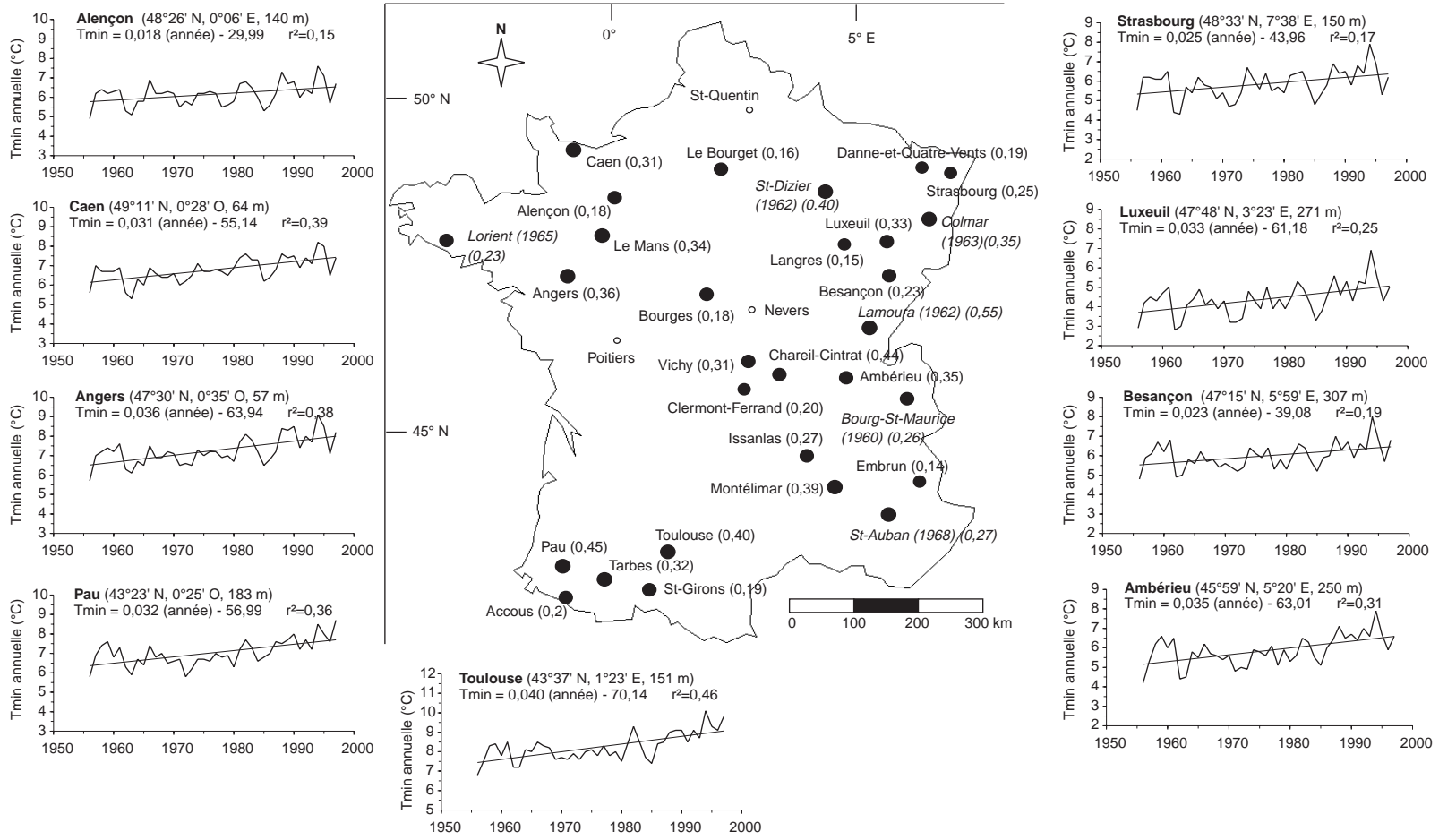


Figure 5. Évolution de la température minimale annuelle (T_{\min}) sur la période 1956–1997 pour 9 stations. Les ronds noirs indiquent des tendances significatives au seuil de 5 %. Les stations en italiques correspondent à des périodes d'analyse plus courtes (première date prise en compte entre parenthèses). Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pentes des ajustements linéaires des nuages des points (en °C par décennie).

Tableau III. Tendances annuelles et saisonnières (°C par décennie ; période 1956–1997) pour la température moyenne (T_{moy}), minimale (T_{min}), maximale (T_{max}), et l'amplitude thermique (AT) pour les 33 stations étudiées. Seules les tendances significatives aux seuils de 5 % et 10 % (valeurs en italiques) sont présentées. Pour chaque station, la dernière année est 1997. Pour Tomblaine, seules les températures moyennes journalières sont disponibles. Les données ont été triées par ordre décroissant de la tendance de la T_{moy} au niveau annuel.

