

Table des matières

Introduction	1
La nouvelle physique du LMDZ	1
1 Remarques méthodologiques	2
1.1 Standardized Precipitation Index	2
1.2 Méthode - dite - de Sheffield	3
2 Description générale de la simulation historique	3
2.1 À l'échelle planétaire	3
2.2 Zoom sur l'Europe	4
2.3 Formes des précipitations	12
3 Épisodes de sécheresses dans la simulation historique	12
3.1 Méthode de Sheffield	17
3.2 Évènements secs de septembre (ESS)	17
4 Projections futures	22
4.1 Description générale	23
4.2 Méthode de Sheffield	26
Conclusion	34
Références	37

Introduction

L'objectif de ce stage est d'évaluer la manière dont le changement de représentation et de paramétrisation de la physique atmosphérique dans le modèle LMDZ affecte l'apparition et la persistance d'événements secs dans les simulations climatiques réalisées dans le cadre du programme international CMIP5.

La notion de sécheresse recouvre une grande variété de phénomènes physiques, aux conséquences économiques et environnementales diverses ([1, 2]) et le premier obstacle dans l'étude qui est ici présentée est d'en définir avec exactitude et pertinence l'objet. La communauté scientifique s'intéressant au cycle de l'eau distingue généralement 3 types de sécheresses : les sécheresses météorologiques, caractérisées par des précipitations faibles, les sécheresses agronomiques, caractérisées par une humidité du sol faible, et des sécheresses hydrologiques, quand les écoulements sont faibles, par exemple dans les bassins fluviaux. On peut également mentionner les sécheresses agricoles ([3]), quand la zone racinaire est anormalement peu humide, mais elles sont à traiter avec plus de parcimonie car leurs conséquences sont fortement dépendantes de la saison et de l'utilisation qui est faite du sol et du sous-sol. Il convient également de discuter ce que signifie "anormalement" : par exemple, si on peut définir un jour de pluie comme un jour où il tombe plus de 1mm d'eau, fixer une valeur absolue d'humidité du sol en dessous de laquelle celui-ci est considéré comme sec n'a pas de sens à l'échelle globale, d'autant qu'il faudrait fixer une valeur différente pour chaque modèle de sol, tous ne représentant pas l'humidité de la même manière (nombre de couches, profondeur,...). Une approche plus pertinente est alors de s'intéresser aux "événements secs" et non plus aux "sécheresses" en fixant un seuil relatif, pour chaque point et pour chaque mois de l'année. Cette approche est discutée plus en détails par la suite, au travers de plusieurs méthodes de représentation et d'étude des sécheresses.

Le programme CMIP5, lancé par le WGCM en 2008, est un ensemble d'expériences coordonnées de simulation du climat, dans différentes conditions de forçages. Ces expériences permettent de comparer le comportement d'une vingtaine de modèles et leur réaction à ces différentes conditions, le but étant d'évaluer leur capacité à simuler le climat, par exemple en confrontant des résultats de simulations de climats passés à des données expérimentales. Il s'agit aussi d'identifier et d'analyser les mécanismes qui entraînent des divergences entre les modèles, pour comprendre les raisons des sensibilités de chacun ainsi que les procédés physiques qui sont en jeu. Certaines simulations sont ainsi réalisées en ne faisant appel qu'à une partie des modèles couplés afin d'étudier sa réponse particulière à une situation donnée et d'évaluer son influence dans le comportement du modèle couplé (par exemple les AMIP ne font intervenir que le modèle d'atmosphère, forcé avec des SST prescrites et les simulations sur des aquaplanètes ne prennent pas en compte les continents). La comparaison des modèles permet de mesurer les incertitudes existantes mais également de les attribuer à certaines pièces du puzzle climatique. L'intérêt scientifique est d'abord de dresser un état des lieux des capacités de la communauté à simuler le climat, mais l'exercice permet également d'identifier des enjeux majeurs en termes de recherche et de surveillance dans la perspective d'un dérèglement climatique. Dès lors, bien que le but de ce programme soit d'abord d'améliorer les modèles, les premières analyses devraient être utilisées par le GIEC pour répondre à plusieurs questions posées par l'AR4.

La nouvelle physique du LMDZ

Deux versions du modèle couplé ont été utilisées pour CMIP5. La première utilise le même GCM atmosphérique (le modèle LMDZ) que pour CMIP3 (2005) avec simplement une résolution verticale accrue. Dans la seconde, la physique a été profondément revisitée, en particulier sur la paramétrisation de la couche limite, de la convection et des nuages ([4]). Cette nouvelle paramétrisation comporte entre autres une représentation en flux de masse de la convection de couche limite, dite modèle du thermique, ainsi qu'une prise en compte des poches froides formées à l'arrière des cumulonimbus. Le déclenchement de la convection profonde ainsi que sa fermeture ont également été conceptuellement modifiés. Cette nouvelle physique jouant fortement sur la convection, donc sur les précipitations et sur l'évaporation, des changements sont attendus dans le cycle de l'eau. L'objectif de ce stage est d'identifier ces changements, particulièrement ceux concernant les événements secs, et de les expliquer

à l'aune des modifications de la physique atmosphérique. Dans ce rapport seront utilisées de manière complètement équivalente les appellations “physique A” et “physique B” pour désigner réciproquement la physique atmosphérique standard ou la nouvelle physique du LMDZ.

Ces modèles atmosphériques sont couplés, dans les simulations étudiées, à d'autres modules, en particulier Orchidée, qui simule entre autres l'humidité du sol. Le sol est représenté en 2 couches, dont une, celle de surface, est de profondeur variable, dépendante de la pluie ([5]). Le modèle se comporte par ailleurs comme un seau : quand il pleut, l'eau s'infiltré dans le sol, qui ne déborde que quand le sol est saturé, créant alors des écoulements (run-off). Dans les simulations étudiées, la profondeur du sol est de 4 m, ce qui correspond à une capacité de 600 kg.m^{-1} ou encore 600 mm d'eau. Cette représentation du sol est pour le moins sommaire et ne permet pas de simuler correctement l'effet mémoire du sol ([6]). Un modèle plus réaliste, disposant de 11 couches permet de prendre en compte beaucoup plus de phénomènes, par exemple la résistance à l'infiltration, qui augmente le temps de réponse du sol et filtre donc les épisodes de sécheresses les plus courts.

Pour évaluer les changements entre ces deux physiques, quatre simulations du modèle couplé ont été analysées : pour chacune des physiques, une simulation de climat passé et une de climat futur. La suite de ce rapport présente les résultats de ces analyses, d'abord sur les caractéristiques hydrologiques et météorologiques moyennes puis en concentrant le point de vue sur des épisodes de sécheresse.

1 Remarques méthodologiques

Plusieurs outils, essentiellement basés sur des méthodes statistiques, ont été utilisés pour analyser les données issues des simulations, et il paraît opportun de les détailler dès maintenant.

1.1 Standardized Precipitation Index

Plusieurs indicateurs ont été développés afin de surveiller quantitativement et en temps réel l'apparition de sécheresses ([7]). En particulier, le Standardized Precipitation Index (SPI) ou le Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) sont des indices simples et opérationnels qui permettent de déterminer si les précipitations sur une période de temps donnée sont “plutôt” faibles ou pas et ainsi d'évaluer le degré de sécheresse météorologique d'un instant donné ([8]). Le *plutôt* est défini grâce à une distribution de probabilités de référence (DPR), constituée d'une série pluriannuelle de valeur, au sein de laquelle on détermine la position (quantile) de la valeur considérée. En prenant une DPR différente en chaque maille, on s'affranchit des conditions géographiques propres (une valeur de précipitations faible pour une maille en Europe pourrait correspondre à une forte précipitation dans une maille saharienne), une DPR différente pour chaque mois de l'année, on s'affranchit de la variabilité saisonnière. Par ailleurs, après avoir déterminé la position de la valeur en question dans la DPR, on la ramène à une valeur standardisée par une projection quantile-quantile sur une loi normale centrée-réduite. On obtient ainsi un indicateur ne dépendant ni de la moyenne des précipitations ni de leurs variabilités.

Cette méthode peut être appliquée à n'importe quelle série de données, quelque soit sa dimension, et on peut par exemple calculer un indice basé sur l'humidité du sol (SMI pour Standardized Moisture Index). Il est également intéressant d'utiliser des distributions de valeurs moyennées sur plusieurs mois afin de prendre en compte la persistance du système et de ne pas complètement gommé artificiellement le cycle saisonnier. Le principal usage de cette méthode très opérationnelle est la surveillance agronomique pour laquelle elle permet de définir un seuil d'alerte adapté au type d'événements surveillés. Dans les simulations climatiques, son intérêt est de permettre la construction d'une série temporelle d'un indicateur normalisé, et ainsi de corrélérer deux séries temporelles de variables n'ayant pas la même variabilité saisonnière et d'en déduire des dépendances entre ces séries. Dans notre cas, il est intéressant de corrélérer les séries temporelles pluriannuelles de SMI avec des séries de SPI calculées sur des périodes plus ou moins longues et éventuellement décalées (laguées) avec la série des SMI, pour étudier la dépendance de l'humidité du sol envers la pluie. Il n'y a par ailleurs pas besoin d'introduire

une série temporelle de référence qui pourrait biaiser la corrélation, il suffit de normaliser les variables par rapport à elles-mêmes.

1.2 Méthode - dite - de Sheffield

Développée dans [9, 10], cette méthode permet de caractériser la persistance et l’extension spatiale d’épisodes de sécheresses, définis comme un déficit d’humidité comparativement aux événements les plus secs d’une période de référence, à la même époque de l’année. Cette méthode a été appliquée aux valeurs d’humidité du sol mais peut tout à fait être adaptée aux valeurs de précipitations.

En un point donné, à partir d’une DPR, on calcule mois par mois une valeur seuil, définie comme un certain quantile (par exemple dans notre cas 10%) de la DPR. Dans la simulation à analyser, les seuils permettent d’étiqueter chaque valeur comme “événement sec” ou non. Il faut ensuite compter les mois secs successifs ou les mailles sèches voisines pour avoir une image de la longueur ou de l’étendue des sécheresses dans la simulation. On définit également la sévérité de l’épisode de sécheresse comme la somme sur toute la durée de la différence entre le quantile seuil et le quantile que représente l’humidité du mois concerné. L’intensité de la sécheresse est la sévérité de celle-ci divisée par sa durée.

Si le calcul via une DPR propre au lieu et au mois considérés crée une proximité mathématique avec la méthode des SPI, l’approche conceptuelle est assez différente. Il s’agit ici de discriminer des événements secs d’événements non-secs, sur toute la simulation, sans suivre la chronologie de manière continue : les variables considérées ne sont plus tant les valeurs d’humidité que le nombre et les durées des sécheresses. Celles-ci sont d’ailleurs explicitement définies dans l’approche de Sheffield, alors que le calcul du SPI n’est, de ce point de vue, que la définition d’une métrique. D’autant plus que si le SPI a un sens à un moment donné, Sheffield considère une période assez longue, dont sa méthode donne une vision intégrée : si on ne peut définir le SPI que pour un mois donné, la méthode ici présentée se doit d’être appliquée à une série temporelle continue de valeurs. Le SPI permet, quant à lui, de suivre l’évolution chronologique d’une variable : il n’a en effet aucun intérêt en dehors de celle-ci, sa distribution totale étant par définition normalisée.

Le principal reproche que l’on peut faire à cette méthode est qu’elle ne reflète aucune réalité physique puisque le seuil varie selon la zone géographique et la période de l’année. En particulier si la période à étudier sert à définir les seuils de sécheresse, on aura alors mécaniquement, le même nombre de sécheresses partout, pour chaque mois de l’année, et les sévérités seront du même ordre de grandeur, l’intérêt n’est donc que la répartition de ces sécheresses sur la période. Cela convient bien pour étudier par exemple la persistance des sécheresses.

2 Description générale de la simulation historique

L’une des expériences requises par CMIP5 est une simulation du climat de la Terre entre 1850 et 2005 avec des forçages radiatifs réalistes, basés sur des observations. Pour cette simulation historique, toutes les parties du modèle couplé sont actives.

2.1 À l’échelle planétaire

Abordant une simulation climatique, il semble naturel de commencer par observer la température de surface moyennée sur toute la planète. Celle-ci est présentée sur la figure 1 en compagnie de la précipitation. Si on suppose que la moyenne sur toute la planète donne avant tout une vision de ce qui se passe sur les océans, il paraît naturel que, en augmentant la température entre la physique standard et la nouvelle physique, on augmente également la précipitation. Il est en revanche plus compliqué d’expliquer le comportement sur les continents et on ne peut que noter que le contraste océan-continent est plus marqué avec la nouvelle physique.

Dans le cadre de l’étude des sécheresses, les deux variables qui seront le plus commentées dans ce rapport sont naturellement l’humidité du sol et la précipitation. Les figures 2 et 3 donnent un aperçu des différences dans la simulation de ces variables par les deux modèles ainsi qu’une comparaison

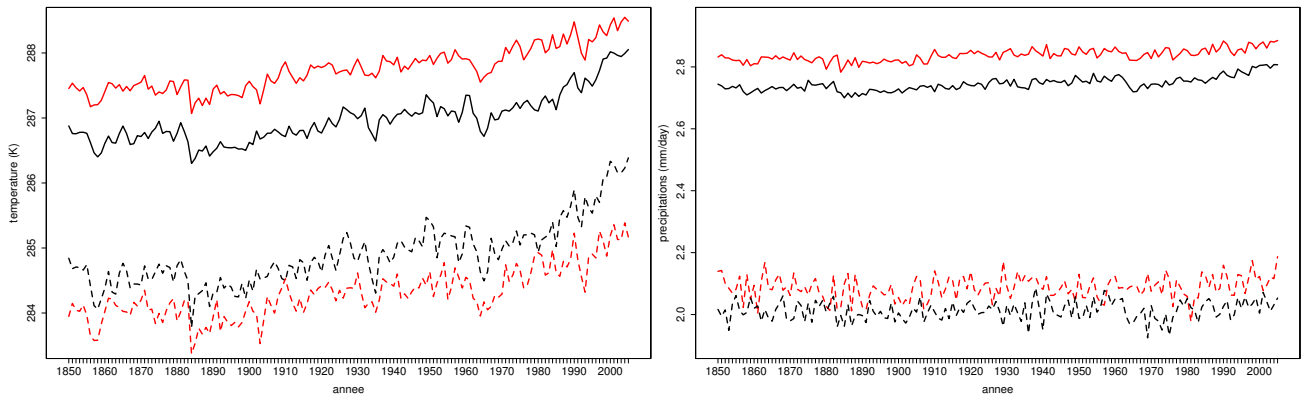


FIGURE 1 – Evolution sur toute la simulation de la température de surface et des précipitations (en mm par jour). En noir pour la physique A, en rouge pour la physique B. En traits pleins pour la moyenne sur toute la planète (sauf glaciers), en pointillés pour la moyenne sur les continents (sauf glaciers).

avec des observations pour la précipitations. Ces données sont issues des ré-analyses du programme GPCP et représentent la fin du XXème siècle. L’humidité du sol semblent assez peu modifiée aux moyennes latitudes : une partie du Canada et de l’Europe centrale s’assèchent de quelques pourcents, surtout en hiver alors que la cote est des États-Unis s’humidifie. La méditerranée quant à elle s’humidifie franchement (Figure 4). Ce sont néanmoins les basses latitudes qui subissent le plus de modifications, on notera en particulier une humidification des zones arides du Nordeste brésilien contre un assèchement à l’ouest de cette zone, une forte humidification de l’Australie et du sud de l’Afrique, ou encore un assèchement important du sous-continent indien. Le cas du Sahara n’est volontairement pas évoqué car il souffre de valeurs négatives d’humidité avec la physique standard.

Ces différences d’humidité de grande échelle font écho aux différences de précipitations, aux motifs synoptiques nets, en particulier dans les couloirs dépressionnaires, probablement dus à une modification des structures convectives équatoriales. Ainsi le motif observé dans la différence d’humidité sur l’Amérique du sud se retrouve dans la précipitations avec le déplacement sud-est d’une zone très pluvieuse. Sur l’Australie, une hausse de précipitations en été, en adéquation avec l’humidité du sol, qui semble elle aussi provenir du nord-ouest, asséchant le continent maritime. En hiver austral en revanche les pluies sont plus faibles mais les humidité plus fortes. Cette différence saisonnière peut s’expliquer par le caractère semi-aride de la zone. La confrontation aux observations permet de souligner certaines lacunes des modèles, en particulier la sur-estimation des pluies, en particulier à l’est des océans ou la sous-estimation des pluies dans les storm tracks de l’hémisphère d’hiver. Un déplacement des jets de moyenne latitude de quelques degrés vers le sud est également observé, il permettrait d’expliquer le motif observé sur l’Europe.

2.2 Zoom sur l’Europe

On s’attachera, par la suite, à la description plus détaillée d’une zone située entre $20,6^{\circ}\text{E}$ et $35,6^{\circ}\text{E}$ et entre $47,4^{\circ}\text{N}$ et $54,9^{\circ}\text{N}$, soit de l’est de la Pologne à l’Ouest de la Russie (zone encadrée sur la figure 5).