Station	Altitude (m)	Début	T_{moy}					T_{min}					T_{max}					AT ($T_{\text{max}}-T_{\text{min}}$)				
			D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année
Lamoura	1120	1962	1,00	0,54	0,57	0,47	0,64	1,00	0,51	0,44	0,34	0,55	1,00	0,56	0,71	0,61	0,70					
Bourg-St-Maurice	865	1960	0,58	0,38	0,47		0,39	0,44		0,31		0,26	0,72	0,56	0,64		0,54	0,29	0,37	0,33	0,28	
Toulouse	151	1956	0,42	0,22	0,5	0,31	0,38	0,47	0,21	0,52	0,34	0,4	0,38	0,23	0,48	0,28	0,35					
St-Dizier	138	1962	0,50	0,33	0,46		0,36	0,57	0,31	0,47		0,40		0,35	0,45		0,31					
Pau	183	1956	0,36	0,26	0,42	0,34	0,35	0,42	0,37	0,55	0,42	0,45	0,29		0,30	0,27	0,26	-0,23	-0,26		-0,19	
Tarbes	360	1956	0,32	0,23	0,44	0,32	0,33	0,29	0,20	0,44	0,29	0,32	0,35		0,44	0,35	0,37					
Colmar	220	1963		0,32	0,41		0,32		0,31	0,42		0,35		0,33	0,40		0,29					
Luxeuil	271	1956		0,24	0,5		0,32		0,26	0,41		0,33			0,62		0,30					
Montélimar	73	1956	0,33		0,44	0,23	0,31	0,43	0,22	0,52	0,37	0,39		0,36		0,21	-0,20		-0,19	-0,29	-0,18	
Le Mans	51	1956		0,21	0,52	0,17	0,30		0,29	0,52	0,20	0,34		0,51		0,24	-0,16					
Angers	57	1956	0,25	0,21	0,5	0,19	0,30	0,34	0,29	0,52	0,24	0,36		0,47		0,24	-0,15	-0,24			-0,14	
Lorient	42	1965		0,44	0,42	0,24	0,30		0,35	0,34		0,23		0,52	0,49		0,36					
Chareil-Cintrat	280	1956	0,43		0,34	0,24	0,29	0,62	0,29	0,44	0,38	0,44					-0,39	-0,35		-0,28	-0,29	
Tomblaine*	212	1956			0,44		0,28															
Ambérieu	250	1956			0,37		0,27	0,48	0,26	0,38		0,35		0,33		0,20	-0,21	-0,38			-0,17	
Danne-et-Quatre-Vents	377	1956		0,23	0,47		0,27			0,29		0,19		0,34	0,64	0,37			0,32	0,18	0,16	
Vichy	249	1956			0,39		0,26	0,43	0,24	0,39		0,31		0,39		0,21	-0,22					
Caen	64	1956		0,20	0,35	0,17	0,25	0,32	0,29	0,41	0,19	0,31		0,29		0,19	-0,28				-0,16	
St-Girons	411	1956			0,36	0,19	0,25			0,32		0,19	0,29	0,41		0,32				0,45		
Accous	495	1956	0,30		0,32	0,22	0,24	0,27		0,37		0,2	0,38	0,26	0,26	0,27						
Issanlas	1220	1956	0,33		0,35		0,24	0,35		0,34		0,27		0,36		0,23						
St-Auban	461	1968		0,37	0,39		0,24		0,30	0,44	0,32	0,27		0,44		0,26					-0,47	
Strasbourg	150	1956			0,34		0,23	0,39		0,29		0,25		0,39		0,21						
Besançon	307	1956			0,42		0,22			0,34		0,23		0,47		0,23						

Station	Alti- tude (m)	Début	T_{moy}					T_{min}					T_{max}					AT ($T_{\text{max}} - T_{\text{min}}$)				
			D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année	D-J-F	M-A-M	J-J-A	S-O-N	Année
Lamoura	1120	1962	1,00	0,54	0,57	0,47	0,64	1,00	0,51	0,44	0,34	0,55	1,00	0,56	0,71	0,61	0,70					
Clermont- Ferrand	329	1956			0,33		0,22			0,28		0,2			0,39				0,27			
Embrun	871	1956	0,41		0,28		0,22	0,32		0,22		0,14	0,49		0,33		0,30		0,23		0,16	
Le Bourget	51	1956			0,36		0,21			0,24		0,16			0,47		0,25					
Langres	467	1956			0,43		0,21			0,27		0,15			0,58		0,28		0,30		0,13	
Bourges	61	1956			0,36		0,2			0,31		0,18			0,42		0,19					
Alençon	140	1956			0,35		0,16			0,33		0,18			0,39							
Nevers	175	1956																				
Poitiers	117	1956			0,27									0,42		0,24			0,31	0,29	0,22	
St-Quentin	98	1956			0,22									0,39		0,18		0,17	0,33		0,18	
Nombre de cas :			12	14	32	12	30	16	16	29	10	29	8	8	29	5	28	7	8	8	6	12
Fréq. (N = 32) :			0,36	0,42	0,97	0,36	0,91	0,50	0,50	0,91	0,31	0,91	0,25	0,25	0,91	0,16	0,88	0,22	0,25	0,25	0,19	0,38
(N = 33 pour T_{moy})																						
Moyenne (°C par décennie) :			0,44	0,30	0,40	0,26	0,29	0,45	0,29	0,38	0,31	0,29	0,49	0,42	0,44	0,35	0,29	-0,15	-0,09	0,18	-0,02	0,00
Ecart-type :			0,20	0,10	0,08	0,09	0,09	0,18	0,07	0,09	0,08	0,10	0,25	0,12	0,11	0,15	0,11	0,21	0,30	0,25	0,37	0,20
Min :			0,25	0,20	0,22	0,17	0,16	0,27	0,20	0,22	0,19	0,14	0,29	0,23	0,26	0,26	0,18	-0,39	-0,38	-0,26	-0,47	-0,29
Max :			1,00	0,54	0,57	0,47	0,64	1,00	0,51	0,55	0,42	0,55	1,00	0,56	0,71	0,61	0,70	0,29	0,37	0,33	0,45	0,28

Tableau IV. Nombre moyen de jours de gelées ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sur l'année pour les 14 stations présentant une diminution significative (au seuil de 5 %) sur la période 1956–1997. La valeur entre parenthèses correspond à l'écart-type. Les données ont été triées par ordre décroissant de la variation.

Station	Période				Variation (1) – (2)
	1956–1965 (1)	1966–1975	1976–1985	1986–1997 (2)	
St-Dizier	78 (14,7)	65 (15,8)	66 (12,2)	58 (14,9)	–20 jours
Pau	49 (13,2)	38 (10)	34 (13)	30 (9,9)	–19 jours
Colmar	91 (7,0)	85 (17,8)	74 (11,6)	74 (16,2)	–17 jours
Tarbes	51 (13,4)	49 (14,7)	45 (10,1)	34 (9,1)	–17 jours
Luxeuil	98 (13,7)	98 (20,0)	94 (11,0)	82 (13,4)	–16 jours
Le Mans	60 (13,2)	50 (12,9)	52 (11,7)	45 (11,5)	–15 jours
Angers	46 (14,2)	43 (13,8)	39 (11,4)	32 (11,7)	–14 jours
Caen	45 (15,2)	34 (12,3)	33 (8,9)	31 (11,2)	–14 jours
Montélimar	38 (11,2)	37 (14,2)	32 (9,1)	24 (8,1)	–14 jours
Issanlas	139 (15,1)	145 (10,5)	139 (13,4)	126 (13,3)	–13 jours
Toulouse	42 (10,5)	35 (12,7)	35 (12,2)	29 (7,5)	–13 jours
Ambérieu	78 (12,8)	82 (15,9)	78 (11,8)	67 (10,8)	–11 jours
Bourg-St-Maurice	113 (13,7)	118 (14,5)	122 (13,4)	103 (12,9)	–10 jours
Accous	51 (17,8)	70 (16,9)	46 (16,1)	42 (11,9)	–9 jours