Les cycles mensuels d’humidité du sol, de précipitations et d’évaporation simulés dans chaque cas sont présentés Figure 6. A titre de comparaison, sont également présentés Figure 7 les cycles saisonniers issus de simulations réalisées avec les deux physiques croisées avec deux versions d’Orchidée : celle à deux couches utilisée pour CMIP5 et la version à 11 couches qui devrait donner des résultats, sinon plus fiables, du moins plus réalistes. Le but était de comparer ces données aux observations du SIRTA (Palaiseau) afin d’évaluer le couplage surfaces continentales-atmosphère. Pour ces simulations le LMDZ est utilisé dans une configuration particulière : la grille est affinée sur le site instrumenté et certaines variables sont rappelées, à l’extérieur du zoom, vers des ré-analyses météorologiques alors

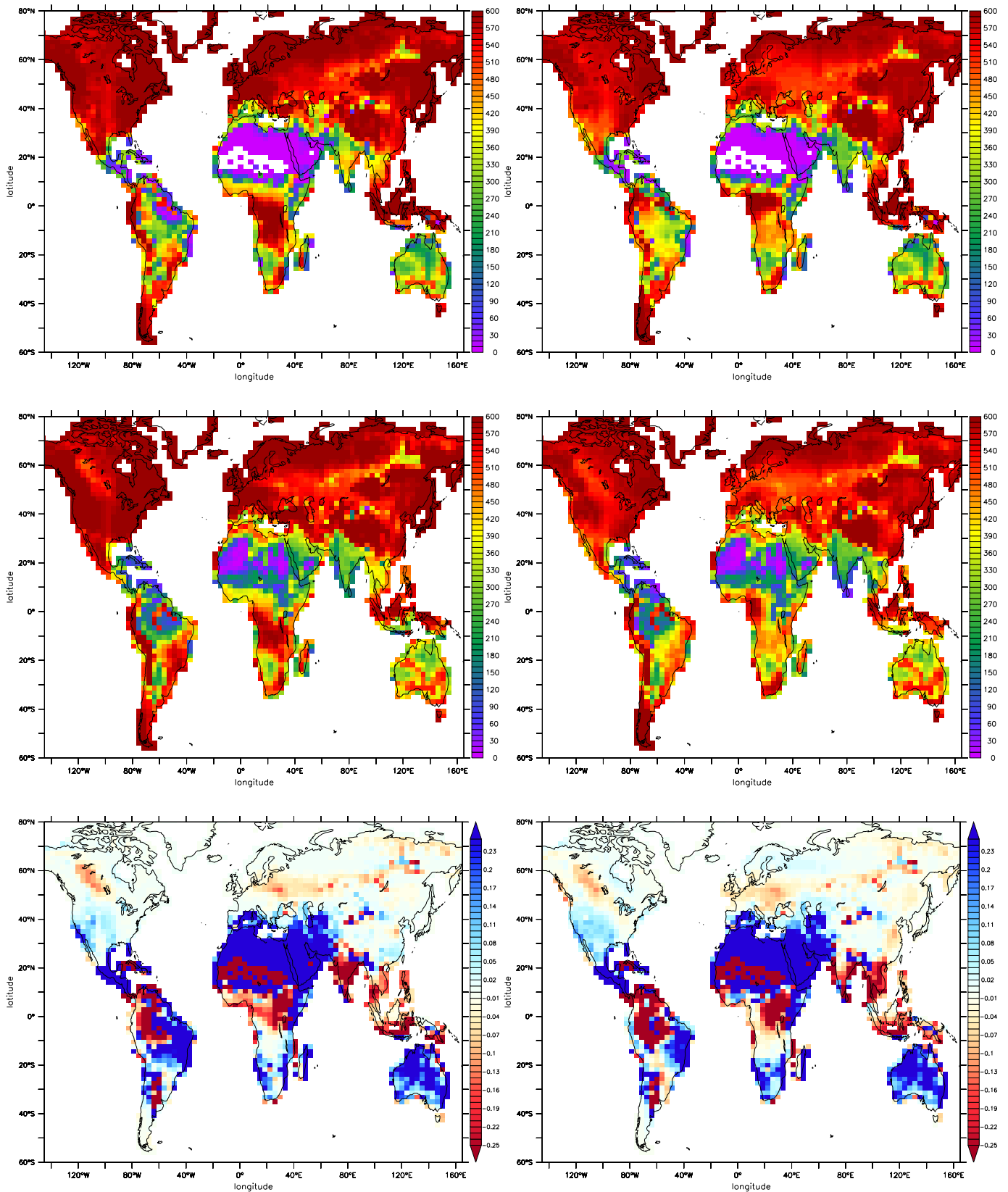


FIGURE 2 – Humidité du sol (en mm). En haut, valeurs moyennes sur toute la simulation dans la physique A sur la première ligne, dans la physique B pour la deuxième. En bas, différence entre l'humidité du sol dans la physique B et la physique A, normalisée par la valeur dans A ($B/A - 1$). À gauche pour les mois de décembre janvier et février, à droite pour les mois de juin, juillet et août.

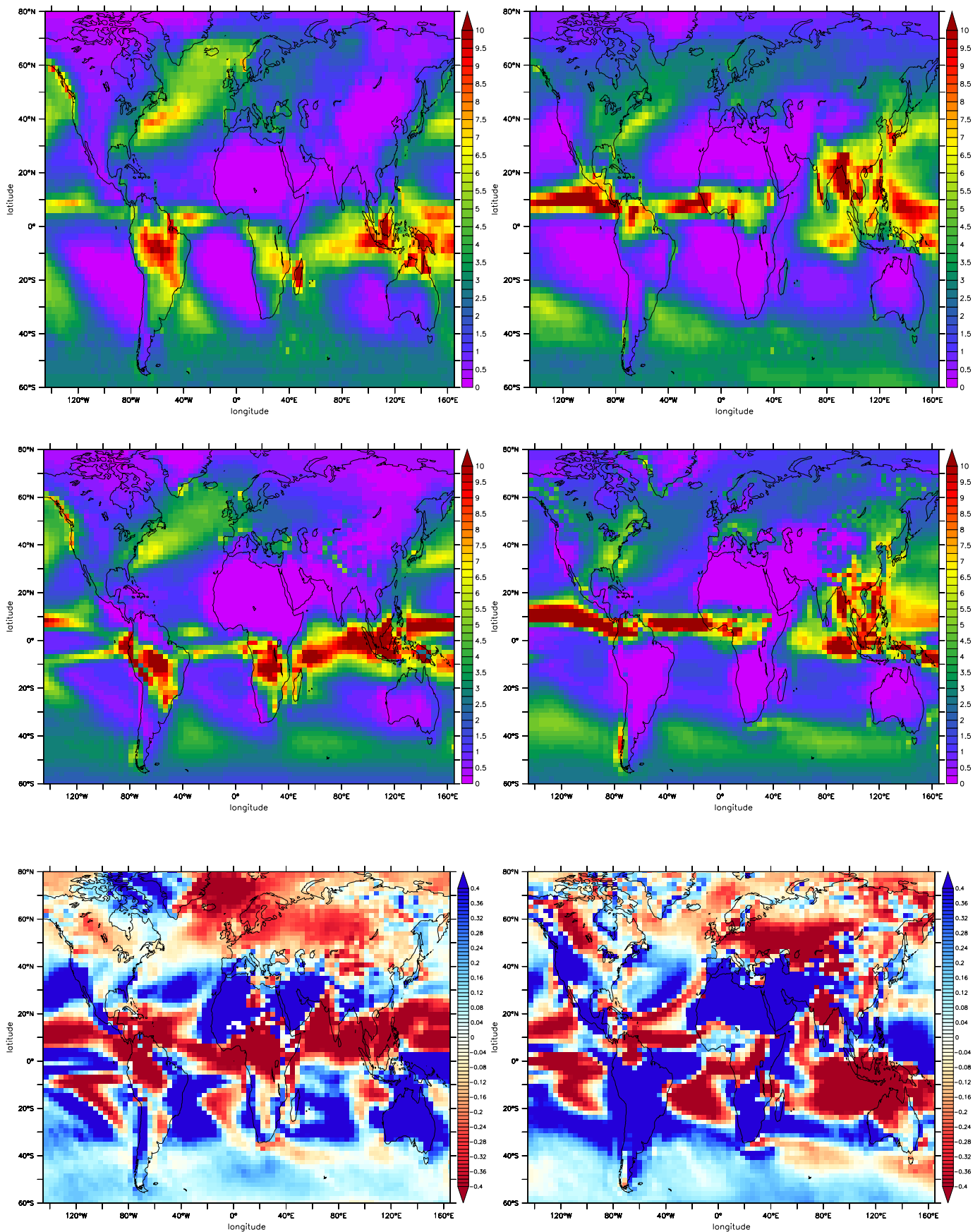


FIGURE 3 – En haut, précipitations (en mm/jour) issues d’observations puis valeurs simulées avec la physique A en moyenne sur toute la simulation. En bas, différence entre les deux physiques, normalisée par la physique A. À gauche pour les mois de décembre, janvier et février, à droite pour les mois de juin, juillet et août.

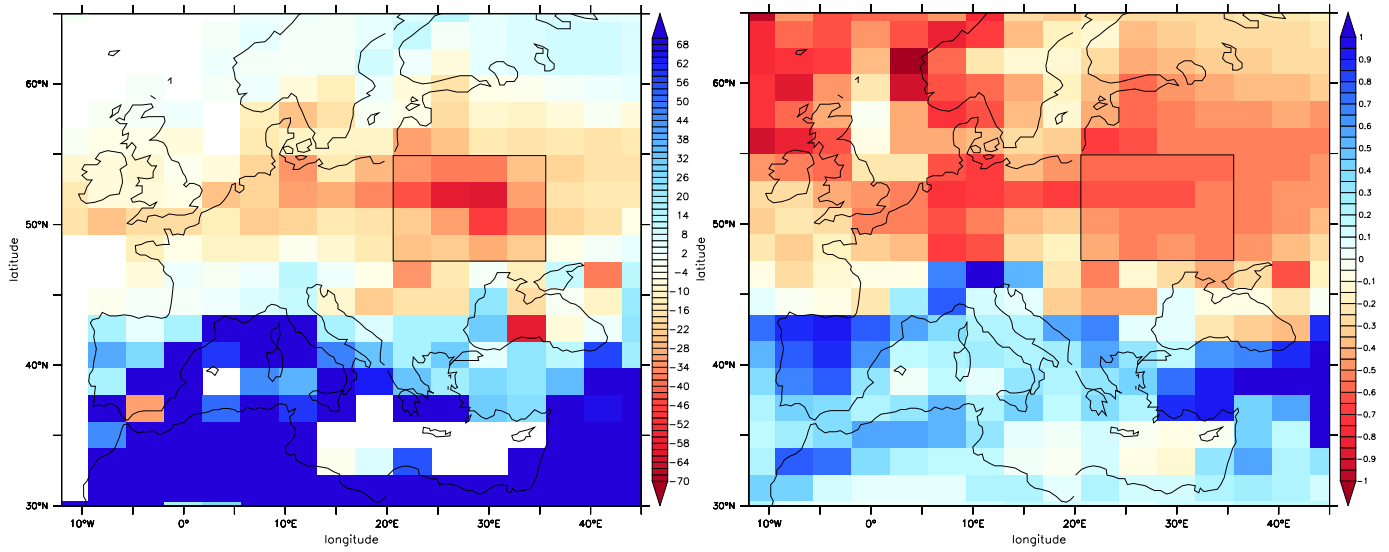


FIGURE 4 – Différence d'humidité (en mm d'eau) et de précipitations (en mm d'eau par jour), entre les deux physiques (B-A) en moyenne sur toute la simulation en Europe.

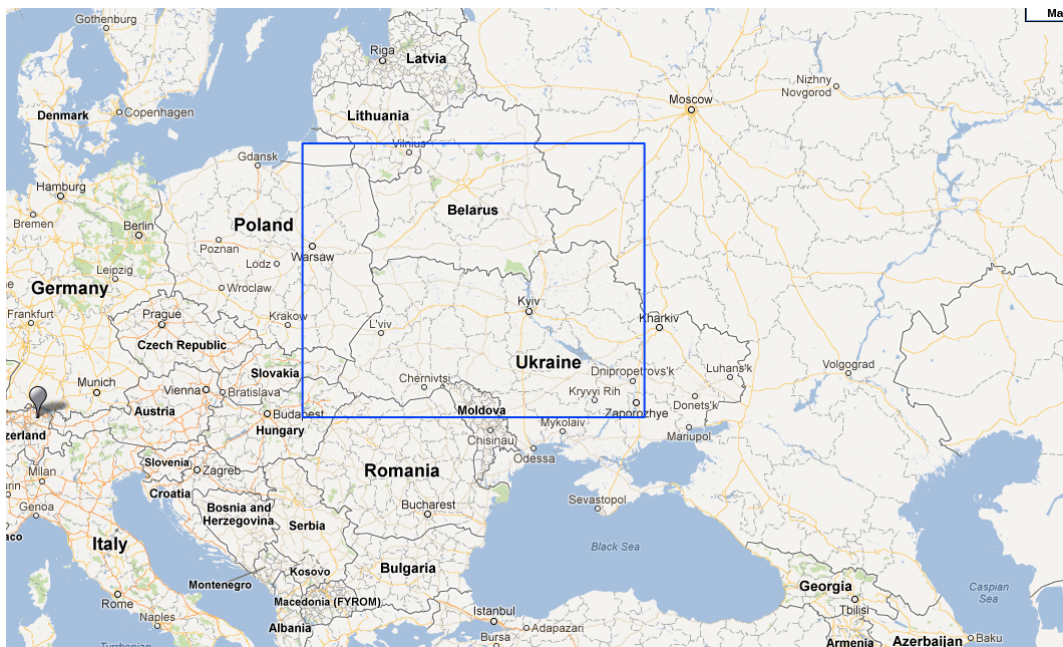


FIGURE 5 – Carte de la zone étudiée.

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne Annuelle
-5,5	-3,5	-1,2	-2,9	-6,4	-15,6	-21,6	-9,0	-4,6	-5,2	-4,7	-3,7	-15,0

TABLE 1 – Logarithme de la p-value d’un test de Student entre la distribution multi-annuelle d’humidité du sol engendrée par la physique A et celle engendrée par la physique B. Valeur maximale sur toute la zone. Plus la p-value est faible, moins il y a de chances que les deux distributions aient la même moyenne

Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Moyenne Annuelle
-0,9	-4,8	-0,6	-2,0	-8,6	-19,1	-18,4	-2,6	-0,1	-0,2	0	-0,2	-28

TABLE 2 – Logarithme de la p-value d’un test de Student entre la distribution multi-annuelle de précipitations du sol engendrée par la physique A et celle engendrée par la physique B. Valeur maximale sur toute la zone.

que l’intérieur peut évoluer librement.

Concernant l’humidité, quelque soit le mois de l’année, la nouvelle physique atmosphérique entraîne en moyenne un assèchement du sol. Compte tenu de la variabilité interannuelle, on réalise un test de student pour vérifier la significativité de cette différence, les résultats sont présentés sur le tableau 1. Si les valeurs moyennes sont significativement différentes (faibles p-value), l’évolution annuelle est néanmoins qualitativement similaire : des sols très humides au printemps, après un hiver assez pluvieux à ces latitudes, et plus secs en automne, conséquence de l’été achevé, où l’évaporation a dominé.

Concernant les précipitations, si un test de Student est moins tranché (cf Table 2) que pour l’humidité du sol, le cycle annuel moyen sur la zone illustre une différence très marquée en été où, contrairement à la physique standard, la nouvelle physique ne reproduit pas bien le fort maximum de pluies observé.

Afin d’identifier l’influence des changements de physique, on sépare les précipitations en précipitations induites par la convection profonde et précipitations de grande échelle, les mécanismes convectifs ayant été fortement modifiés entre les deux physiques (Figure 8). Si cette dénomination est pertinente pour la physique A, elle est un peu abusive pour la physique B car le modèle des thermiques apporte de l’humidité dans la troposphère libre, qui est comptabilisée avec l’humidité advectée par les mouvements de grande échelle. Les pluies - dites - de grande échelle sont donc renforcées par un processus qui n’en est pas moins convectif. Cette remarque est d’autant plus importante sur l’Europe de l’est que avec les storm tracks de la nouvelle physique advectent moins d’humidité venant de l’océan vers l’intérieur des terres (Figure 9). On peut donc supposer qu’une bonne partie de l’eau recyclée par les précipitations de grande échelle a été introduite dans la troposphère par les thermiques qui sont ainsi responsables de l’augmentation de ces dernières.

La physique A reproduit bien les précipitations observées (Figure 6) avec une répartition selon le type de précipitations selon la saison : en hiver, la convection est complètement inhibée, toute la pluie est donc de grande échelle, en été, c’est tout le contraire. Dans la physique B, cette répartition est beaucoup moins marquée, et la précipitation de grande échelle occupe une place plus importante en été qu’elle ne le fait avec la physique standard, en partie à cause de la réduction de la pluie convective, défavorisée par l’assèchement de la couche limite entraîné par les thermiques (Figure 10). Cette différence importante est étonnante compte tenu de la faible différence dans le cycle annuel de l’humidité du sol et amène la question de la pertinence du modèle d’hydrologie dans son couplage avec l’atmosphère.

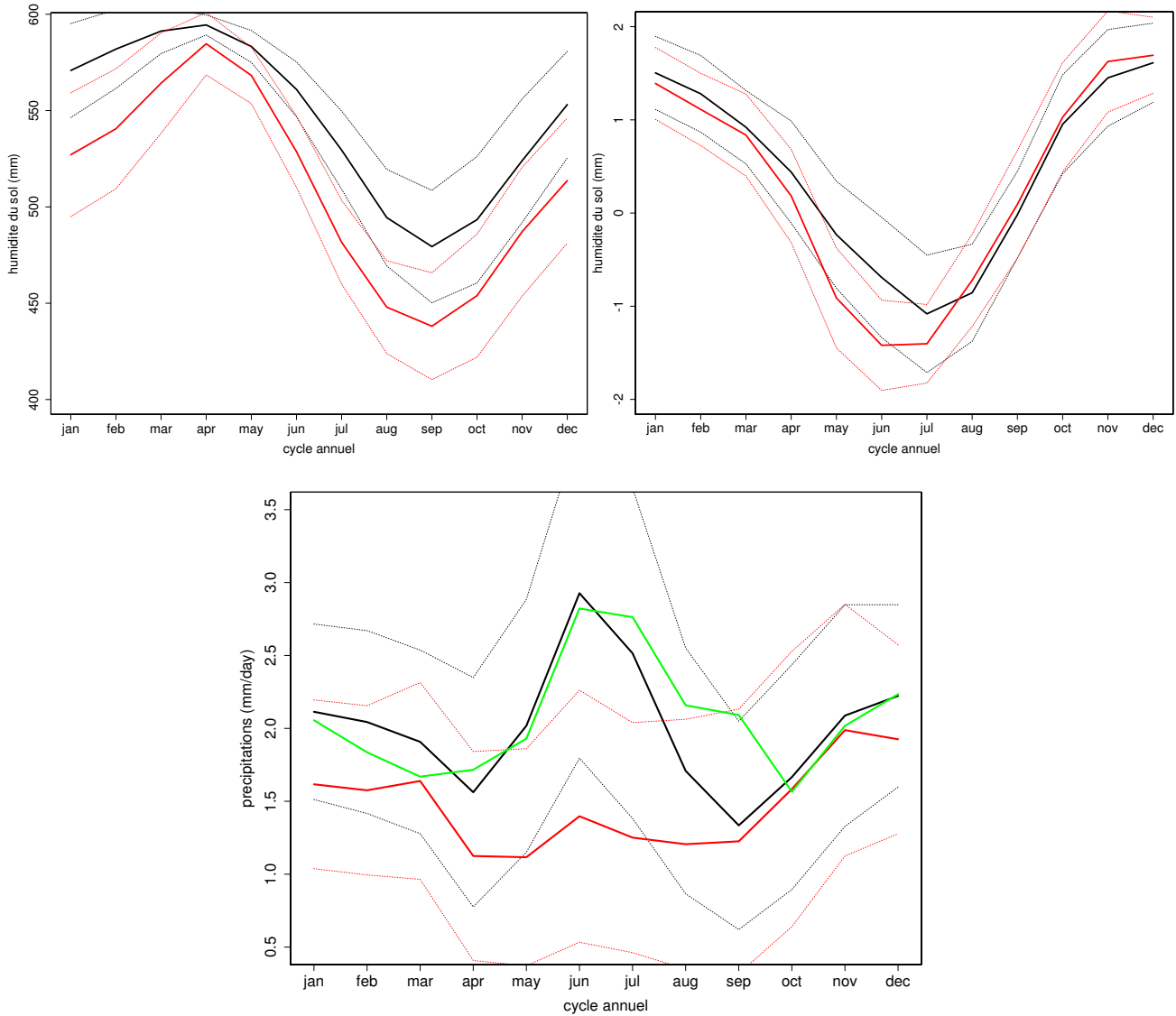


FIGURE 6 – Cycles annuels de l’humidité du sol (en mm d’eau), de la différence entre précipitation et évaporation (en mm d’eau par jour), et de la précipitation, dans une boîte d’Europe de l’est. La courbe rouge représente la simulation réalisée avec la nouvelle physique, la noire celle réalisée avec la physique atmosphérique standard. La courbe verte représente des observations. Les courbes en pointillés symbolisent l’écart-type temporel (en moyenne sur la zone). La moyenne temporelle de l’écart-type spatial est du même ordre de grandeur.).