3.4. Analyse couplée des différents paramètres

L'analyse des dérives pour les 20 stations disposant à la fois des données thermiques, pluviométriques et d'insolation sur la période 1956–1997 montre que les réchauffements estival et annuel ne s'accompagnent pas de dérives systématiques des durées d'insolation ou du régime pluviométrique (tableau V). Ainsi, seule la station de St Girons présente à la fois un réchauffement et une diminution des précipitations estivales. Concernant l'insolation, le réchauffement estival s'accompagne d'une augmentation de la durée d'insolation pour 1 cas (Ambérieu) et d'une diminution pour 4 stations (Embrun, Montélimar, Pau, Toulouse). Au niveau annuel, le réchauffement s'accompagne d'une diminution de la durée d'insolation pour 3 cas (Caen, Embrun et Montélimar) et d'une augmentation dans 1 cas (Ambérieu).

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

Depuis 42 ans, le réchauffement a été particulièrement notable en moyenne annuelle. Les tendances sont

plus modulées au niveau des mois et des saisons. Les variations les plus fréquentes se sont opérées durant les heures nocturnes (température minimale). La température maximale varie moins fréquemment mais l'ampleur des changements est plus fort. La tendance est généralisée en été (maximale en août) et moins fréquente en hiver et au printemps. En revanche, les conditions thermiques de l'automne ont peu changé. Pour l'année, la tendance est une augmentation des températures diurne et nocturne de l'ordre de $+1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces observations sont cohérentes avec le réchauffement global bien que le signal régional apparaisse amplifié par rapport aux moyennes mondiales. Ce réchauffement a entraîné des réductions du nombre de jours de gelées annuelles (14 cas), une augmentation notable du nombre de jours « chauds » ($T_{\text{moy}} > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en automne et en hiver (22 cas), mais aucune modification dans la fréquence des gelées tardives du mois de mai. Globalement, la tendance est donc vers une diminution des épisodes les plus froids. Contrairement aux températures, les précipitations et la durée d'insolation ont moins varié et aucune tendance générale n'est observable. Pour les stations où elle varie (essentiellement dans le Sud de la France), la durée d'insolation tend à diminuer au printemps et à augmenter en été (août) et au début de l'hiver (novembre). Sur l'année,

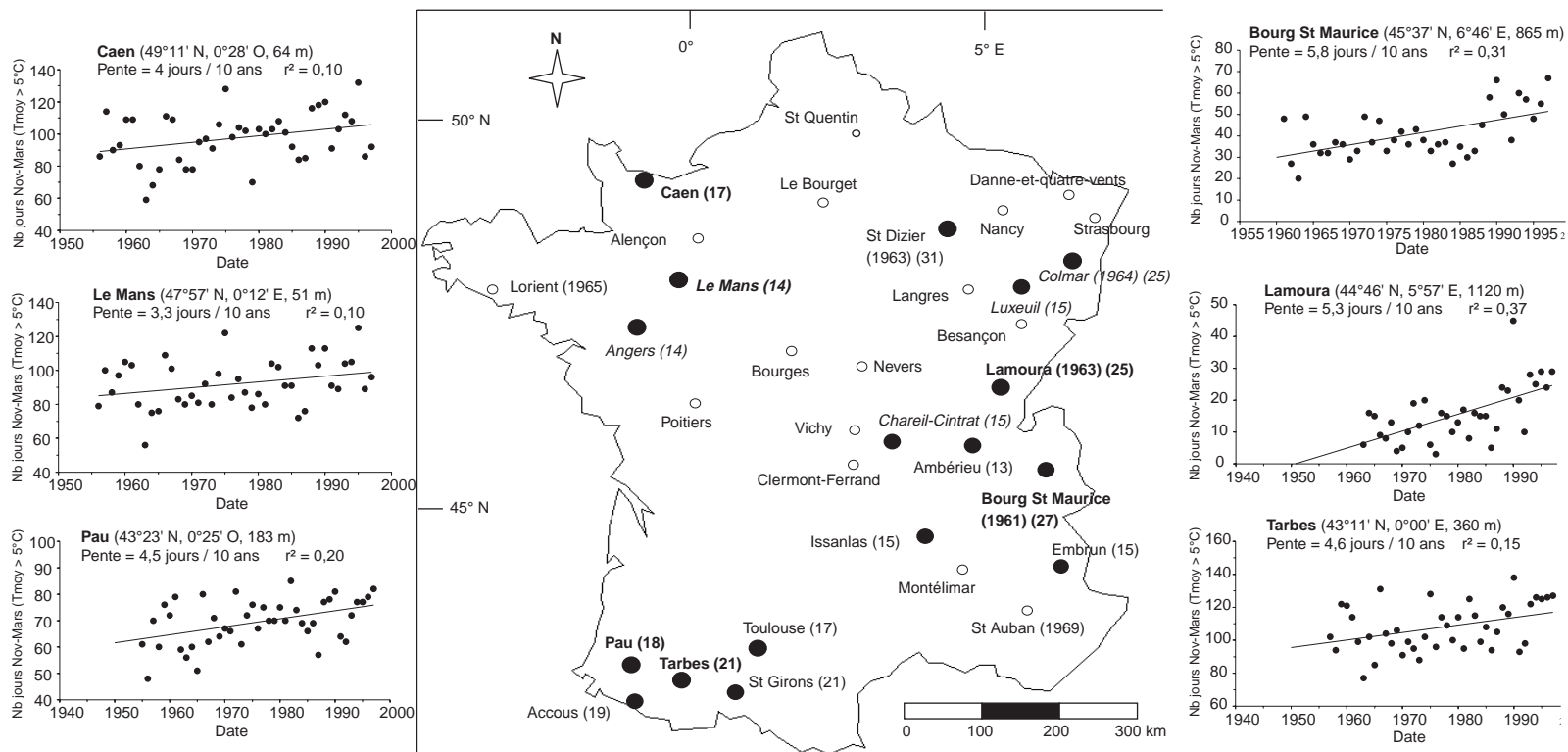


Figure 6. Évolution du nombre total de jours avec une $T_{\text{moy}} > 5^{\circ}\text{C}$ pour les mois de novembre et décembre de l'année $n-1$ au mois de janvier, février et mars de l'année n . (Nov.-Mars). Les ronds noirs indiquent des tendances significatives au seuil de 5 % et 10 % (en italiques). Pour les périodes d'analyse plus courtes, la première date prise en compte est signalée entre parenthèses. Les chiffres entre parenthèses indiquent les augmentations estimées entre 1956 et 1997 à partir des équations des ajustements linéaires des nuages des points (différence entre le cumul de 1956 et le cumul de 1997).

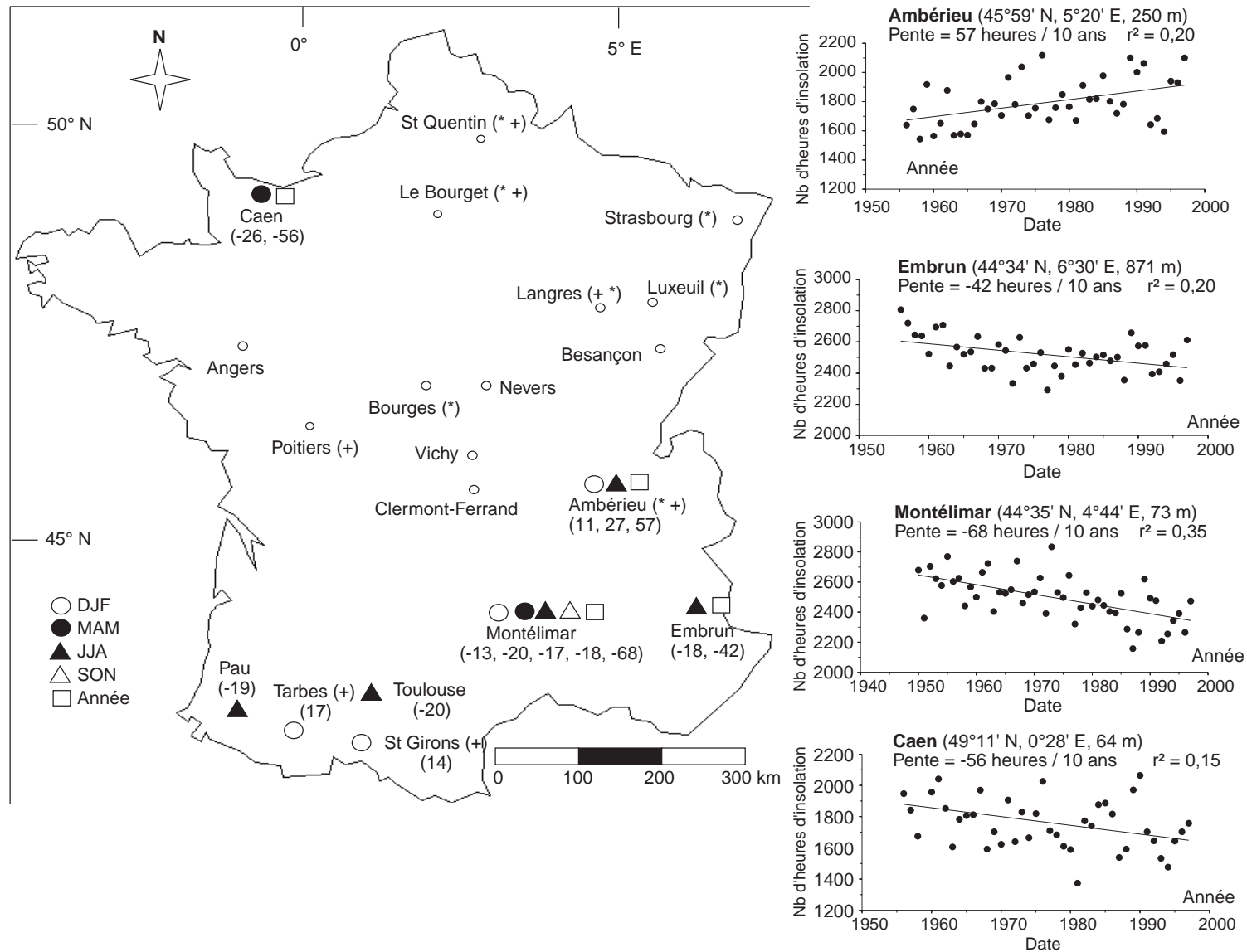


Figure 7. Évolution saisonnière des durées d'insolation sur la période 1956-1997. Les petits ronds blancs indiquent des tendances saisonnières non significatives au seuil de 5 %. Les autres symboles (ronds, triangles et carré) indiquent des dérives significatives. Un astérisque (*) et un signe plus (+) indiquent des dérives positives significatives au mois de juin et novembre. DJF = cumul de décembre de l'année $n-1$ à janvier-février de l'année n ; MAM = mars-avril-mai ; JJA = juin-juillet-août ; SON = septembre-octobre-novembre. Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pentes des ajustements linéaires des nuages des points pour les dérives saisonnières (en heures par 10 ans ; le signe - indique une diminution).

la tendance est à la diminution. Ces observations sont cohérentes avec celles effectuées en Allemagne [66], en République Tchèque [63] et en Suisse [10]. Pour les pluies, les changements les plus notables concernent davantage le régime des précipitations que les cumuls mensuels. Ainsi, le nombre de jours sans pluie tend à diminuer au printemps (particulièrement en mai) et en début d'automne (octobre) (il pleut donc plus souvent) et à augmenter en été (août). Cette diminution du nombre de jours sans pluie est cohérente avec les observations de Karl et al. [42] aux États-Unis. Depuis 1970, ces auteurs ont estimé une augmentation de 2 % par an des jours de pluie par rapport au début du siècle. Bien qu'il n'apparaisse pas de liaison systématique entre la variation des totaux pluviométriques et celle du régime des précipitations, la tendance est inverse pour les cumuls. Ainsi, quand ils varient, les totaux pluviométriques tendent à augmenter au printemps (mai), à diminuer en été (diminution importante en août pour le quart nord-est de la France) et à augmenter sur l'année.