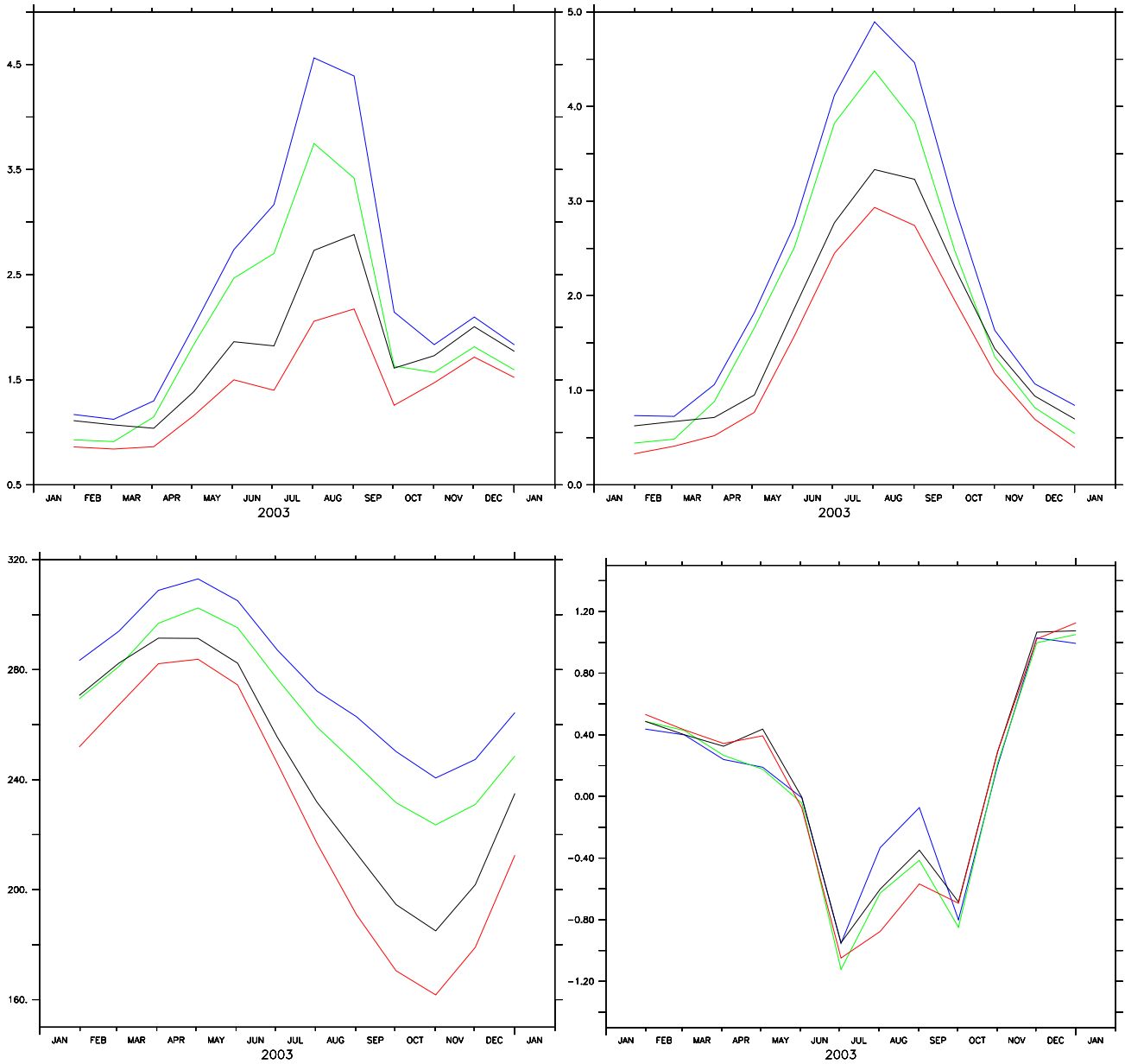


FIGURE 7 – Cycles annuels sur la zone d’Europe de l’est de la précipitation (en haut à gauche, en mm/jour), de l’évaporation (en haut à droite, en mm/jour), de l’humidité du sol (en bas à gauche, en mm) et de la différence entre évaporation et précipitation (en bas à droite en mm/jour) , calculés entre 2003 et 2008. Les courbes noires et rouges correspondent aux simulations réalisées avec la version 2 couches d’Orchidée, respectivement avec la physique standard et avec la nouvelle physique, les courbes bleues et vertes ont été réalisées avec la version à 11 couches.

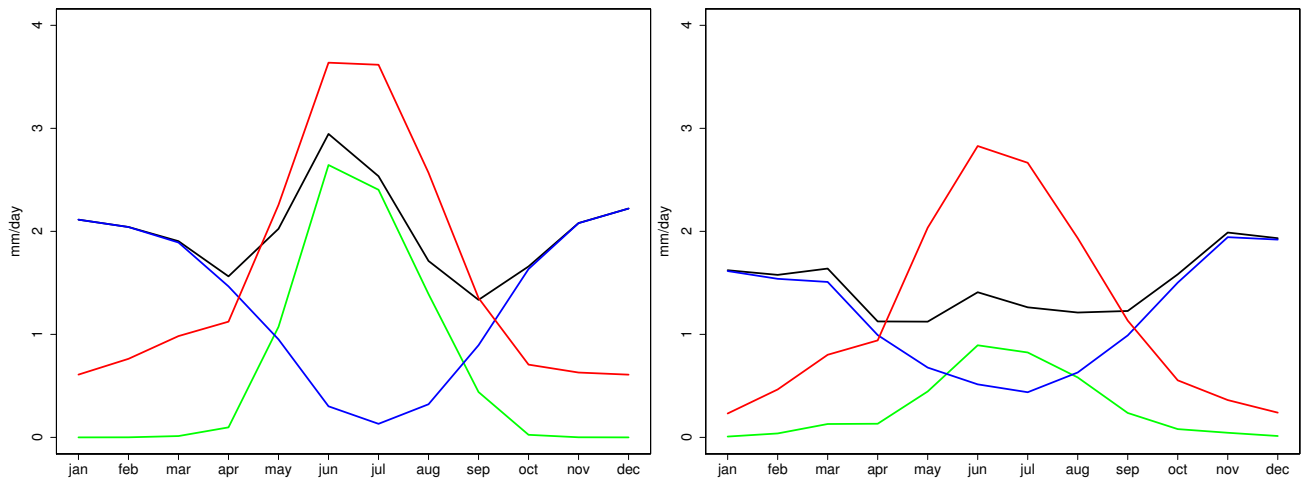


FIGURE 8 – Cycles annuels des précipitations totales (en noir), de l'évaporation (en rouge), de la précipitation convective (convection profonde, en vert) et de la précipitation "de grande échelle" (en vert). Données en mm d'eau par jour, moyennées sur la boîte d'Europe de l'est et sur les 156 ans de la simulation historique.

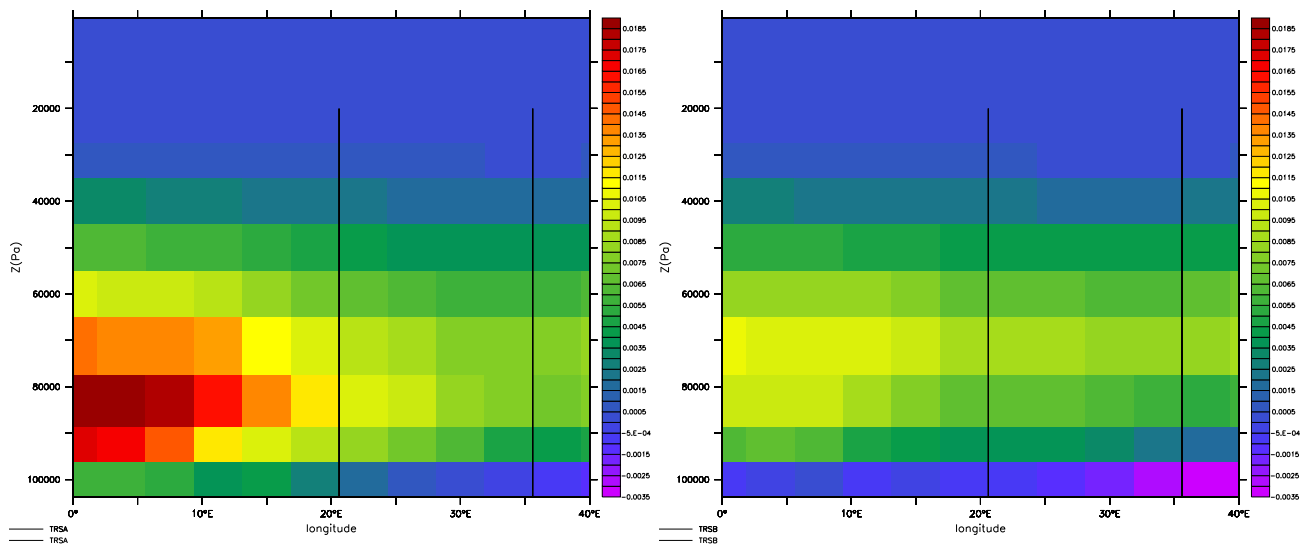


FIGURE 9 – Advection zonale d'humidité moyennée sur les latitudes de la zone d'intérêt et sur toute la durée de la précipitation (l'humidité est exprimée en kg d'eau par kg d'air, la vitesse zonale en $m.s^{-1}$). À la physique standard, à droite la nouvelle. Les barres verticales représentent les longitudes de la boîte.

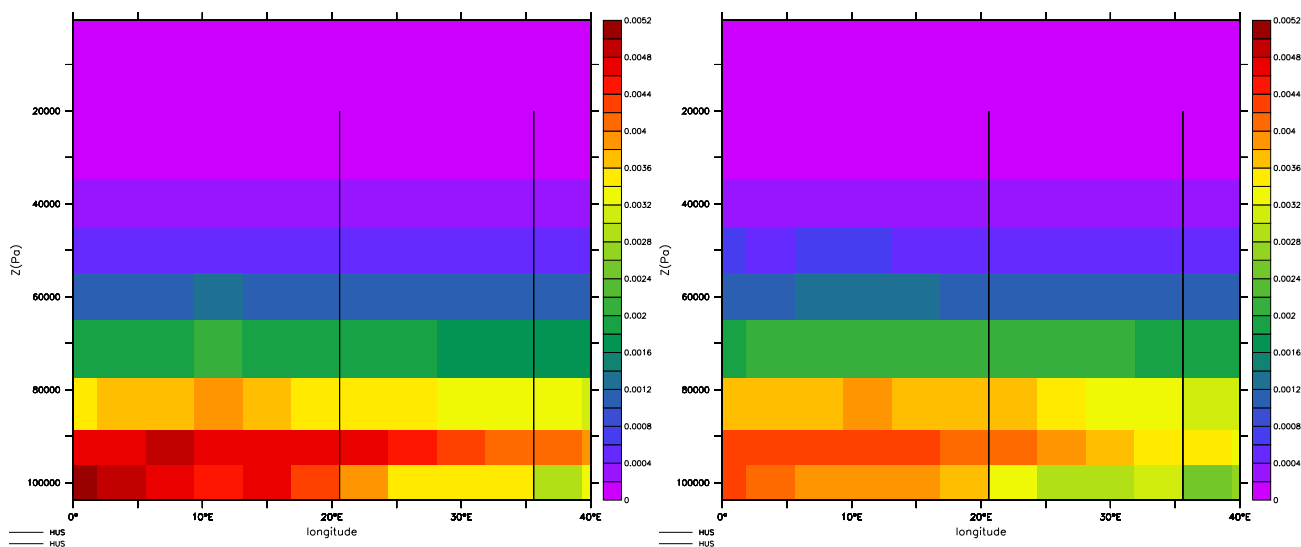


FIGURE 10 – Humidité spécifique dans la troposphère, en Europe, entre $47,4^{\circ}\text{N}$ et $54,9^{\circ}\text{N}$, en moyenne sur toute la simulation historique.

2.3 Formes des précipitations

On s'intéresse de plus près au type d'événements de pluies rencontrés et on regarde pour cela les sorties journalières de précipitations : si il a plu plus d'un demi mm, on peut considérer ce jour comme pluvieux. On peut alors en déduire l'intensité réelle des précipitations rencontrées, c'est à dire la quantité de pluies moyennées sur une période où il a effectivement plu. On définit également des jours de pluies modérées (comprises en 8 mm et 16 mm par jour) et des jours de fortes pluies (supérieures à 16 mm par jour).

Sur la Figure 11, sont présentés les nombres de jours de pluies ainsi que l'intensité moyenne de ces pluies, entre les mois de mai et septembre (période où la pluie convective est active). Sont également présentés le nombre d'évènements de pluies, c'est-à-dire le nombre de période continue de pluies (une succession continue de plusieurs jours pluvieux ne donnera qu'un seul évènement) et la longueur moyenne de ces évènements. Si toutes les variables présentées sont en moyenne réduites avec la nouvelle physique, la baisse la plus marquée concerne le nombre de jours de pluie sur la période. Si la moyenne de l'intensité est en effet significativement plus basse avec la nouvelle physique, la distribution est également plus large et la corrélation entre intensité et quantité totale de pluie est moins marquée (Figure 12). Cette analyse s'explique par le changement de l'importance relative des deux types de pluie : la figure 13 illustre en effet la bonne corrélation entre pluies convectives et nombre de jours de pluies alors que la figure 14 montre que, avec la physique B, les pluies de grande échelle sont bien corrélées à l'intensité. Ainsi de faibles pluies convectives entraîne un faible nombre de jours de pluie alors que des pluies de grande échelle renforcées tendent à compenser l'effet moyen sur l'intensité des pluies totales, mais en ajoutant de la variabilité.

Il faut néanmoins noter la limite de ce raisonnement qui est le rôle indirect de la baisse moyenne d'intensité et de l'augmentation de sa dispersion qui, à cause d'un critère fixe dans la définition d'un évènement pluvieux, entraînent mécaniquement une baisse du nombre de jours pluvieux.

3 Épisodes de sécheresses dans la simulation historique

Les différences moyennes entre les deux physiques ne présagent a priori pas de leurs comportement extrêmes et les méthodes utilisées par la suite permettent, a priori, de s'affranchir de la baisse d'humidité moyenne du sol lors du changement de physique car elles s'appuient sur des distributions de probabilités propres à chaque modèle. C'est en réalité sans compter la complexité du couplage sol-atmosphère : dès lors que l'humidité moyenne du sol est modifiée, on peut s'attendre à une modifi-

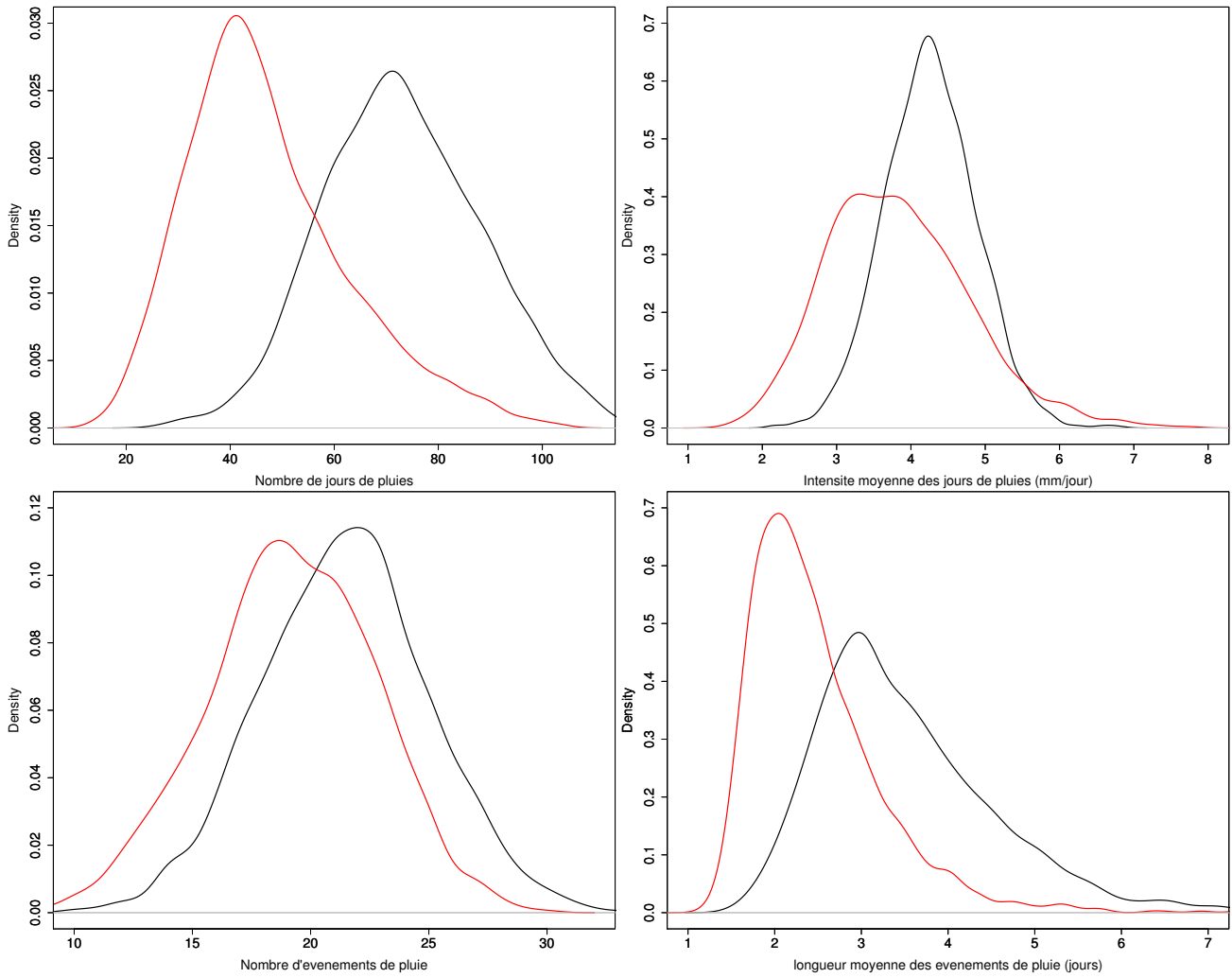


FIGURE 11 – Densités de distributions sur la période historique de caractéristiques des précipitations, sur une période entre mai et septembre. En noir pour la physique standard, en rouge pour la nouvelle.