D'un point de vue méthodologique, les régressions linéaires prennent en compte essentiellement les valeurs au début et à la fin des séries correspondantes. Ainsi, les tendances observées dépendent de la longueur de l'intervalle de temps utilisé pour le calcul [16]. La confirmation de ces tendances à l'échelle du siècle nécessiterait de prendre en compte des séries plus longues mais plus rares et moins homogènes au niveau de l'équipement de mesure [38, 55] et de localisation des stations [53]. Dans son étude sur les températures en France, Betout [11] a résumé l'historique de 14 stations entre 1921 et 1974. Par exemple, pour Strasbourg, la station a changé de place 6 fois (5 fois un déplacement inférieur à 500 m), les types d'abri et de thermomètre ayant changé respectivement 4 et 5 fois. Pour cette station, la plus longue période sans déménagement a été de 16 ans. Pour Toulouse, elle a été de 29 ans avec 3 déplacements dont 2 supérieurs à 500 m. Le type d'abri et de thermomètre ayant changé 2 et 1 fois respectivement. Les mêmes observations peuvent être faites pour Pau, Clermont-Ferrand et Besançon. Les changements ayant eu lieu essentiellement avant les années 1950, l'analyse sur la période plus récente 1956–1997 minimise donc en partie ces biais dans les séries. Il est cependant intéressant de noter que, dans cette même étude ; Betout [11] mentionnait déjà un réchauffement significatif au mois d'août. Concernant le régime des pluies, on ne peut pas exclure totalement l'effet d'une amélioration de la sensibilité des pluviomètres (mesures des pluies faibles de 0,1 à 0,2 mm) pour expliquer la diminution du nombre de jours sans pluie.

L'urbanisation intense autour des stations (effet île thermique urbaine) [39, 48] est un biais également souvent invoqué. Selon les villes et les périodes étudiées, l'effet de l'urbanisation sur le réchauffement annuel a été estimé entre 0,1 et 0,3 °C par décennie [4, 12, 14, 33, 47, 48, 65]. Au niveau mondial, en excluant des 5 400 stations analysées, les 1 300 stations urbaines (postes localisés à proximité d'une ville d'au moins 50 000 habitants), Easterling et al. [29] ont mis en évidence une tendance plus faible de l'ordre de 0,1 °C par 100 ans (0,82 contre 0,88 °C par 100 ans pour T_{\max} et 1,79 contre 1,86 °C par 100 ans pour T_{\min} ; période 1950–1993). Ainsi, bien qu'il serait irréaliste d'attribuer entièrement les tendances observées aux seuls effets de l'urbanisation, une partie du réchauffement récent pourrait être attribuée, pour les stations localisées à proximité d'une ville, à des modifications locales de l'environnement.

Outre ces aspects locaux, la part des fluctuations naturelles du climat et/ou d'évolutions réelle liée à l'accroissement des émissions d'origine anthropique (gaz à effet de serre (GES), aérosols...) reste à l'heure actuelle très controversée pour expliquer les variations observées. Des travaux récents ont montré que, depuis le milieu des années 1970, l'oscillation nord-Atlantique (North Atlantic Oscillation), qui gouverne le régime des vents d'ouest au-dessus de l'Europe et de l'est de l'océan Atlantique, est plutôt dans un régime de vents forts, de pluies plus abondantes et de températures plus clémentes surtout en hiver (climat sous influence océanique) [34, 35].

Concernant les aérosols, leur impact sur la couverture nuageuse pourrait expliquer la différence entre le réchauffement du jour et de la nuit [23, 57] et la variation de la durée d'insolation [40]. Pour le CO₂ atmosphérique, les simulations réalisées en Europe montrent qu'une augmentation de 1 % par an se traduirait dans les prochaines décennies par un réchauffement de 2 °C (sans effet saisonnier important), par une augmentation de 10 % des pluies en Europe du Nord en hiver et au printemps, par une augmentation de 30 % en Europe du Sud en hiver et une diminution de 20 % en automne. Les modélisations suggèrent également une augmentation de la variabilité des pluies journalières sauf pour le Sud en été [21].

Dans l'hypothèse où elles perdurent, les répercussions à long terme de ces variations sur les ressources en eau [19], le cycle du carbone [61], les écosystèmes forestiers [18, 45, 62] sont encore mal connues. Les augmentations de croissance radiale ou de productivité observées dans différents écosystèmes français aussi bien en montagne [7, 59] qu'en plaine [5, 8, 25] ou encore en région

Tableau V. Évolution saisonnière de différents paramètres climatiques pour les 20 stations disposant à la fois des données pluviométriques, thermiques et d'insolation sur la période 1956–1997. Les chiffres correspondent aux pentes (par 10 ans) des droites des ajustements linéaires des nuages des points. Pour le nombre de jours de gelées, le chiffre indiqué correspond à la différence entre la moyenne 1956–1965 et 1986–1997. Pour le nombre de jours avec $T_{\text{moy}} > 5^{\circ}\text{C}$, le chiffre correspond à la différence entre le cumul estimé de 1956 et le cumul de 1997 (estimation à partir des équations des ajustements linéaires) (cumul de novembre à décembre de l'année $n-1$ à janvier, février et mars de l'année n). Seules les tendances significatives au seuil de 5 % et 10 % (en italiques) ont été prises en compte. Un signe – indique une diminution. DJF = hiver (décembre $n-1$ à janvier-février n) ; MAM = printemps (mars-avril-mai) ; JJA = été (juin-juillet-août) ; SON = automne (septembre-octobre-novembre).