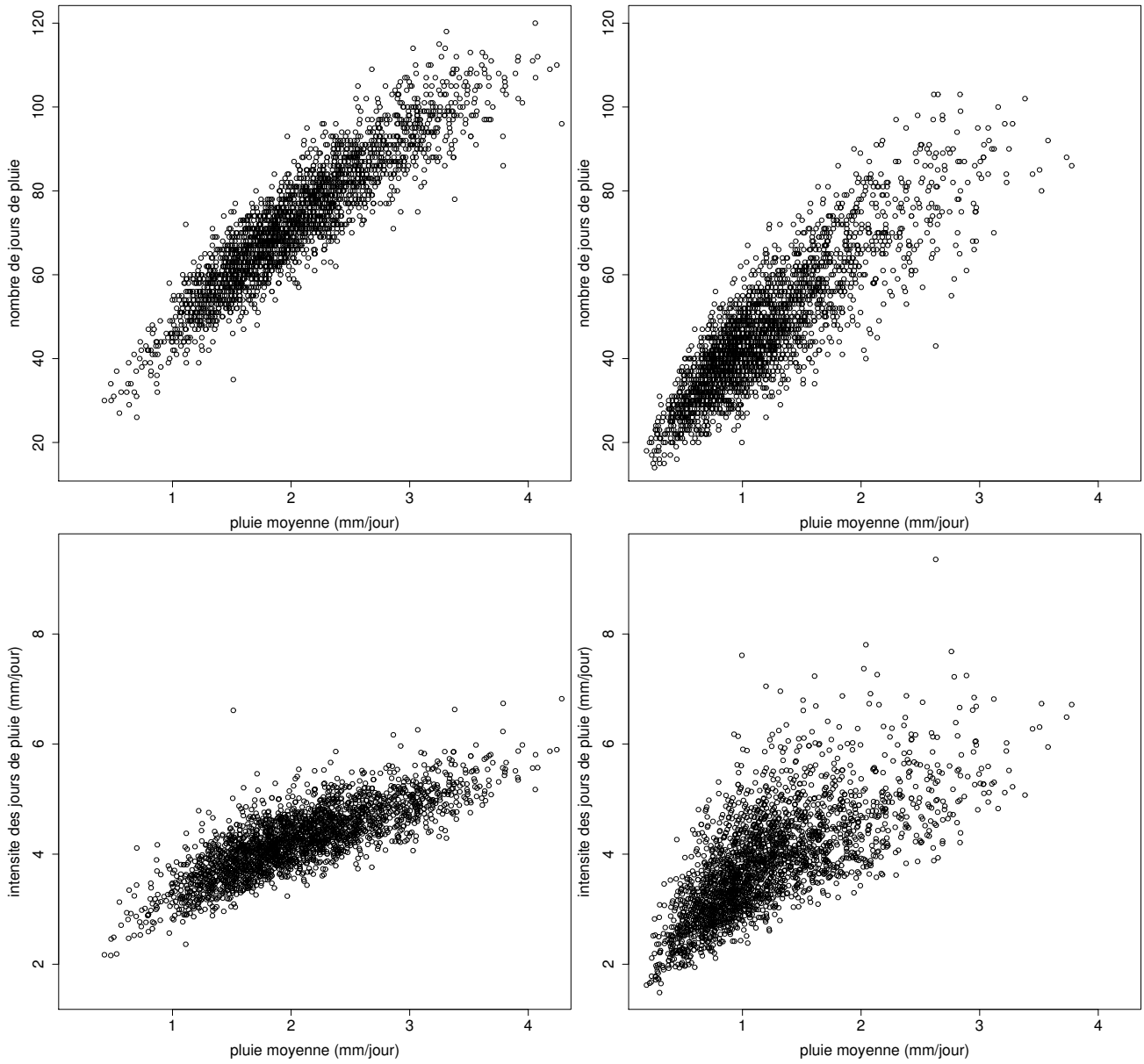


FIGURE 12 – Relations entre caractéristiques de la pluie, chaque point représente une valeur dans la zone d'intérêt, sur une période entre mai et juin. A gauche pour la physique A, à droite pour la physique B.

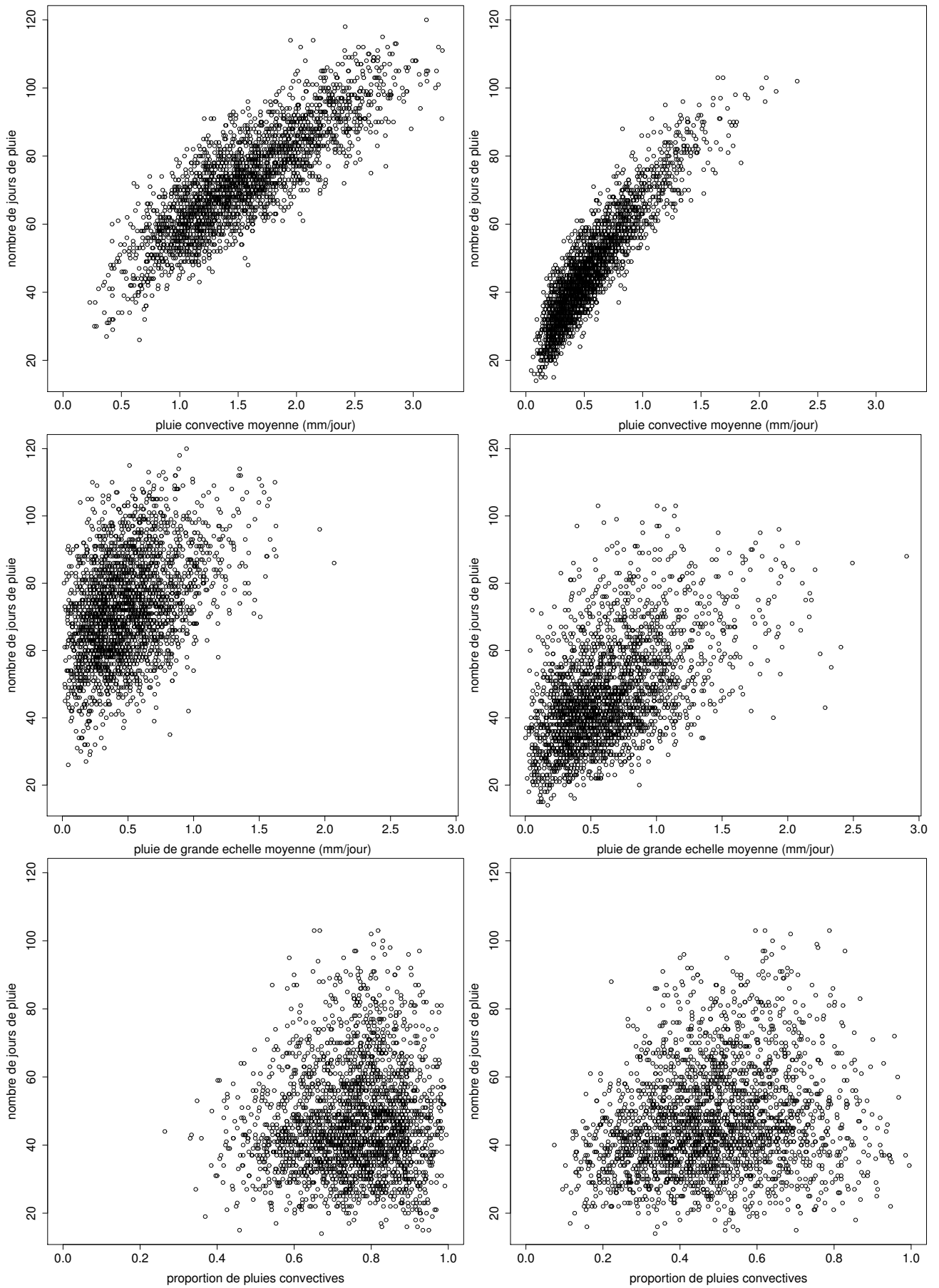


FIGURE 13 – Rôles respectifs des pluies convectives et des pluies de grandes échelles dans le nombre de jours de pluies entre mai et septembre. A gauche pour la physique A, à droite pour la physique B.

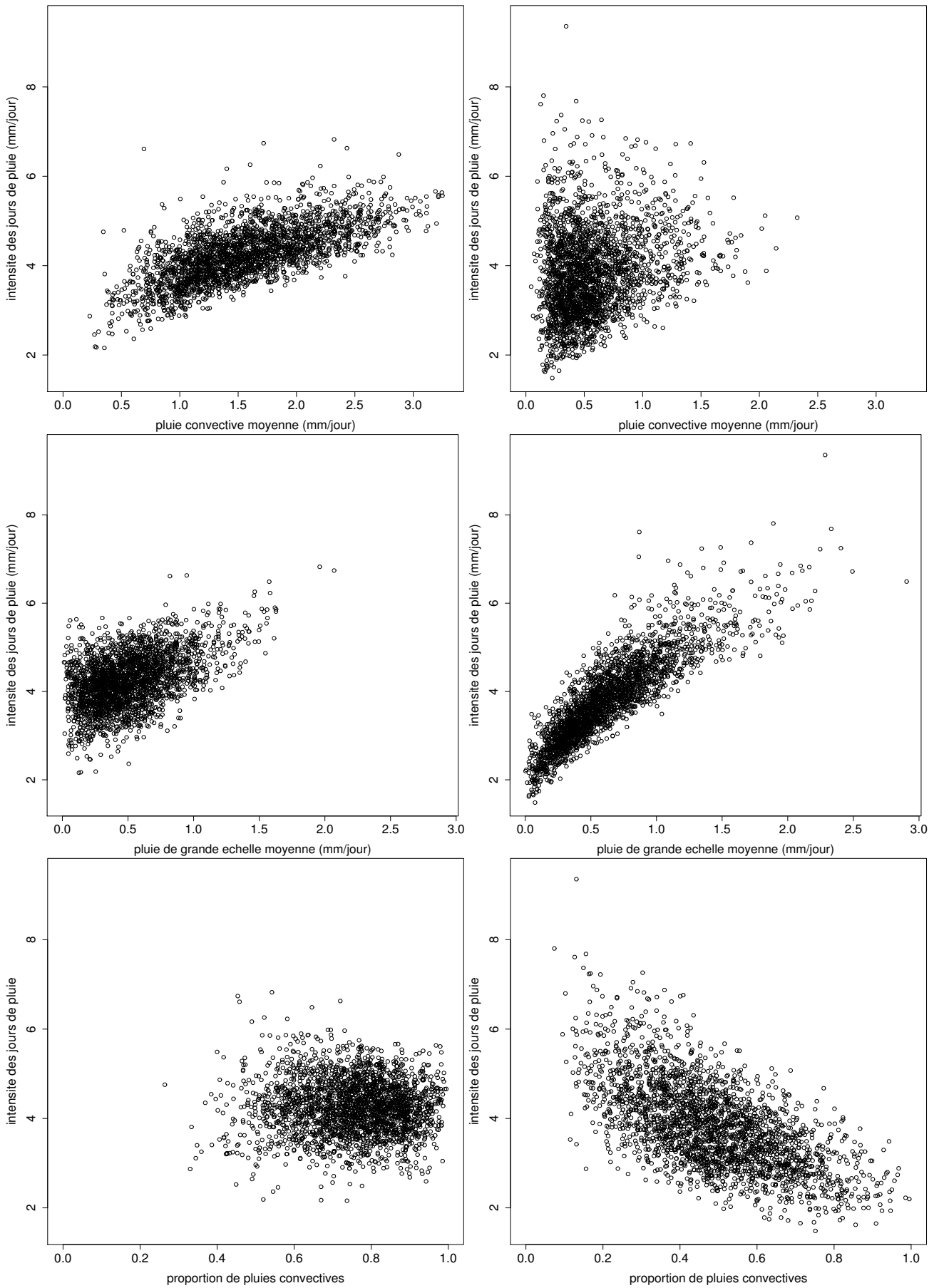


FIGURE 14 – Rôle respectifs des pluies convectives et des pluies de grandes échelles dans l'intensité moyenne de jours de pluies entre mai et septembre. A gauche pour la physique A, à droite pour la physique B.

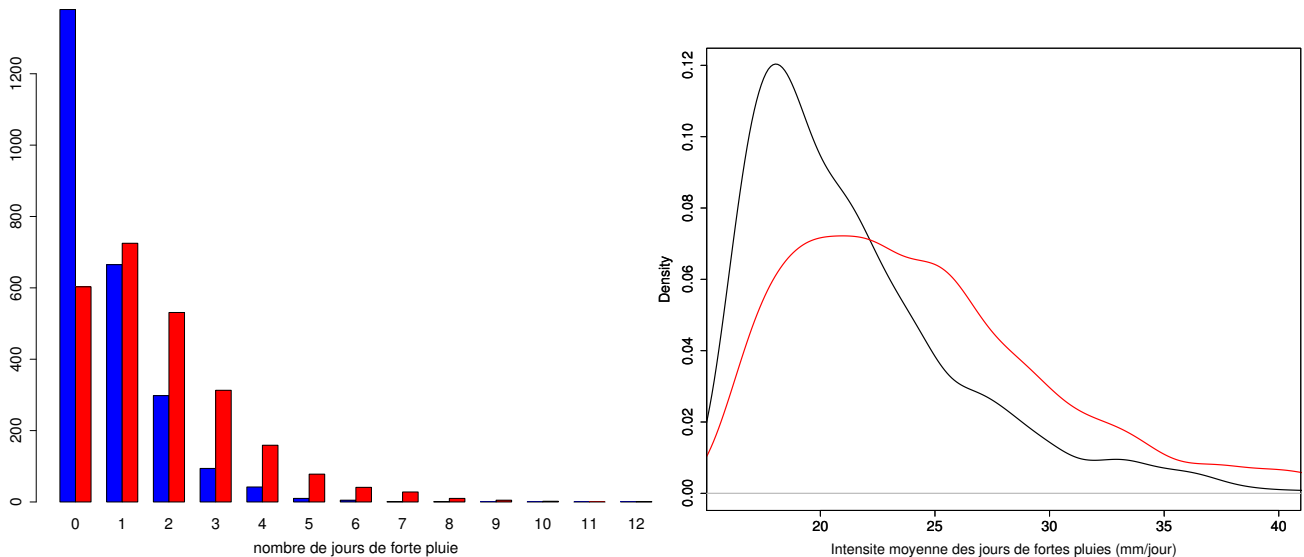


FIGURE 15 – Fortes pluies entre mai et septembre. En rouge dans la physique B. Dans l’histogramme à gauche la valeur en abscisse doit s’entendre comme un nombre de jour de forte pluie sur une période de 153 jours alors que la valeur en ordonnée est un nombre de points de la simulation

cation qualitative de la pluie, en particulier dans le déclenchement de la convection et il sera important de distinguer le rôle de la modification du champ moyen d’humidité de celui immédiat du changement de physique.

3.1 Méthode de Sheffield

La méthode décrite dans [9, 10] conduit, pour les simulations historiques, aux résultats présentés Figures 16, 17 et 18. Si la physique B conduit à des épisodes de sécheresse plus longs sur la zone d’intérêt, cette différence moyenne n’est pas significative. Compte tenu du mode de calcul, les intensités sont comparables, des sécheresses plus longues sont donc plus sévères. Ces résultats sont néanmoins à interpréter avec précaution, car les seuils de sécheresse sont fixés à partir de la simulation historique elle-même, il y a donc une contrainte sur le nombres de jours de sécheresse qui est constant sur chaque maille, pour chaque mois. Ainsi ces résultats ne permettent pas de conclure à un assèchement dans la physique B mais plutôt à une persistance facilitée qui, elle, peut être interprétée comme la conséquence de l’assèchement moyen des sols, qui rendrait donc plus difficile le déclenchement de la convection, donc d’une partie des pluies. Cette hypothèse est d’ailleurs accréditée par le fait que les événements secs les plus intenses apparaissent plutôt longs (Figure 19).

3.2 Évènements secs de septembre (ESS)

Afin de mettre en avant les liens entre humidité du sol et précipitations qui conduisent à des événements secs, une approche un peu différente a été adoptée. Si le critère pour définir un événement sec reste le premier décile d’humidité du sol, on s’intéresse plus particulièrement à l’apparition de ce type d’événement lors du mois de septembre et aux précipitations qui y ont conduit, la principale question posée étant de déterminer le comportement atmosphérique qui conduit à la sécheresse du sol en septembre.