	Ambérieu					Angers					Besançon					Bourges				
	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année
P (mm / 10 ans)										30										
Nb jours sans pluie (par 10 ans)																				
T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$ / 10 ans)			0,37		0,27	0,25	0,21	0,5	0,19	0,3			0,42		0,22				0,36	0,2
Nb de jours avec $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$					–11					–14										
Nb jours avec $T_{\text{moy}} > 5^{\circ}\text{C}$					13					<i>14</i>										
Durée d'insolation (heures / 10 ans)	11		27		58															
	Caen					Clermont-Ferrand					Embrun					Langres				
	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année
P (mm / 10 ans)																				
Nb jours sans pluie (par 10 ans)																			2	
T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$ / 10 ans)		0,20	0,35	<i>0,17</i>	0,25			0,33		0,22	0,41		0,28		0,22			0,43		0,21
Nb de jours avec $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$					–14															
Nb jours $T_{\text{moy}} > 5^{\circ}\text{C}$ (par 10 ans)					17										15					
Durée d'insolation (heures / 10 ans)		–26			–56								–18		–42					
	Le Bourget					Luxeuil					Montélimar					Nevers				
	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année
P (mm / 10 ans)		3,9								5,8										
Nb jours sans pluie (par 10 ans)																				
T_{moy} ($^{\circ}\text{C}$ / 10 ans)			0,36		0,21	0,24	0,51			0,32			0,44	0,23	0,31					
Nb de jours avec $T_{\text{min}} < 0^{\circ}\text{C}$										–16					–14					
Nb jours $T_{\text{moy}} > 5^{\circ}\text{C}$ (par 10 ans)										<i>15</i>										
Durée d'insolation (heures / 10 ans)											–13	–20	–17	–18	–68					

	Pau					Poitiers					Saint-Girons					Saint-Quentin				
	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année
P (mm / 10 ans)														-6,4						
Nb jours sans pluie (par 10 ans)								2		6										
T _{moy} (°C / 10 ans)	0,36	0,26	0,42	0,34	0,36			0,27					0,36	0,19	0,25				0,22	
Nb de jours avec T _{min} < 0 °C					-19															
Nb jours T _{moy} > 5 °C (par 10 ans)					18									21						
Durée d'insolation (heures / 10 ans)			-19								14									

	Strasbourg					Tarbes					Toulouse					Vichy				
	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année	DJF	MAM	JJA	SON	Année
P (mm / 10 ans)				5,3	24,3															
Nb jours sans pluie (par 10 ans)																				-2
T _{moy} (°C / 10 ans)			0,34		0,23	0,32	0,23	0,44	0,32	0,33	0,42	0,22	0,5	0,31	0,38			0,39		0,26
Nb de jours avec T _{min} < 0 °C										-17					-13					
Nb jours T _{moy} > 5 °C (par 10 ans)										21					17					
Durée d'insolation (heures / 10 ans)						17							-20							

méditerranéenne [44, 56, 60] sont en partie attribuées à ces variations environnementales (CO₂, climat, dépôts azotés...). Le fonctionnement physiologique des arbres est fréquemment perturbé par des déficits hydriques limités mais ce sont les épisodes secs de longue durée qui entraînent des pertes de vitalité voire, à terme, la mort des arbres [3]. Le réchauffement annuel ainsi que l'augmentation du nombre de jours « chauds » en automne et en hiver pourraient signifier un allongement de la saison de végétation, comme déjà observé en Suisse [20] et en Europe [52] (13 et 11 jours entre 1951 et 2000). Si cet effet peut sembler favorable, l'augmentation des températures printanière et estivale pourrait se traduire, à terme, par une augmentation des niveaux de contraintes, soit directement à travers un effet des températures sur la capacité photosynthétique des arbres [27], soit indirectement à travers une augmentation du déficit hydrique du sol (surtout si le réchauffement s'accompagne d'une diminution des précipitations) [30, 50]. Ceci semble être le cas pour le mois d'août, seul mois présentant à la fois des tendances nettes de réchauffement et de variation du régime des pluies et de l'ensoleillement (diminution du total mensuel et/ou du nombre de jours de pluie et augmentation de la durée d'insolation). Des simulations faites à partir des données de Nancy-Tomblaine montrent d'ailleurs une augmentation du déficit du sol depuis 10 à 15 ans (Gravier, non publié). La seule variation du régime des pluies pourrait également avoir des effets importants sur la sécheresse édaphique. En effet, des pluies inférieures à 1 ou 2 mm sont totalement interceptées par le feuillage et ne sont donc pas disponibles pour l'alimentation hydrique des arbres ou la recharge de la réserve en eau du sol [2]. L'analyse actuellement en cours de la variation temporelle de la fréquence des pluies selon leur intensité devrait donc apporter des éléments d'information très importants pour la simulation des bilans hydriques.

Même si l'analyse des données moyennes fournit des informations sur les variations climatiques récentes, la variabilité temporelle et de la fréquence des événements extrêmes est également essentielle à prendre en compte pour appréhender le problème de l'adaptation des espèces [28]. Cette analyse en cours devrait permettre de compléter les informations sur les variations récentes déjà observées. Enfin, en l'état actuel des connaissances, même si des incertitudes demeurent, il paraît important d'essayer de prendre en compte ces évolutions dans la gestion future des peuplements [58] car rien ne justifie une remise en cause du signe de changement climatique attendu.

Remerciements : Les auteurs remercient le Service Central d'Exploitation de la Météorologie (SCEM) de Toulouse pour l'aide apportée lors de la sélection des stations du réseau Météo-France. Ce travail a été soutenu financièrement par l'Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, Inra – CEE – Unité d'Écophysiologie Forestière.