Il y a deux motivations au choix du mois de septembre : tout d’abord, il s’agit du minimum annuel, les ESS sont donc potentiellement les événements les plus secs de la simulation, il aurait été moins pertinent de traiter des sécheresses du sol du mois de janvier... Un mois d’été aurait eu l’avantage d’avoir des enjeux agricoles, mais le modèle de sol à deux couches ne calculant pas l’humidité propre à la zone racinaire, ces enjeux auraient été dénaturés. La seconde raison que si l’on considère l’humidité du sol comme le résultat de la météo des mois précédents (voir 1.1), le mois de septembre récolte les

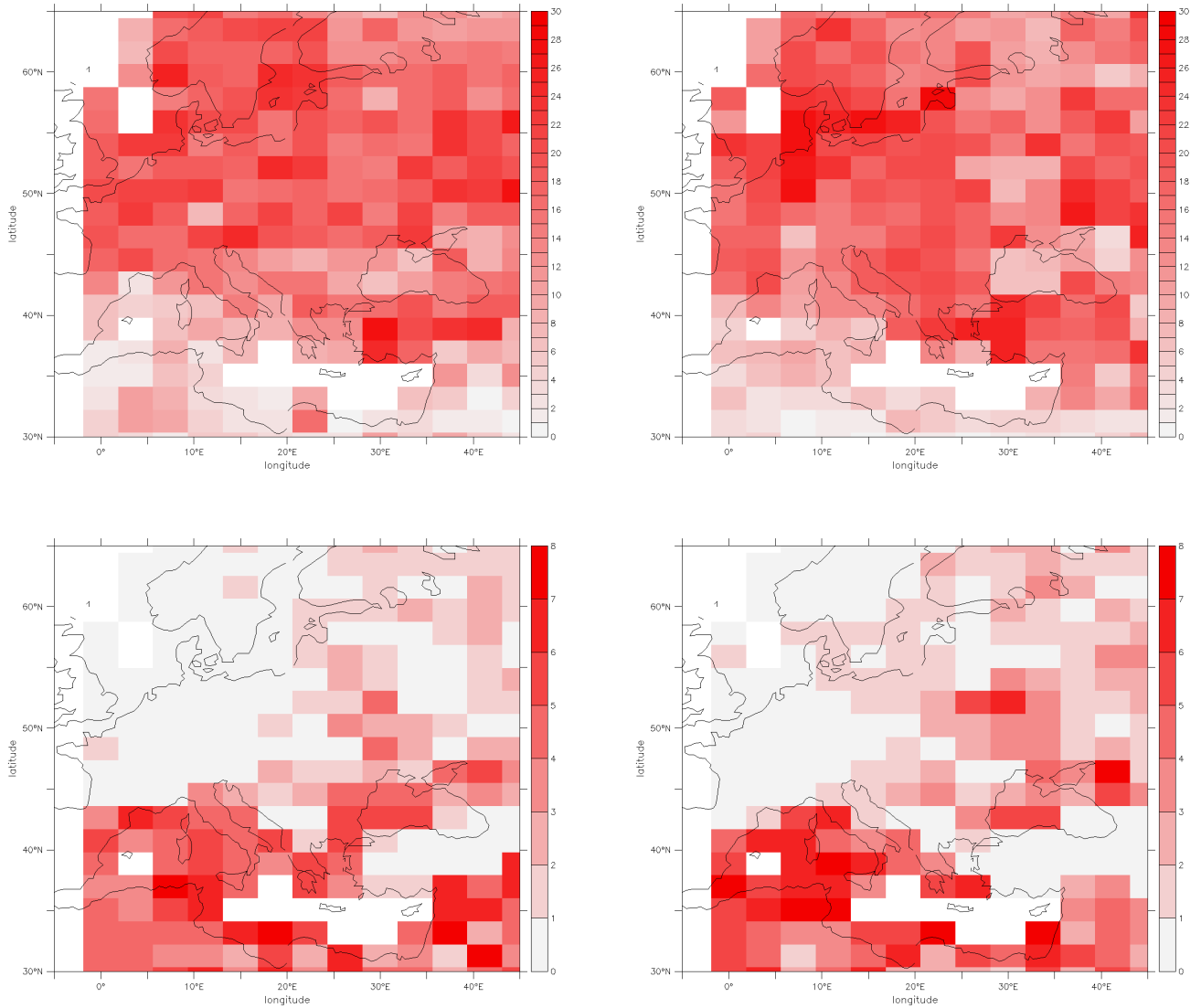


FIGURE 16 – Méthode de Sheffield appliquée à la simulation historique. En haut, nombre de sécheresses de courte durée, entre 3 et 6 mois. En bas, nombre de sécheresses de longue durée, plus de 12 mois. À gauche, physique A, à droite, physique B.

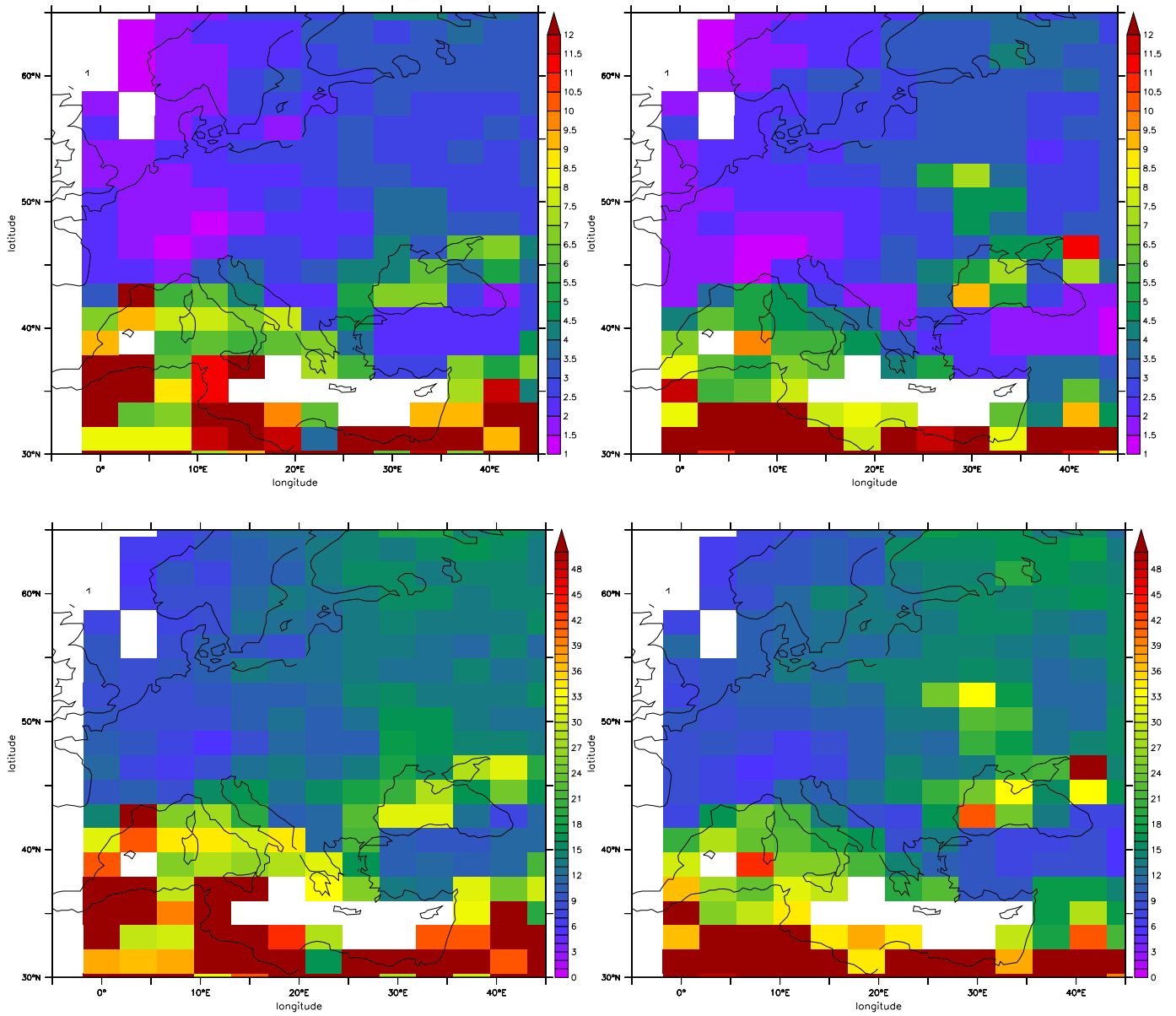


FIGURE 17 – Méthode de Sheffield appliquée à la simulation historique. En haut, durée moyenne (en mois) des sécheresses. En bas, sévérité moyenne (en % mois) des sécheresses. À gauche, physique A, à droite, physique B.

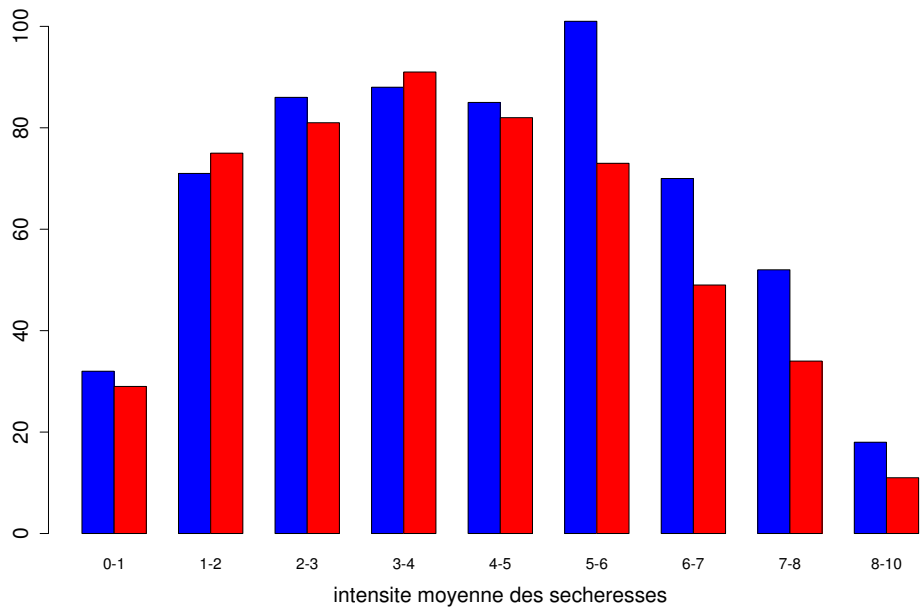
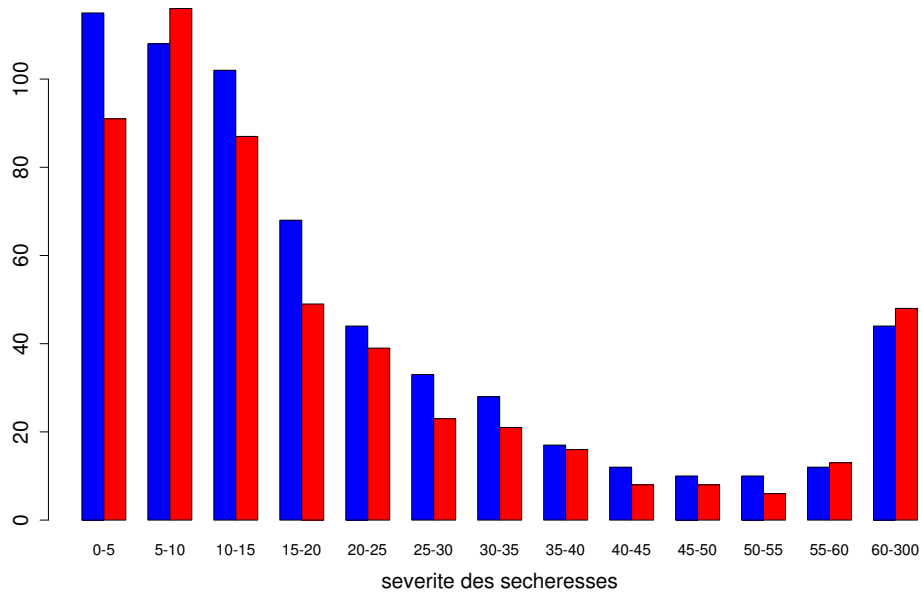
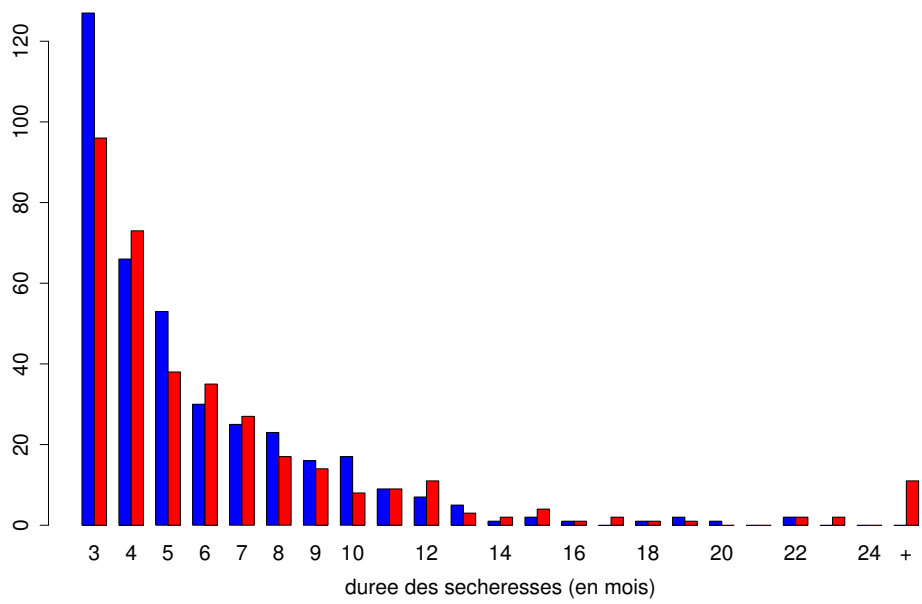


FIGURE 18 – Caractéristiques des sécheresses selon Sheffield apparaissant dans la zone d'intérêt dans la simulation historique. En bleu, physique A, en rouge, physique B.

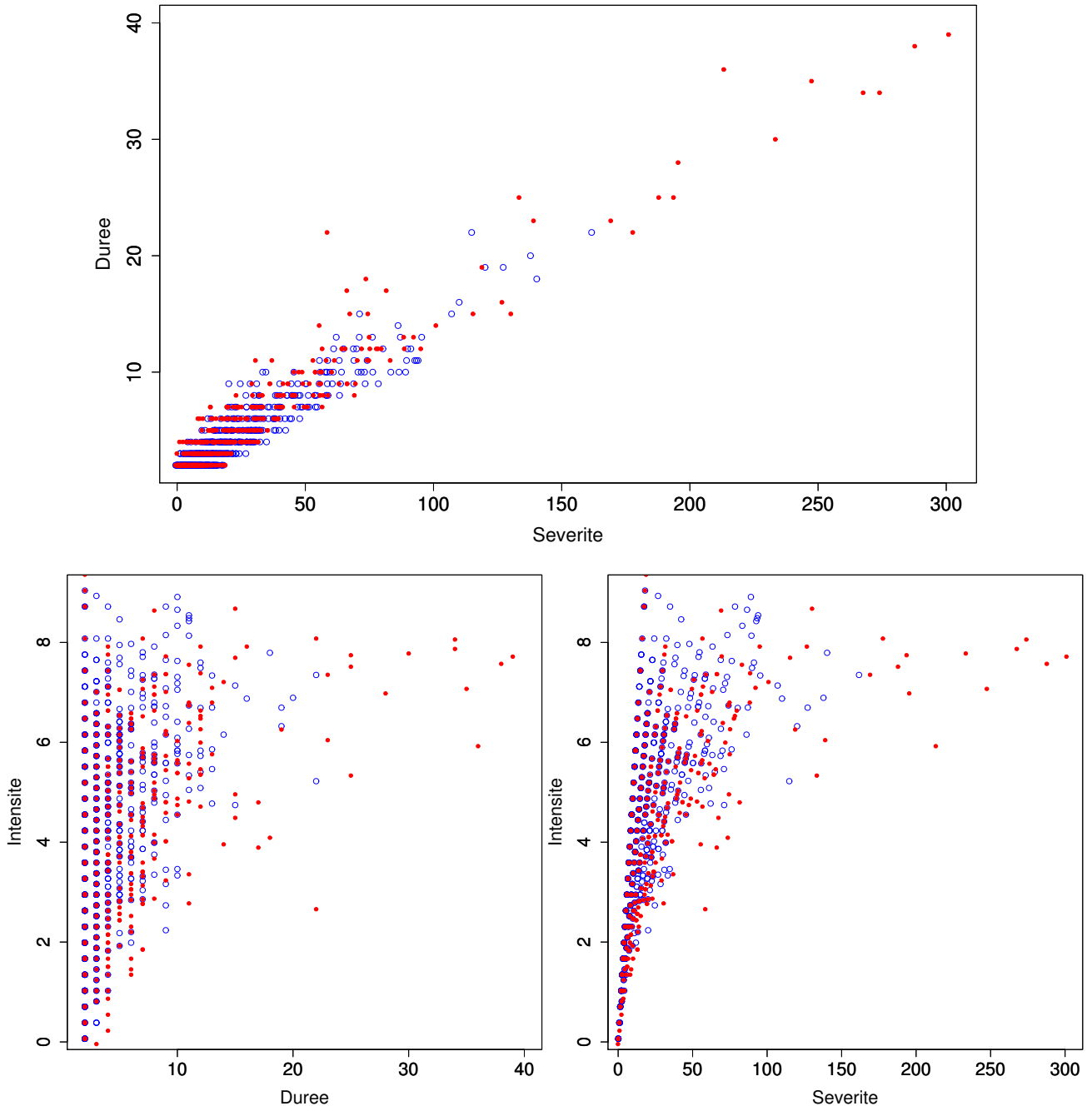


FIGURE 19 – Relations entre les caractéristiques des sécheresse de Sheffield apparaissant dans la zone d'intérêt pendant la simulation historique. En bleu avec la physique A, en rouge avec la physique B.

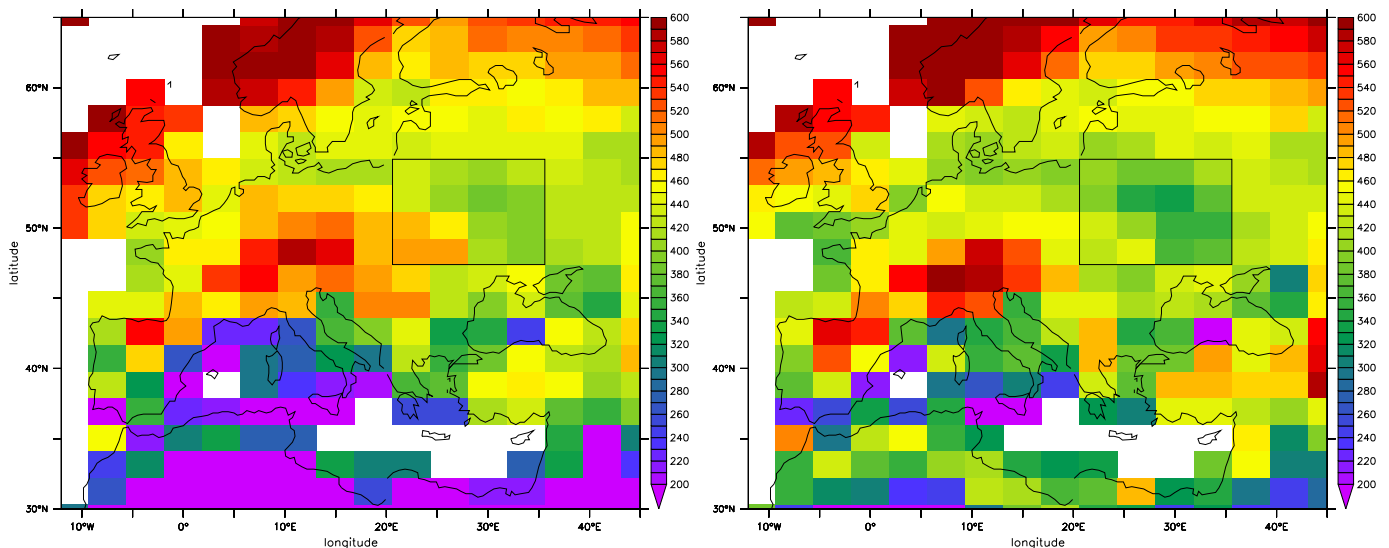


FIGURE 20 – Premier décile d’humidité du sol pour le mois de septembre, à gauche avec la physique A, à droite avec la physique B.

fruits. “intégrés” sur tout l’été, du déclenchement des pluies convectives et il est donc le mois le mieux placé pour étudier ce type de précipitations.

Les figures 21 et 22 indiquent que les événements secs de septembre sont entraînés par des faibles précipitations estivales, l’évaporation n’étant pas particulièrement forte. L’évaporation varie d’ailleurs sur une gamme de valeurs réduites puisqu’elle est bornée par l’évaporation potentielle qui correspond à l’évaporation qui a lieu si la capacité en eau du sol n’est pas limitante.

Les figures 23 et 24 permettent, quant à elles, de distinguer les rôles de la pluie convective et de la pluie de grande échelle. Dans la physique A, où la pluie convective est très largement majoritaire en été, on a pourtant une répartition des responsabilités entre les 2 types de pluies et dans la physique B, où l’importance relatives des pluies convectives est moindre, ce sont les faiblesse de la pluie de grande échelle qui entraînent dans la majorité des cas la sécheresse relative du mois de septembre. Les événements secs de septembre semblent ainsi beaucoup plus sensibles à l’intensité de la pluie de grande échelle.

L’étude de ce type d’événements secs est une bonne occasion de sonder plus avant la nature des événements de pluies. La figure 25 semble indiquer que la faiblesse des pluies entraînant des événements secs en septembre n’a pas la même origine pour les deux physiques. En effet, avec la physique standard, on observe que les événements secs de septembre sont précédés par un nombre de jours pluvieux plus faible, alors que avec la nouvelle physique, c’est l’intensité et non la fréquence de ces pluies qui est en jeu, celle-ci restant peu modifiés. Cette analyse est confirmée par les événements des fortes pluies dont le nombre diminue plus avant les ESS dans la nouvelle physique (Figure 26). On retrouve là l’influence de la pluie de grande échelle dont le rôle relatif dans l’intensité des pluies estivales est plus important dans la nouvelle physique (Figure 14), malgré des valeurs absolues de pluies de grandes échelles peu différentes (Figure 8).

4 Projections futures

Parmi les configurations proposées par CMIP5, les projections climatiques sont probablement les exercices les plus connus, car utilisés par le GIEC pour son rapport. Il s’agit de simuler le climat futur, avec des contraintes prescrites, correspondant à d’éventuels forçages anthropiques, notamment en termes de gaz à effet de serre ou d’aérosols. Les résultats de ces simulations, malgré les énormes incertitudes qu’ils contiennent permettent d’évaluer l’impact de l’homme sur le climat futur. Le principe de comparaison des modèles permet d’évaluer ces incertitudes et de les attribuer aux différents

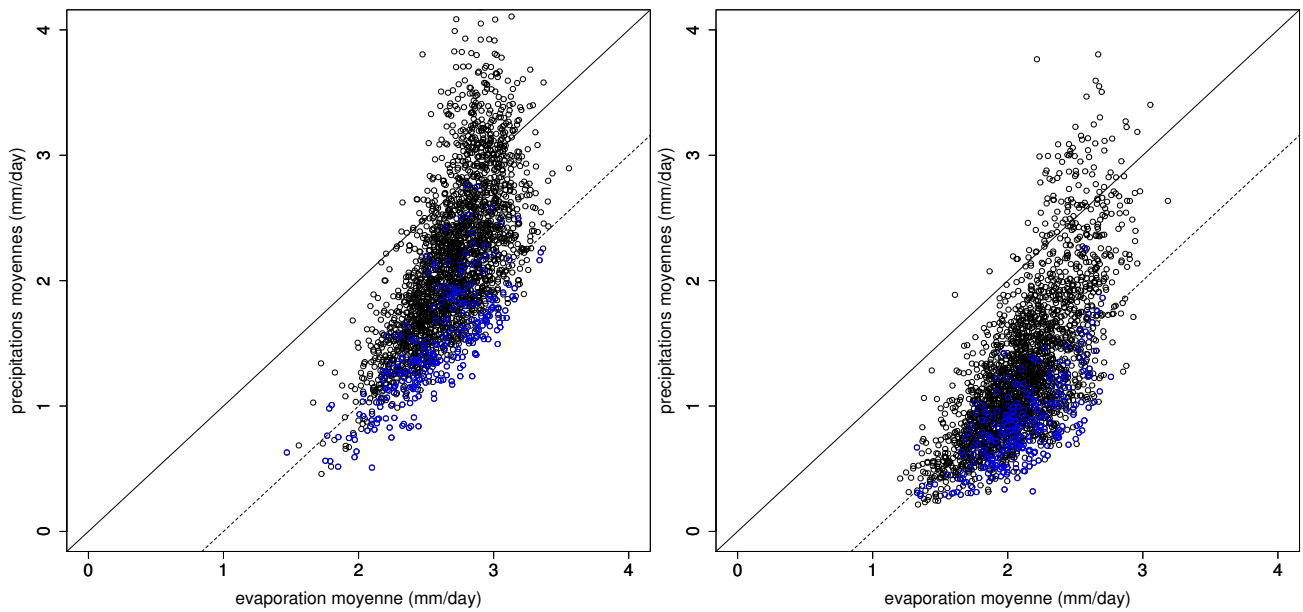


FIGURE 21 – Pluies et évaporation moyenne entre mai et septembre. Les points noirs correspondent aux valeurs, sur la zone d’intérêt et sur toute la simulation historique. Les points bleus correspondent aux valeurs précédents un évènement sec de septembre. À gauche la physique A, à droite la physique B.

phénomènes modélisés.

Si CMIP3 prévoyait les forçages en termes d’émissions, ce qui donna lieu aux scénarii du SRES, les scénarii futurs de CMIP5 s’exprime directement en termes de forçages radiatifs. On s’intéressera ici au scénario dit RCP85 (Figure 27), qui correspond aux forçages les plus sévères en termes d’effet de serre. Les simulations s’étendent de janvier 2006 à décembre 2010 (95 ans).

4.1 Description générale

Un premier état des lieux peut être dressé en suivant l’évolution au cours de la simulation de certaines variables représentatives. La température de surface moyenne sur tout le globe est souvent évoquée, son évolution est présentée Figure 28 de même que celle de la précipitation sur tout le globe. Comme prévu, la température augmente tout au long de la simulation (+5K sur 100 ans avec la physique standard, +3.5K avec la nouvelle physique), entraînant une accélération du cycle hydrologique ([11, 12]) et donc une augmentation des précipitations à l’échelle globale (+0.3mm/jour pour la physique A, +0.2mm/jour pour la physique B).

On s’intéresse également à l’évolution de ces variables sur les continents et en particulier sur la zone en Europe de l’est (Figures 29&30). Si l’augmentation de température est en moyenne plus marquée (+7k pour la physique standard, +5k pour la nouvelle) sur les continents, l’évolution du cycle hydrologique est plus faible (+0.2mm/jour de précipitations et +0.06mm/jour d’évaporation pour la physique A, +0.1mm/jour de précipitations et +0.05 mm/jour d’évaporation pour la physique B), en particulier sur la zone européenne où la plus grande dispersion des valeurs rend la hausse moins sensible. L’humidité du sol ne semble quant à elle pas significativement affectée.

On s’intéresse également à l’évolution du cycle annuel des variables hydrologiques : le tableau 3 et la figure 31 présente des cycles calculées sur 19 ans consécutifs.

Concernant l’humidité du sol, elle apparaît, avec la physique A, plus faible dans les projections, et avec la physique B, plus faible en été et plus élevé en hiver. Ces différences sont à comparer avec la variabilité interannuelle des simulations historiques, bien plus importantes (cf tableau 3 et Figure 6), il n’y a donc pas de lieu de penser que les sols s’assèchent, en moyenne, en Europe de l’est dans ce scénario, tant par rapport au run historique que au cours de la simulation.

Concernant les variables atmosphériques, on note vers la fin de la simulation (sur les deux derniers

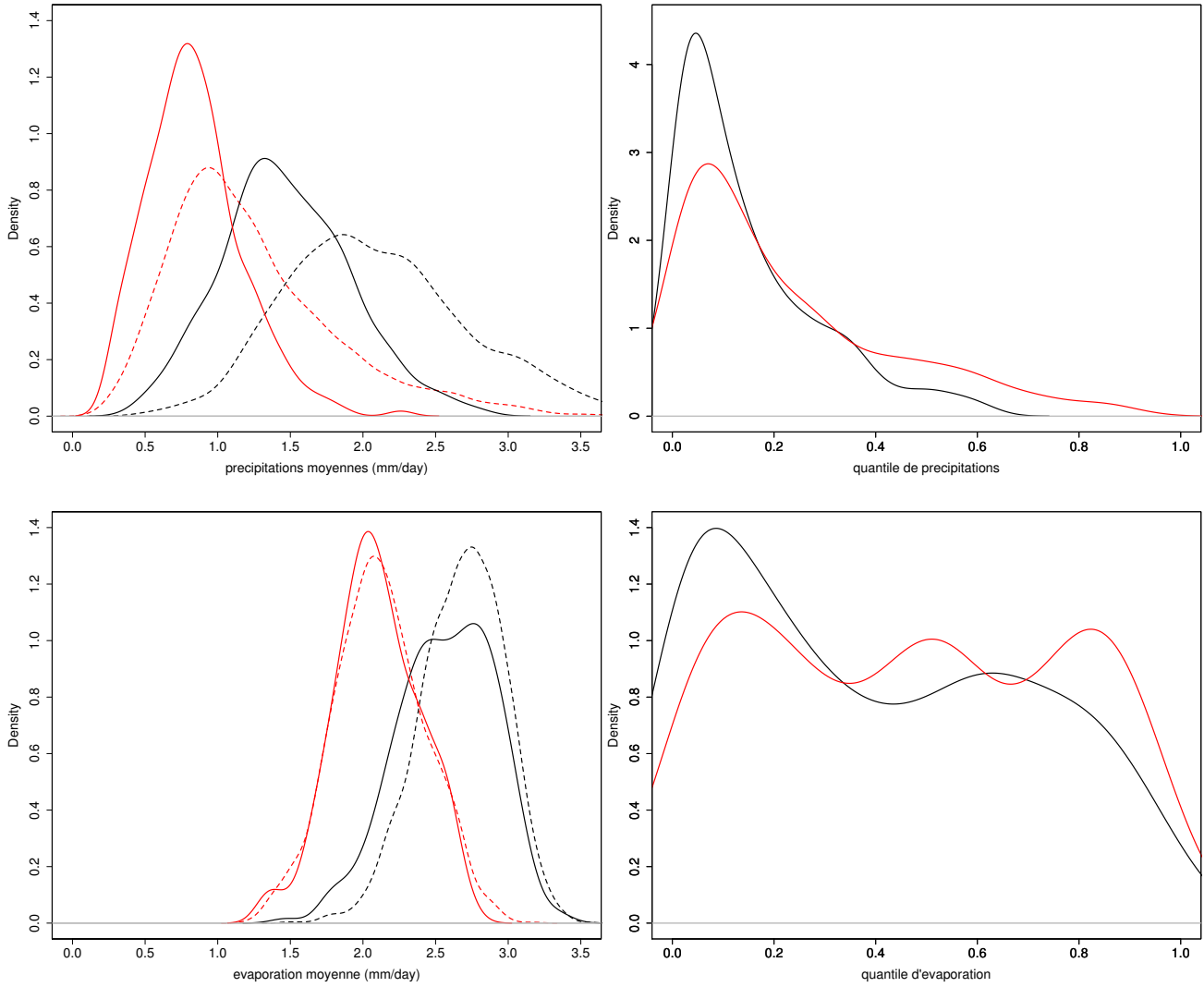


FIGURE 22 – Pluies et évaporation moyenne entre mai et septembre avant les évènements secs de septembre : à gauche, en traits pointillés, distribution sur toute la simulation, à droite, distribution des valeurs précédant un événement sec de septembre. À droite quantiles de la variable précédant un ESS. En rouge pour la nouvelle physique, en noir pour la physique standard.

	Réf.	σ	1-Réf.	2-Réf.	3-Réf.	4-Ref.	5-Ref.	2-1	3-2	4-3	5-4
Janvier	571	34	+10	+6	+14	-6	+7	-4	+8	-20	+13
	526	49	+6	+13	+26	+24	+36	+7	13	-2	+12
Février	582	28	+8	+6	+12	0	+6	-2	+6	-11	+6
	540	47	+7	+20	+30	+32	+42	+13	+10	+3	9
Mars	591	17	+4	+2	+6	-3	0	-2	3	-8	3
	564	38	+5	+18	+22	+25	+26	+14	+4	+3	0
Avril	594	8	0	-2	-1	-9	-5	-3	+2	-8	3
	585	23	+3	+2	+3	+4	0	-2	1	+1	-3
Mai	583	11	0	-3	-1	-12	-8	-4	+2	-11	4
	568	20	+1	-7	-2	0	-4	-8	+5	+2	-3
Juin	561	20	+2	-6	-3	-14	-14	-8	3	-11	0
	529	26	-1	-7	-6	-1	-3	-5	1	+4	-2
Juillet	529	29	+3	-14	-5	-26	-21	-17	+9	-21	+5
	481	30	0	-5	-14	-6	-8	-6	-8	+7	-1
Aout	494	35	-1	-15	-2	-24	-17	-14	13	-23	+8
	448	35	-4	-12	-18	-15	-15	-8	-6	+2	0
Septembre	479	40	+1	-11	+5	-22	-14	-12	+16	-27	8
	438	42	-6	-13	-17	-11	-19	-7	-4	+6	-7
Octobre	493	44	0	-9	+6	-24	-18	-9	+15	-31	6
	454	49	-4	-6	-11	-7	-15	-2	-5	+5	-9
Novembre	524	43	+1	-4	+11	-20	-11	-5	+15	-31	+9
	487	51	-4	-1	-5	+2	0	+3	-4	+7	-3
Décembre	553	38	+5	0	+13	-13	+1	-4	+13	-26	+14
	513	51	0	+6	+5	+15	+81	+6	-2	+10	+3

TABLE 3 – Cycles annuels d’humidité du sol (en mm). Pour chaque mois la première ligne correspond à la physique standard, la seconde à la nouvelle physique. La première colonne correspond à la valeur moyenne dans la simulation historique, la seconde à l’écart type pluriannuelle dans cette simulation et les suivantes aux différences entre cette simulation et différentes périodes du run RCP85. Chacune de ces périodes dure 19 ans et elle ne se chevauchent pas.

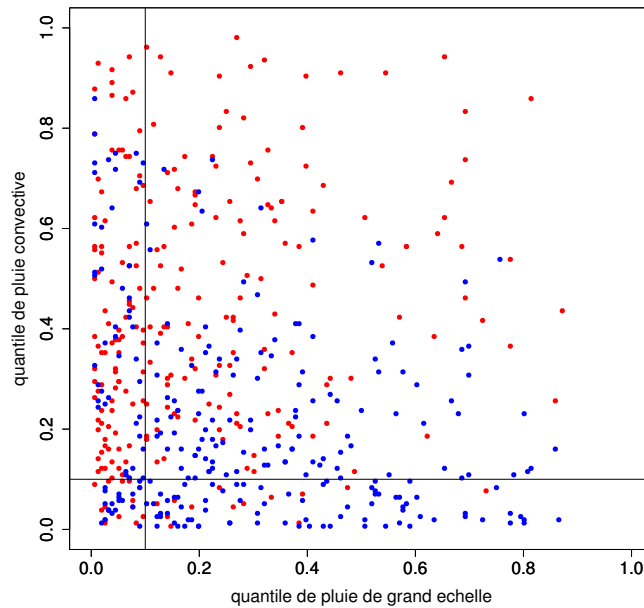


FIGURE 23 – Quantiles de pluies convectives et de grande échelle précédant un évènement sec de septembre. Ce quantile est calculé dans la distribution que forment les valeurs moyennes entre mai et septembre, tout au long de la simulation historique. En bleu pour la physique standard, en rouge pour la nouvelle physique.

cycles, soit de 2063 à 2100) que la convection est réduite (pluies et évaporation) alors que dans la physique B, elle est plus facilement déclenchée, au détriment de la pluie de grande échelle. Si dans la physique B, on peut expliquer cette convection accrue par l’accélération du cycle hydrologique dans une situation où la convection a du mal à se déclencher, on peut avancer deux arguments pour justifier la moindre convection dans la première simulation : le déclenchement de la convection peut être rendu plus difficile par l’abaissement de l’humidité du sol à cette période dans la simulation A et alors la chaleur sensible aurait un rôle plus important mais aussi l’augmentation des évènements extrêmes entraîne une saturation du sol, augmentant l’écoulement de l’eau et la retirant de fait du cycle hydrologique local où elle aurait pu être recyclée.

4.2 Méthode de Sheffield

Les sécheresses sont un des sujets majeurs des projections climatiques ([13, 14]), en particulier dans les scénarii “pessimistes”, car leurs conséquences sur l’homme sont préoccupantes. Les évènements extrêmes, tant dans leur fréquence que leur intensité sont le principal sujet d’inquiétudes, devant un assèchement global conséquent.