REFERENCES

- [1] André J.C., Royer J.F., Les fluctuations à court terme du climat et l'interprétation des observations récentes en termes d'effet de serre, *La Météorologie* 8 (1999) 12–22.
- [2] Aussenac G., Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 287–201.
- [3] Aussenac G., Guehl J.M., Dépérissement et accidents climatiques, *Rev. For. Fr.* 46 (1994) 458–470.
- [4] Autunes S., Espirito-Santo F., Oliveira-Pires H., Assessment of regional climatic variation and urban island trends from long climatological series, in: *Environmental statistics and Earth Science, Proceedings and Abstracts*, Masaryk University, Brno, 1996, pp. 1–5.
- [5] Badeau V., Becker M., Bert G.D., Dupouey J.L., Lebourgeois F., Picard J.F., Long-term growth trends of trees: ten years of dendrochronological studies, in: Spiecker et al. (Eds.), *European Forest Institute Research, Report No. 5, Growth trends in European Forests*, Springer-Verlag, 1996, pp. 167–181.
- [6] Balling Jr R.C., Vose R.S., Weber G.R., Analysis of long-term European temperature records: 1751–1995, *Clim. Res.* 10 (1998) 193–200.
- [7] Becker M., 1989. The role of climate on present and past vitality of silver fir forests in the Vosges mountains of northeastern France, *Can. J. For. Res.* 19 (2000) 1110–1117.
- [8] Becker M., Bert G.D., Bouchon J., Dupouey J.L., Picard J.F., Ulrich E., Long-term changes in Forest Productivity: the Dendroecological Approach, in: Landmann G., Bonneau M. (Eds.), *Forest decline and air pollution effects in the French mountains*, Springer-Verlag, 1995, pp. 1–12.
- [9] Beniston M., Rebetez M., Regional behavior of minimum temperatures in Switzerland for the period 1979–1993, *Theor. Appl. Climatol.* 53 (1996) 231–243.
- [10] Beniston M., Rebetez M., Giorgi F., Marinucci M.R., An analysis of regional climate in Switzerland, *Theor. Appl. Climatol.* 49 (1994) 135–159.
- [11] Betout P., Recherche sur l'évolution de la température en France au cours des cinquante dernières années période 1921–1974, Note technique du Service Météorologique Métropolitain, n° 5, Nouvelle série, 1979.
- [12] Böhm R., Stadtentwicklung und Trend der Wärmeintensität, *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* 27 (1979) 31–46.

- [13] Bradley R.S., Diaz H.F., Eischeid J.K., Jones P.D., Kelly P.M., Goodess C.M., Precipitation fluctuations over Northern hemisphere land areas since the Mid-19th century, *Science* 237 (1987) 171–175.
- [14] Brazdil H.R., Budikova M., An urban bias in air temperature fluctuations at the Klementinum, Prague, The Czech Republic, *Atmos. Env.* 33 (1999) 4211–4217.
- [15] Brazdil H.R., Budikova M., Climate variation in Central Europe – facts or inhomogeneities? in: Raino Heino (Ed.), *Climate variations in Europe*, in: Proceedings of the European Workshop on Climate Variations, Publications of the Academy of Finland, 1994, pp. 9–29.
- [16] Brazdil H.R., Budikova M., Auer I., Böhm R., Cegnar T., Fasko P., Lapin M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Koleva E., Niedzwiedz T., Ustrnul Z., Szalai S., Weber R.O., Trends of maximum and minimum daily temperatures in Central and Southeastern Europe, *Int. J. Climatol.* 16 (1996) 765–782.
- [17] Brazdil H.R., Budikova M., Fasko P., Lapin M., Fluctuations of maximum and minimum air temperatures in the Czech and the Slovak Republics, *Atmos. Res.* 37 (1995) 53–65.
- [18] Briffa K.R., Schweingruber F.H., Jones P.D., Osborn T.J., Harris I.C., Shiyatov S.G., Vaganov E.A., Grudd H., Trees tell of past climates: but are they speaking less clearly today? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 353 (1998) 65–73.
- [19] Choissnel E., Changements climatiques et cycle de l'eau : évolutions possibles et incertitudes, *C. R. Agric. Fr.* 85 (1999) 21–32.
- [20] Defila C., Clot B., Tendances révélées par l'étude phénologique des arbres en Suisse, in: Rebetz M. et Combe J. (Éds.), *Quelle sylviculture pour les climats à venir ?* Dans : Actes de la journée thématique de l'antenne romande du WSL du 28 novembre 2000 à l'EPF-Lausanne, WSL Antenne romande, Lausanne, 2000, pp. 15–19.
- [21] Déqué M., Marquet P., Jones R.G., Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model, *Clim. Dynamics* 14 (1998) 173–189.
- [22] Dessens J., Barés A., Evolution of the maximum and minimum temperatures in France from 1891–1992, *J. Meteorol.* 21 (1996) 41–48.
- [23] Dessens J., Bücher A., A critical examination of the precipitation records at the Pic du Midi observatory, Pyrénées, France, *Climatic Change* 36 (1997) 345–353.
- [24] Dessens J., Bücher A., Changes in minimum and maximum temperatures at the Pic du Midi in relation with humidity and cloudiness, 1882–1984, *Atmos. Res.* 37 (1995) 147–162.
- [25] Dhôte J.F., Hervé J.C., Changements de productivité dans quatre forêts de chênes sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 651–680.
- [26] Diaz H.F., Bradley R.S., Eischeid J.K., Precipitation fluctuations over global land areas since the late 1800's, *J. Geophys. Res.* 94 (1989) 1195–1210.
- [27] Dreyer E., Le Roux X., Montpied P., Daudet F.A., Masson F., Temperature response of leaf photosynthetic capacity in seedlings from seven temperate trees species, *Tree Phys.* 21 (2001) 223–232.
- [28] Easterling D.R., Evans J.L., Groisman P.Ya., Karl T.R., Kunkel K.E., Ambenje P., Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 81 (2000) 417–425.
- [29] Easterling D.R., Horton B., Jones P.D., Peterson T.C., Karl T.R., Parker D.E., Salinger M.J., Razuvayev V., Plummer N., Jamason P., Folland C.K., Maximum and minimum temperature trends for the globe, *Science* 277 (1997) 364–367.
- [30] Granier A., Bréda N., Biron P., Villette S., A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands, *Ecol. Model.* 116 (1999) 269–283.
- [31] Granier A., Loustau D., Bréda N., A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 755–765.
- [32] Hasenauer H., Nemani R.R., Schadauer K., Running S.W., Forest growth response to changing climate between 1961 and 1990 in Austria, *For. Ecol. and Manage.* 122 (1999) 209–219.
- [33] Helbig A., Zum nachweis Anthropogener Einflüsse auf Zeitreihen der Lufttemperatur, *Abhandlungen des Meteorologischen Dienstes der DDR* 140 (1988) 111–114.
- [34] Hurrell J.W., Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science* 269 (1995) 676–679.
- [35] Hurrell J.W., Van Loon H., Decadal variations in climate associated with the North Atlantic Oscillation, *Climatic Change* 36 (1997) 301–326.
- [36] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC. Climate change, Working group I to the Intergovernmental Panel on Climate Change Scientific Assessment, Houghton J.T., Jenkins G.J., Ephraums J.J. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- [37] Jones P.D., Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993, *J. Climate* 7 (1994) 1794–1802.
- [38] Karl T.R., Derr V.E., Easterling D.R., Folland C.K., Hofmann D.J., Levitus S., Nicholls N., Parker D.E., Withee G.W., Critical issues for long-term climate monitoring, *Climatic Change* 31 (1995) 185–221.
- [39] Karl T.R., Jones P.D., Urban bias in area-average surface air temperature trends, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 70 (1989) 265–270.
- [40] Karl T.R., Jones P.D., Knight R.W., Kukla G., Plummer N., Razuvayev V., Gallo K.P., Lindsey J., Charlson R.J., Peterson T.C., A new perspective on recent global warming : asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 74 (1993) 1007–1023.
- [41] Karl T.R., Knight R.W., Easterling D.R., Quayle R.G., Indices of Climate change for the United States, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77 (1996) 279–292.
- [42] Karl T.R., Knight R.W., Easterling D.R., Quayle R.G., Trends in U.S. climate during the twentieth century, *Consequences V.1* (1995) 3–12.

- [43] Karl T.R., Kukla G., Gavin J., Relationship between decreased temperature range and precipitation trends in the United States and Canada, 1941–80, *J. Clim. Appl. Meteor.* 25 (1986) 1878–1886.
- [44] Keller T., Guiot J., Tessier L., Climatic effect of atmospheric CO₂ doubling on radial tree growth in southeastern France, *J. Biogeography* 24 (1997) 857–864.
- [45] Kienast F., Zimmermann N., Wildi O., Scénarios d'évolution des aires de répartition des principales essences forestières en fonction des scénarios de changement climatique, in : Rebetez M., Combe J. (Eds.), *Quelle sylviculture pour les climats à venir ? Actes de la journée thématique de l'antenne romande du WSL du 28 novembre 2000 à l'EPF-Lausanne, Lausanne, WSL Antenne romande, 2000*, pp. 21–26.
- [46] Klink K., Trends in mean monthly maximum and minimum surface wind speeds in the coterminous United states, 1961 to 1990, *Clim. Res.* 13 (1999) 193–205.
- [47] Kozuchowski J., Trepinska J., Wibig J., The air temperature in Cracow from 1826 to 1990: persistence, fluctuations and the urban effect, *Int. J. Climatol.* 14 (1994) 1035–1049.
- [48] Kukla G., Gavin J., Karl T.R., Urban warming, *J. Climate Appl. Meteor.* 25 (1986) 1265–1270.
- [49] Kukla G., Gavin J., Schlesinger M., Karl T., Comparison of observed seasonal temperature maxima, minima and diurnal range in North America with simulations from three global climate models, *Atmos. Res.* 37 (1995) 267–275.
- [50] Lebourgeois F., Analyse du bilan hydrique et de la croissance des arbres dans le RENECOFOR, in : *Rapport scientifique final, Union Européenne, DG VI, projet n° 9760FR0030, Inra-CEE-Unité d'Écophysologie Forestière, 1999*, 72 p.
- [51] Mann M.E., Bradley R.S., Hughes M.K., Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries, *Nature* 392 (1998) 779–787.
- [52] Menzel A., Fabian P., Growing season extended in Europe, *Nature* 397 (1999) 659.
- [53] Peterson T.C., Vose R.S., An overview of the global historical climatology network temperature database, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 78 (1997) 2837–2849.
- [54] Primault B., Temperature data used to determine a theoretical start to forest tree growth in spring, *Theor. Appl. Climatol.* 45 (1992) 139–143.
- [55] Quayle R.G., Easterling D.R., Karl T.R., Hughes P.Y., Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 72 (1991) 1718–1723.
- [56] Rathgeber C., Guiot J., Roche Ph., Tessier L., Augmentation de productivité du chêne pubescent en région méditerranéenne, *Ann. For. Sci.* 56 (1999) 211–219.
- [57] Rebetez M., Beniston M., Changes in temperature variability in relation to shifts in mean temperatures in the Swiss Alpine region this century, in: Beniston M., Innes J.I. (Eds.), *The impacts of climate variability on forests, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, 1998*, pp. 49–58.
- [58] Rebetez M., Combe J., *Quelle sylviculture pour les climats à venir ? Actes de la journée thématique de l'antenne romande du WSL du 28 novembre 2000 à l'EPF-Lausanne, Lausanne, WSL Antenne romande, 2000*.
- [59] Rolland C., Petitcolas V., Michalet R., Changes in radial tree growth for *Picea abies*, *Larix decidua*, *Pinus cembra* and *Pinus uncinata* near the alpine timberline since 1750, *Trees* 13 (1998) 40–53.
- [60] Rozas V., Detecting the impact of climate and disturbances on tree-rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain, *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 237–251.
- [61] Saugier B., Rôle de la biosphère continentale dans le cycle du carbone, *C. R. Agric. Fr.* 85 (1999) 229–254.
- [62] Tessier L., Keller T., Guiot J., Edouard J.L., Guibal F., Predictive models of tree-growth: preliminary results in the French Alps, in: Beniston M., Innes J.L. (Eds.), *The impacts of climate variability on forests, Lecture Notes in Earth Sciences, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New-York, 1998*, pp. 109–120.
- [63] Vanicek K., Trends of sunshine on the territory of the CSR in the period of 1956–1985, *Sbor. Prac. Ces. Hydrometeorol. Ust.* 37 (1990) 49 p.
- [64] Wang W.C., Portman D.A., Gong G., Zhang P., Karl T.R., Beijing summer temperatures since 1724, in: RS Bradley R.S., Jones P.D. (Eds.), *Climate since AD 1500, Routledge, London, 1992*, pp. 210–223.
- [65] Wang W.C., Zeng Z., Karl T.R., Urban heat islands in China, *Geophys. Res. Lett.* 17 (1990) 2377–2380.
- [66] Weber R.G., Spatial and temporal variation of sunshine in the Federal Republic of Germany, *Theor. Appl. Climatol.* 41 (1990) 1–19.