On reproduit la méthode décrite précédemment en l’appliquant cette fois au projections climatiques, mais en gardant le seuil provenant de la simulation historique : il n’y donc plus la contrainte d’un nombre de jours secs fixes et on peut ainsi mesurer un éventuel assèchement, au sens de Sheffield, vis-à-vis du run historique. Les conclusions précédentes quant aux cycle annuel moyen permettent de s’affranchir de l’obstacle que constituerait un assèchement moyen, qui entrainerait avec cette méthode des épisodes de sécheresses, presque mécaniquement. Les résultats pour la zone d’Europe de l’Est sont présentés sur les figures 32. On constate deux comportements très différents pour les deux physiques : la simulation réalisée avec la nouvelle physique franchit beaucoup moins fréquemment le seuil de sécheresse que celle réalisée avec la physique standard, on a donc moins d’épisodes secs, particulièrement les longs, la différence se ressent donc également sur les sévérités. On observe en particulier une forte recrudescence des épisodes secs des 2075, phénomènes à rapprocher de celui observé figure 30 qui montre que, à cette date, l’humidité du sol dans la simulation A se met à osciller avec une plus grande amplitude, atteignant des valeurs plus basses. La méthode employée ici permet donc d’observer, dans

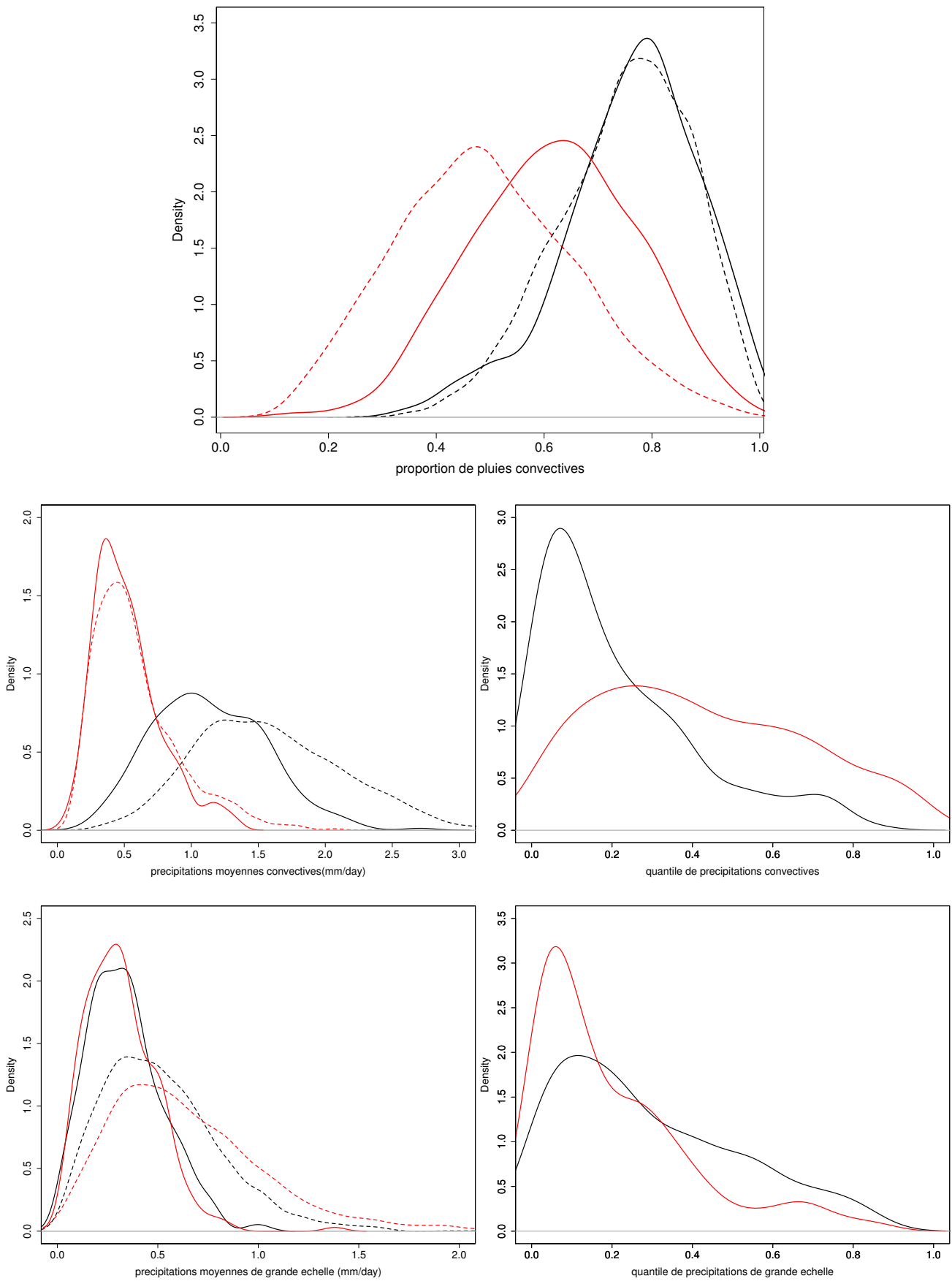


FIGURE 24 – Type de précipitations précédant les événements secs de septembre. À droite, distribution des valeurs prises au cours de la simulation (traits pointillés) et quand septembre est sec (traits pleins). À droite, distributions des quantiles que représentent les valeurs précédant un ESS, au sein de la distribution totale, sur toute la simulation historique.

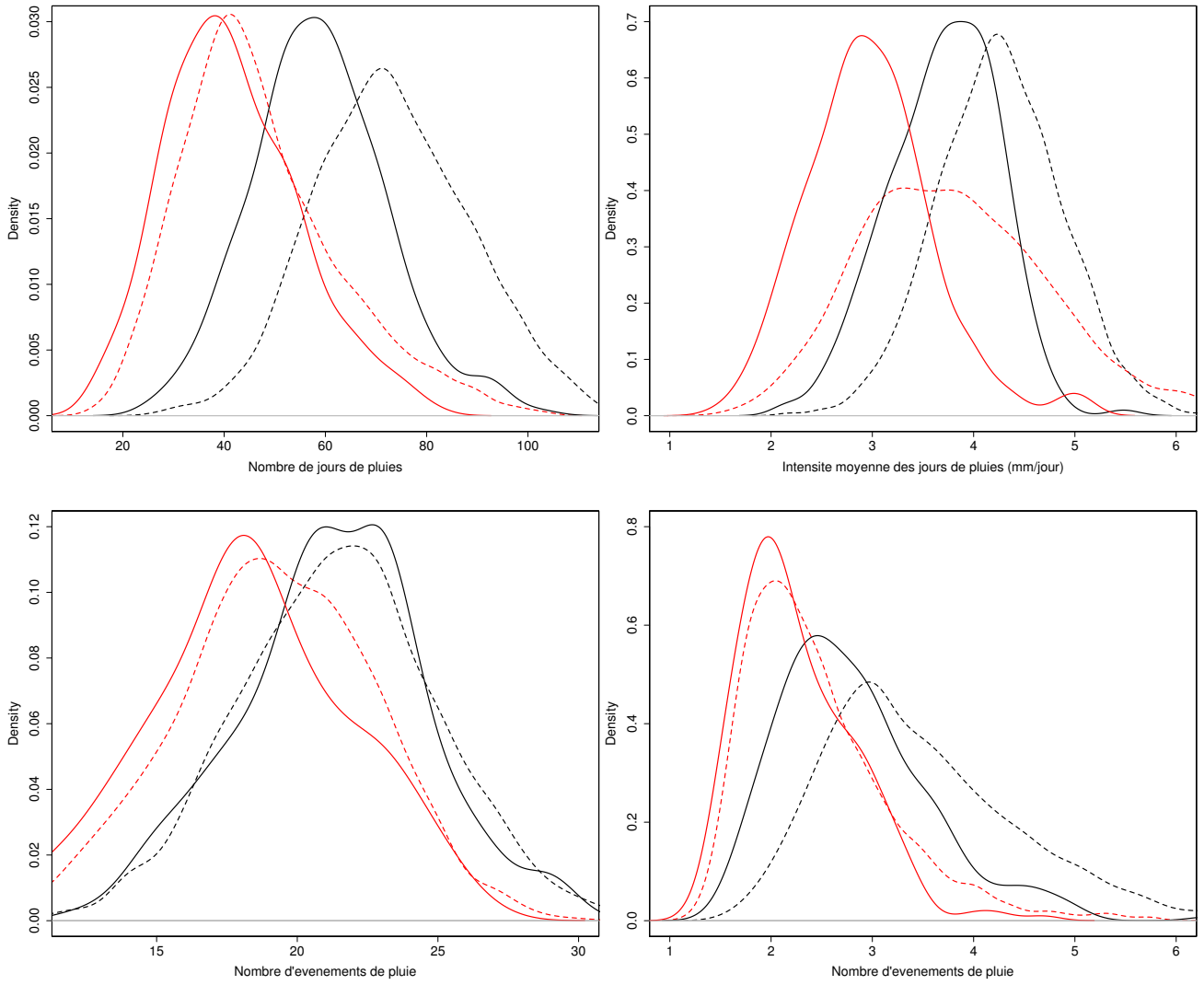


FIGURE 25 – Caractéristique de la pluie avant les ESS (traits pleins) et dans toute la simulation (traits pointillés).

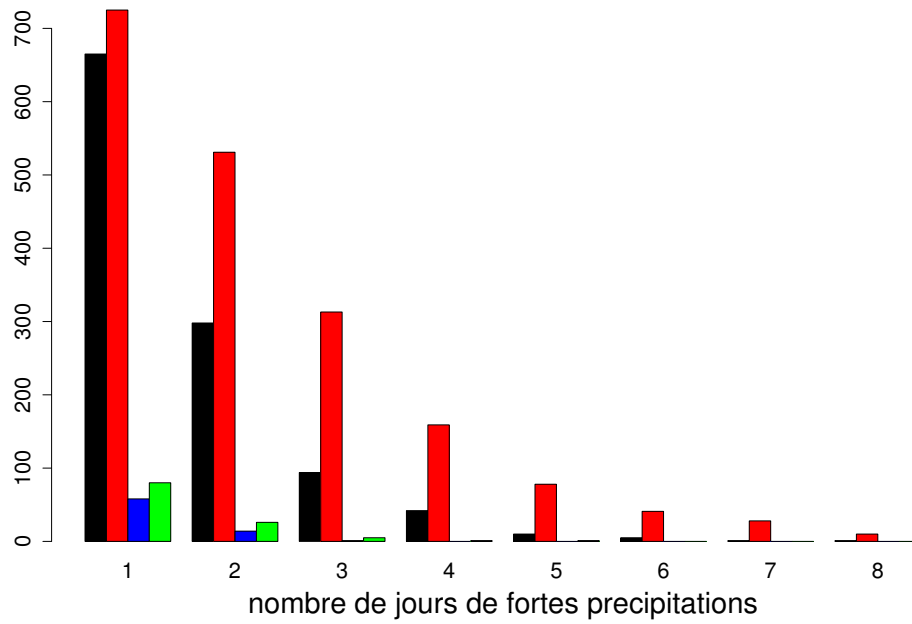


FIGURE 26 – Distribution des valeurs (sur toute la simulation, sur la zone en Europe de l’est) du nombre de jours de fortes pluies entre mai et septembre. En noir pour toute la simulation avec la physique A, en rouge pour toute la simulation avec la physique B, en bleu, quand septembre est sec avec la physique A, en vert, quand septembre est sec avec la physique B.

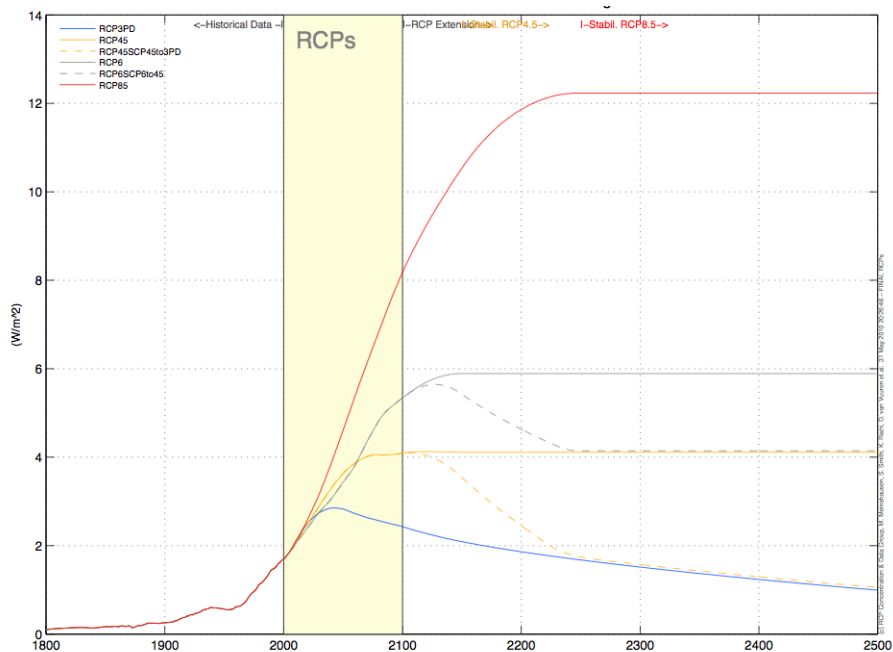


FIGURE 27 – Forçages radiatifs dans différents scénarii, la courbe rouge représente le scénario étudié ici.

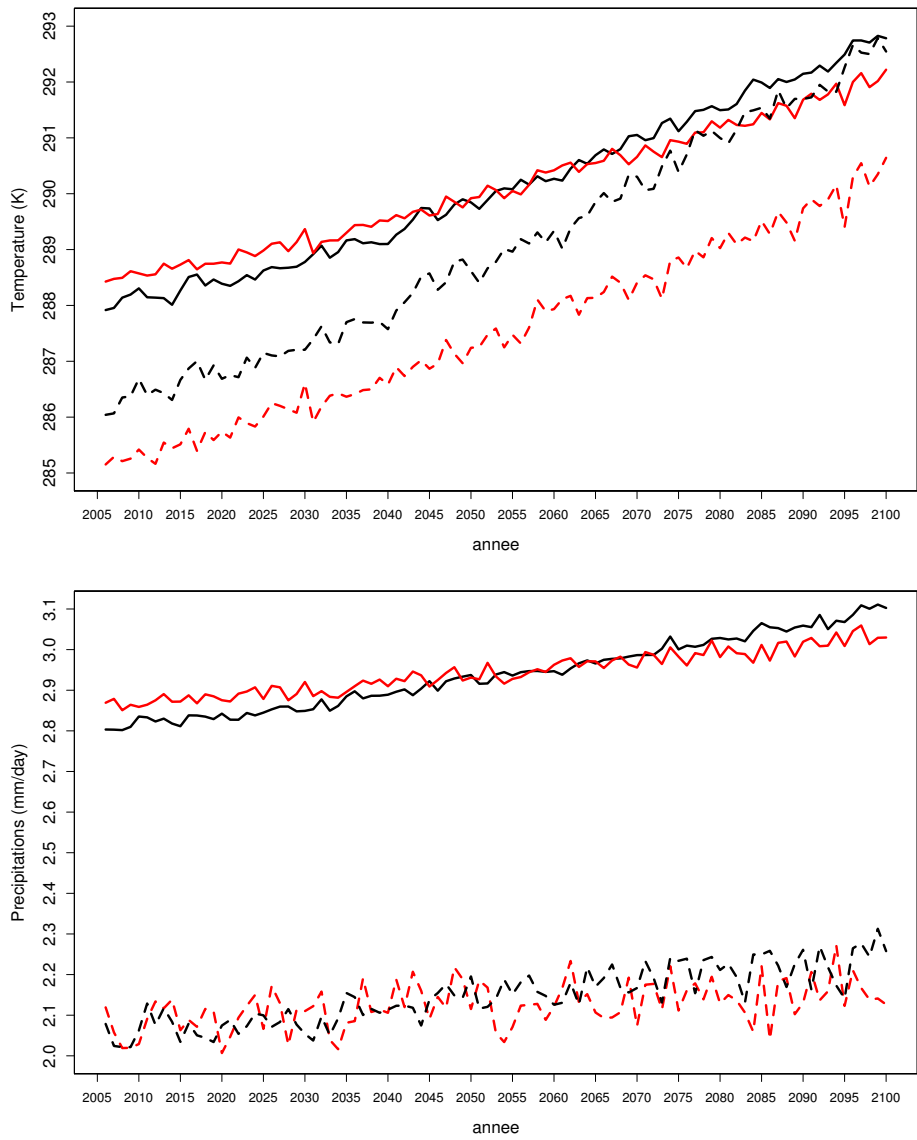


FIGURE 28 – Evolution de la température de surface et des précipitations dans le scénario RCP85. Les traits pleins représentent la moyenne sur toute la planète (sauf glaciers), les pointillés, uniquement sur les continents.

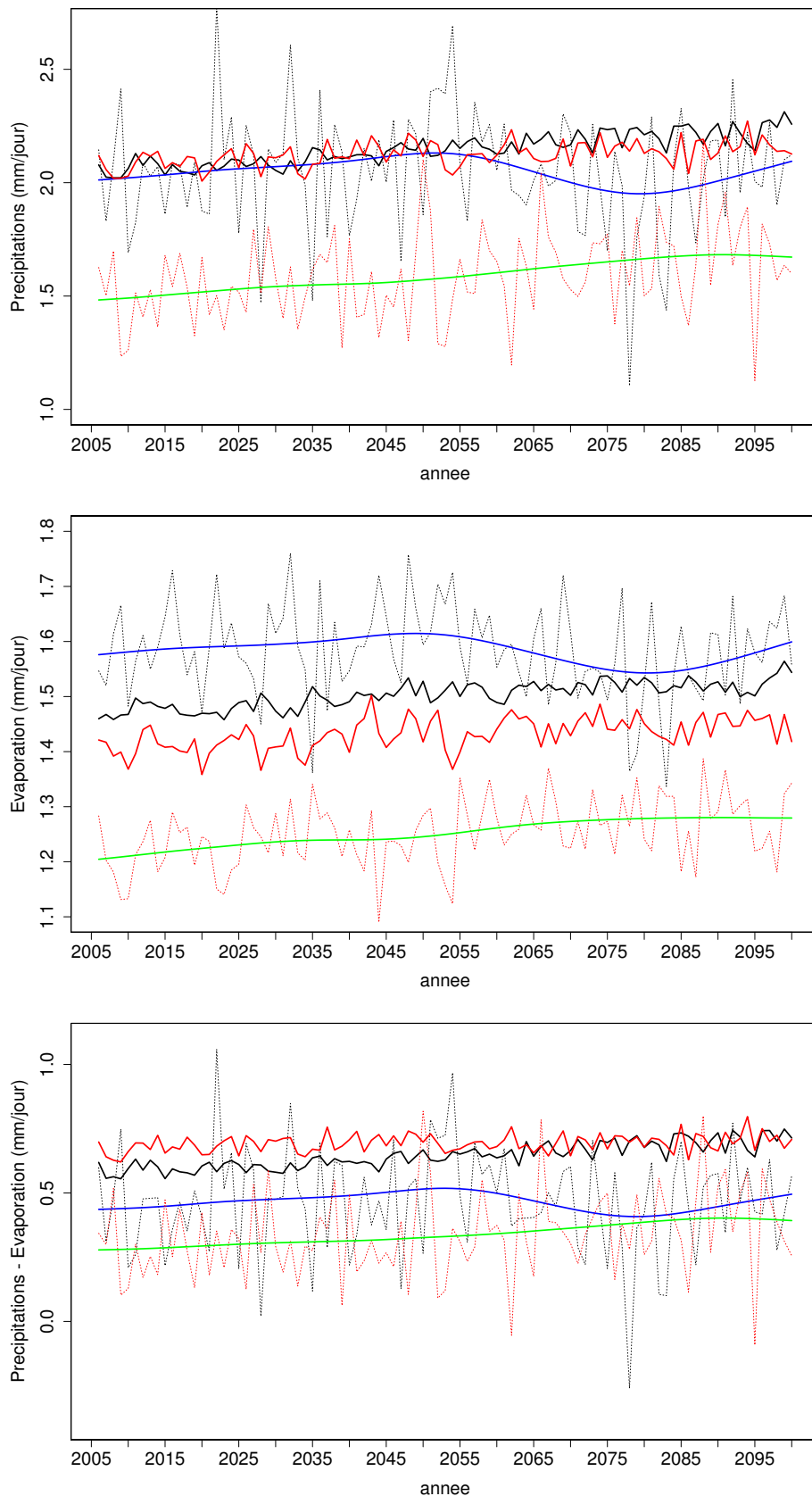


FIGURE 29 – Evolution des précipitations, de l'évaporation et de la différence des deux. En traits pleins noir et rouge pour la moyenne sur les continents respectivement dans la physique A et la physique B, en pointillés pour la moyenne sur l'Europe. Les traits bleu et vert correspondent à un lissage des moyennes sur l'Europe via une fonction de spleen d'ordre 5.

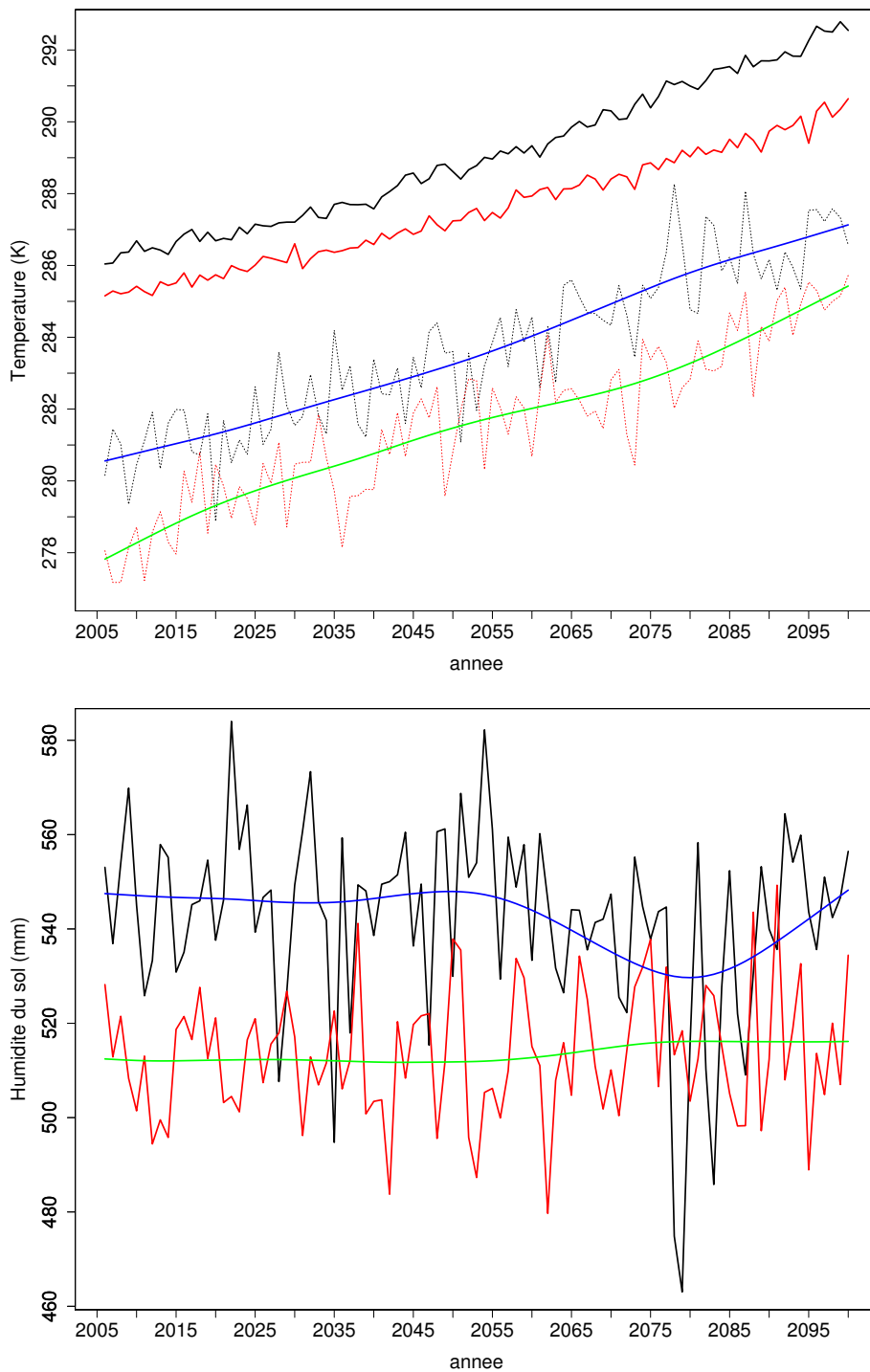


FIGURE 30 – Idem Figure 29 pour la température de surface et l'humidité du sol (sans la moyenne sur les continents pour cette dernière).

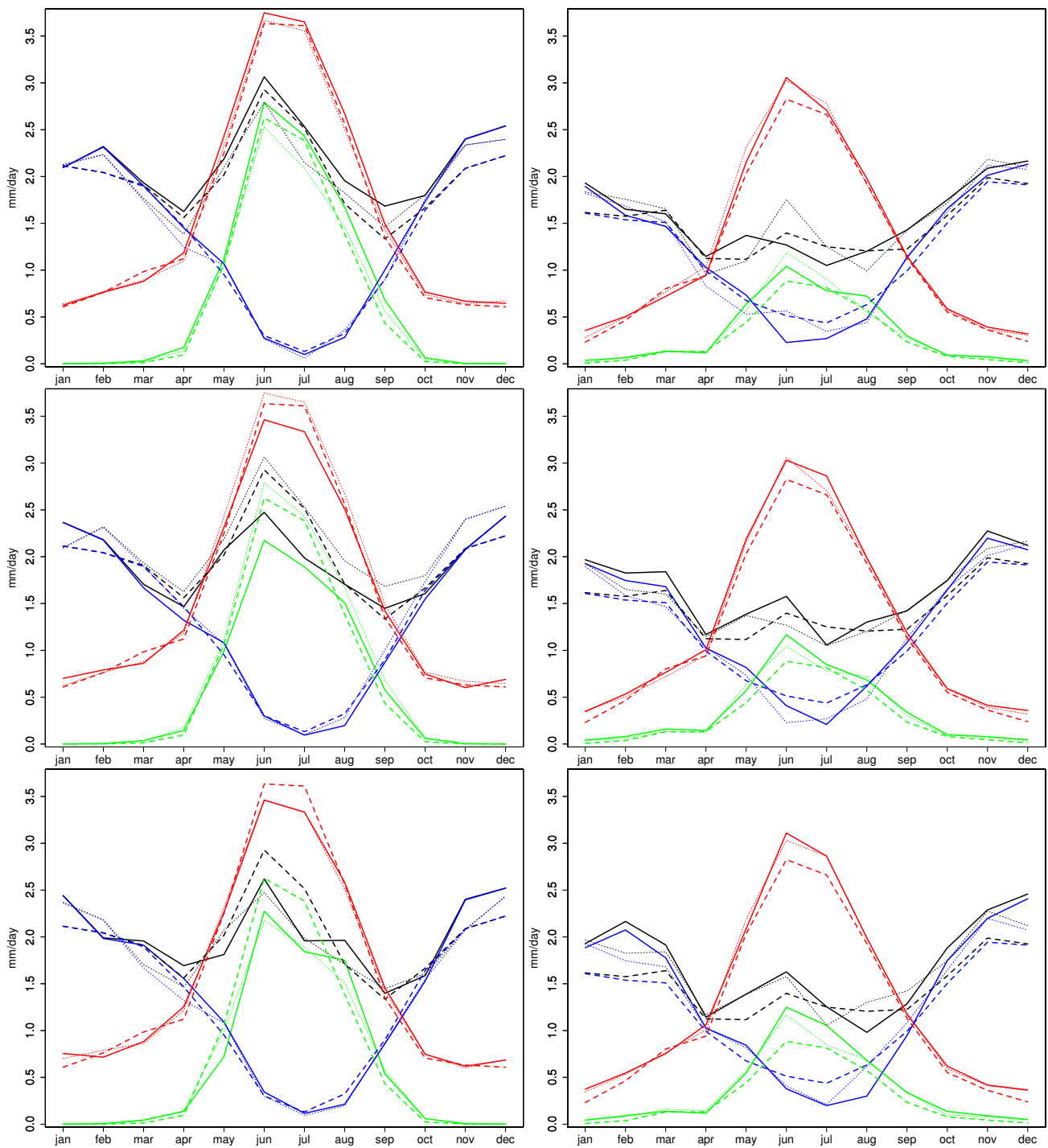


FIGURE 31 – Cycles annuels des précipitations et de l'évaporation dans la simulation RCP85, sur des périodes différentes : la première ligne correspond à 2044-2062, la deuxième à 2063-2081, la troisième à 2082-2100. Le code couleur est le même que pour la figure 8. Dans tous les cas les traits pleins correspondent à la période considérée, les pointillés légers à la période précédente et les pointillés épais à la période historique. À gauche pour la physique A, à droite pour la nouvelle physique.

ce scénario, non pas un assèchement du sol mais une augmentation des phénomènes extrêmes.

Cette faible réaction du cycle hydrologique, en particulier avec la nouvelle physique est inattendue et repose la question de l'efficacité du couplage sol-atmosphère avec la nouvelle physique ([15]). Il faut également remettre en question les indicateurs, produits d'un parti pris dans la définition des sécheresses et de leurs manifestations et qui ne réagissent pas tous de la même manière aux forçages et au changement climatique ([16, 17])

Conclusion

La nouvelle physique atmosphérique du LMDZ, dans laquelle la paramétrisation des nuages, le déclenchement et la fermeture de la convection profonde et les mécanismes de couche limite ont été conceptuellement modifiés, permet de résoudre plusieurs problèmes récurrents de la physique standard, par exemple l'heure de la journée à laquelle se déclenche la convection ([4]). Ce rapport pointe néanmoins certaines insuffisances telles que le déplacement des zones de fortes pluies intertropicales, les pluies estivales en Europe de l'est, les mouvements de grandes échelles tels les storm tracks ou encore le peu de réaction aux forçages anthropiques sévères.

La question de la définition de ce qu'est une sécheresse et de la représentation qu'en donne un modèle, qui ne simule pas toujours les variables pertinentes compte tenu du type de sécheresse considéré, a été présente pendant toute la durée de ce stage. Il n'y en a pas une définition unique et un parti pris est nécessaire pour pouvoir proposer une évaluation des simulations, quitte à en changer en cours de route afin de rester lucide et réaliste quant aux attentes que le climatologue a envers son modèle.

La poursuite naturelle de cette étude serait en premier lieu d'éclaircir le rôle exact du modèle des thermiques dans l'augmentation des pluies dites de grande échelle, par exemple en observant le moment de la journée auquel se déclenche les pluies (grâce aux sorties de simulations moyennées toutes les 3 heures), la pluie suscitée par le modèle du thermique donc d'origine convective étant attendue à l'heure du thé. La deuxième question scientifique à s'inscrire dans la continuité de ce travail est celle du rôle de la végétation dans les projections climatiques. On attend en effet d'importantes rétroactions [18], notamment via la fermeture de leur stomates sous l'effet de l'augmentation du CO₂ ou grâce à leur capacité à conserver l'eau dans les sols.

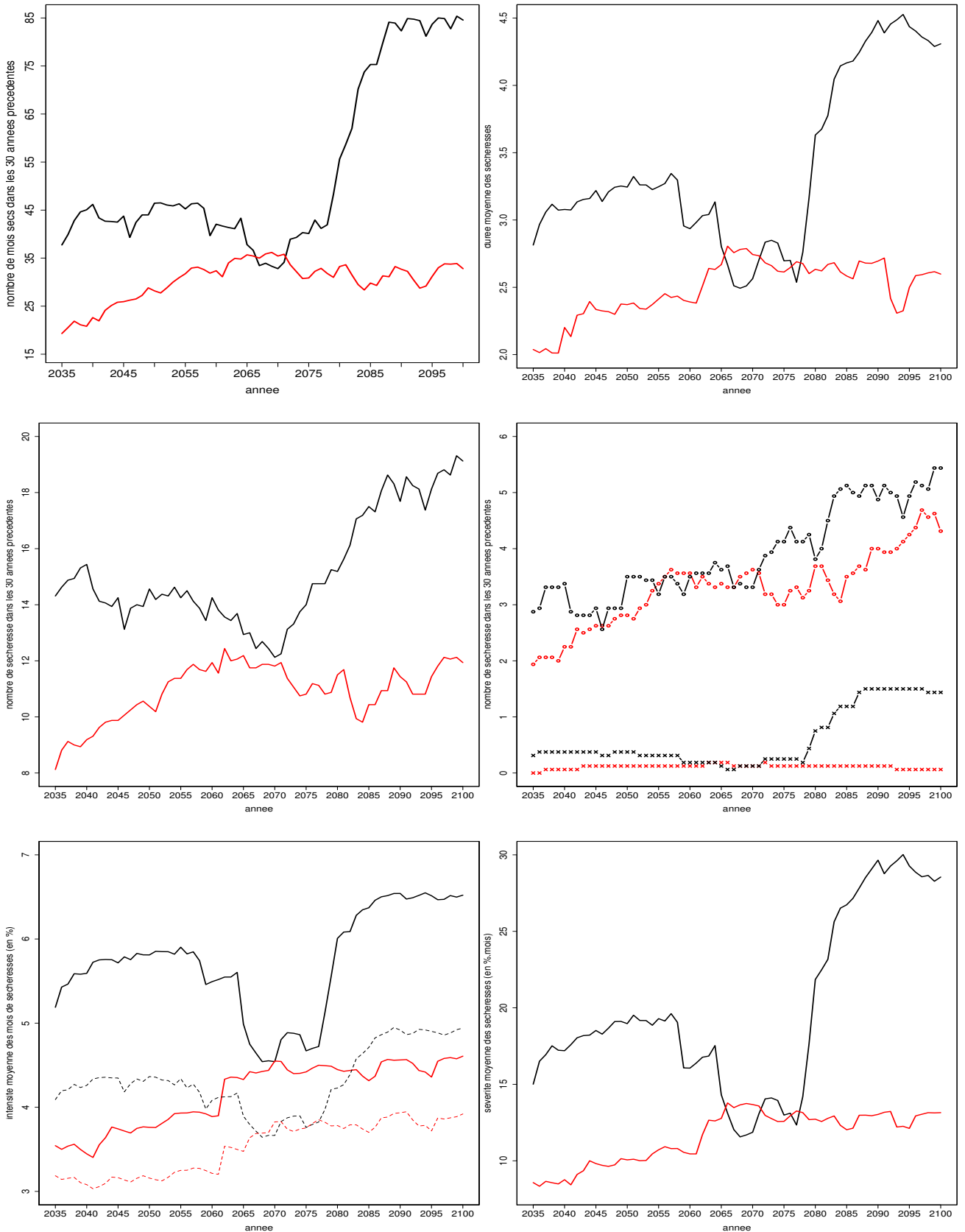


FIGURE 32 – Evolution pendant la simulation historique des caractéristiques des sécheresses au sens de Sheffield. Dans tous les cas, il s’agit des sécheresses des 30 années précédentes. Concernant le nombre de sécheresses, les ronds correspondent aux sécheresses de courte durée (3 à 6 mois), les croix aux sécheresses de longue durée (plus de 12 mois). Concernant les intensités, les traits pleins correspondent à la moyenne sur les mois secs, les pointillés à la moyenne sur les sécheresses.

Glossaire des abréviations

- LMDZ** La version Zoomed du modèle de circulation atmosphérique LMD, développé par le laboratoire du même nom.
- CMIP** Climate Model Intercomparison Project.
- AMIP** Atmospheric Model Intercomparison Project, ancêtre du CMIP. Le nom est resté pour désigner des simulations de circulation atmosphérique coordonnées.
- WGCM** Working Group on Climate Modeling, un groupe de travail du WCRP, World Climate Research Programm, qui fédère la vaste communauté scientifique s'intéressant de près ou de loin au climat, tel que chacun peut entendre ce terme.
- GIEC** Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat.
- AR4** Assessment Report 4, plus connu sous le nom de "dernier rapport du GIEC". Un AR5 est prévu pour bientôt.
- IPSL** Institut Pierre Simon Laplace - no comment.
- SIRTA** Site Instrumental de Recherche par Télédétection Atmosphérique, à Palaiseau
- RCP** Representative Concentration Pathways, scénarii de forçages radiatifs pour les simulations de climat futur
- SRES** Special Report on Emissions Scenarios, document décrivant les scénarii simulés dans CMIP3. Par extension, la manière de désigner un de ces scénarii.
- GPCP** Global Precipitation Climatology Project

Références

- [1] Wilhite D.A. (2000) Drought as a natural hazard : Concepts and definitions, in *Droughts : A Global Assessment*, edited by D. A. Wilhite, 1 :3-18, Routledge London & New York.
- [2] Service R.F (2004) As the west goes dry. *Science* 303 :1124-1127
- [3] Ciais Ph., &al (2005) Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437 :529-533
- [4] Hourdin F. &al (2012) LMDZ5B : the atmospheric component of the IPSL climate model with revisited parameterization for clouds and convection. *Climate Dynamics*
- [5] Ducharme A., Laval K. (2000) Influence of the realistic description of soil water holding capacity on the global water cycle in a GCM. *Journal of Climate* 13 :4393-4413
- [6] Seneviratne S.I &al (2006) Soil moisture memory in AGCM simulations : analysis of global land-atmosphere coupling experiment (GLACE) data. *Journal of Hydrometeorology* 7 :1090-1112
- [7] Heim R.R.Jr., (2002) A review of twentieth century drought indices used in the United States. *Bulletin of American Meteorological Society* 83 :1149-1165
- [8] McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA. American Meteorological Society* 179-184
- [9] Sheffield J., Goteti G., Wen F., Wood E.F. (2004) A simulated soil moisture based drought analysis for the United States. *Journal of Geophysical Research* 109 :D24108
- [10] Sheffield J., Wood E.F. (2007) Characteristics of global and regional drought, 1950-2000 : analysis of soil moisture data from off-line simulation of the terrestrial hydrologic cycle. *Journal of Geophysical Research* 112 :D17115
- [11] Huntington T.G. (2006) Evidence for intensification of the global water cycle : review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319 :83-95
- [12] Wetherald R.T., Manabe S. (2002) Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *Journal of Geophysical Research* 107(D19) :4379
- [13] Sheffield J., Wood E.F. (2008) Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate Dynamics* 31 :79-105
- [14] Wetherald R.T., Manabe S. (1995) The mechanisms of summer dryness induced by greenhouse warming. *Journal of Climate* 8 :3096-3108
- [15] Seneviratne S.I., Lüthi D.,Litschi M., Schär C. (2006) Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature* 443 :205-209
- [16] Wetherald R.T., Manabe S. (1999) Detectability of Summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change* 43 :495-511
- [17] Burke E.J., Understanding the sensitivity of different drought metrics to the drivers of drought under increased atmospheric CO_2 . *Journal of Hydrometeorology* 12 :1378-1394
- [18] Park C.-E. &al (2012) The potential of vegetation feedback to alleviate climate aridity over the United States associated with a 2x CO_2 climate condition