

## CERFACS

*Marie PIAZZA, Christian PAGE, Emilia SANCHEZ,  
Laurent TERRAY*

# Comparaison des méthodes de désagrégation statistique et dynamique pour l'évaluation du changement climatique sur les zones de montagnes en France

**SCAMPEI Rapport semestriel d'activité**

**- Février 2011 -**

Les régions de montagne sont très vulnérables aux changements climatiques et susceptibles d'être parmi les zones les plus impactées par le réchauffement global. Les projections climatiques pour la fin du 21ème siècle, élaborées avec les modèles de circulation générale du climat, ne présentent pas la résolution horizontale appropriée pour évaluer précisément les impacts du réchauffement sur ces régions. Pour adapter l'information des modèles globaux à la problématique, on utilise des techniques de désagrégation, qui permettent une descente aux échelles spatiales d'une dizaine de kilomètres. Ce rapport fait état de l'utilisation et de la comparaison de deux techniques de désagrégation différentes, l'une statistique et l'autre dynamique. Ces techniques ont été tout d'abord validées pour le climat présent par une comparaison avec les analyses SAFRAN de Météo-France. Les résultats montrent que les données désagrégées présentent des écarts faibles par rapport à SAFRAN. Dans la deuxième partie, les projections du climat futur pour deux périodes, 2021 à 2050 et 2071 à 2100, ont été étudiées avec les deux techniques pour plusieurs scénarios d'émission des gaz à effet de serre du GIEC. Les résultats issus des différentes méthodologies s'accordent sur une forte diminution du nombre de jours de gel dans les trois zones de montagnes (Alpes, Corse et Pyrénées), accompagnée d'une importante diminution des quantités de précipitations solides, mais aussi des précipitations liquides avec une augmentation moyenne du pourcentage de jours secs supérieure à 10%. Les résultats obtenus sur la Corse pour les deux méthodes sont plus contrastés et discutables car le domaine spatial est réduit et ne permet sans doute pas un échantillonnage statistique suffisamment pertinent. En revanche, sur les autres massifs, un raffinement du découpage spatial s'avère nécessaire.



## Sommaire

Introduction.....	4
Méthodologies .....	5
La méthode de désagrégation dynamique.....	5
Les données utilisées.....	5
La méthode de désagrégation statistique.....	6
Les données utilisées.....	6
Les types de temps.....	6
Découpage spatial .....	9
Validation des méthodes sur le temps présent .....	10
Corrélation des données désagrégées et des données observées .....	10
Comparaison des classes de précipitation .....	12
Comparaison du cumul de précipitation solide .....	13
Comparaison du nombre de jours de gel.....	14
Comparaison des méthodes : Scénarios et prédictions .....	15
Comparaison des classes de précipitation .....	15
Comparaison du cumul de précipitation solide .....	16
Comparaison du nombre de jours de gel.....	17
Comparaison par rapport aux modèles CMIP3 .....	17
Conclusion .....	19
Références.....	19
ANNEXES.....	21

## Introduction

Les recherches climatiques en cours mettent en évidence des signatures régionales et saisonnières du changement climatique et soulignent la grande vulnérabilité des milieux de montagnes. Mais l'étude du climat, de ses manifestations extrêmes et de ses impacts en zone de relief, est compliquée par la physiographie complexe des sites montagneux. En particulier, l'étude de la couverture neigeuse et de son évolution, préalable au développement de stratégies d'adaptation économique et de gestion de la ressource en eau, implique de prendre en compte les caractéristiques géographiques du massif étudié. Il s'agit donc d'opérer un transfert d'échelle majeur entre celle des modèles régionaux de climat (MRC) et celle du versant, pertinente pour l'étude du manteau neigeux. Une voie possible pour réaliser une telle descente d'échelle consiste à appliquer des méthodes dites de désagrégation. Il existe deux catégories de méthodologies de désagrégation : soit statistique, i.e. qui opère avec un modèle statistique dont les paramètres sont estimés à partir des données observées disposées sur une maille fine ; soit dynamique, qui utilise un MRC à une résolution très fine dans la région d'étude (Giorgi 1990). La première méthode a l'avantage d'être numériquement peu coûteuse et de fournir des résultats très satisfaisants par rapport à sa complexité. Par contre, la qualité des résultats est directement conditionnée par celle de la base de données observées, celles-ci devant être distribuées uniformément dans le temps. Comme elles sont basées sur des données déjà observées, les méthodes statistiques ont le désavantage de ne pas pouvoir anticiper des changements climatiques qui n'auraient jamais été observés. Les méthodes dynamiques, quant à elles, sont très coûteuses en termes de temps de calcul puisque les MRCs opèrent à fine résolution. De plus, celles-ci nécessitent une correction du biais du modèle pour rendre les sorties exploitables pour les études d'impact. Par contre, la méthode dynamique est capable de simuler les processus physiques et les rétroactions à l'œuvre dans les changements climatiques à venir, qui sont en dehors de la période d'observation instrumentale.

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet **ANR-SCAMPEI** (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes extrêmes, Enneigement et Incertitudes), et fait état de l'avancement de la comparaison entre deux méthodes de désagrégation, sur les montagnes françaises (Alpes, Pyrénées et Corse) à partir de scénarios climatiques à haute résolution spatiale (8-12 km). Les désagrégations dynamiques sont réalisées avec le modèle à aire limitée ALADIN-Climat (Radu et al. 2008). La désagrégation statistique est quant à elle réalisée avec le logiciel DSCLIM (Pagé et al. 2009).

Pour commencer, ce rapport décrit les méthodologies employées. Ensuite, la comparaison proprement dite des résultats issus des simulations désagrégées se décompose comme suit : une première partie consiste à valider les méthodologies pour le climat présent (1961-1990). Une seconde partie concerne les projections climatiques pour les périodes 2021-2050 et 2071-2100 sur les montagnes françaises. Puis, une comparaison à 15 modèles CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project 3) désagrégés avec DSCLIM permet d'évaluer l'influence des simulations ARPEGE désagrégées par rapport à des simulations usuelles de référence. Enfin, une conclusion rappelle les points clés de ce rapport et présente les pistes d'étude visant à évaluer les incertitudes des méthodes de désagrégation, ainsi que l'influence des rétroactions. Une série d'annexes présente des diagnostics basiques permettant de comparer les désagrégations issues de DSCLIM avec celles d'ALADIN-Climat (corrigé quantile-quantile, toujours dans cette étude), dans le climat présent et le climat futur.

*Note : Ce rapport reprend partiellement et complète l'article "Evaluation du changement climatique sur les zones de montagne en France à partir des méthodes de régionalisation" (Piazza et al. 2011), rédigé en préparation du colloque sur le thème de l'eau en montagne, de la Société Hydraulique de France.*

## Méthodologies

### La méthode de désagrégation dynamique

Pour cette étude, on utilise le MRC ALADIN-Climat (Aire Limitée, Adaptation Dynamique pour la Coopération Internationale, Radu et al. 2008) avec la configuration FRA12. C'est un modèle à aire limitée dérivé du modèle global ARPEGE/IFS. Pour SCAMPEI, ALADIN-Climat travaille à 12 km de résolution horizontale sur le domaine France Métropolitaine, incluant la Corse (Figure 1). Le MRC est forcé aux frontières par des simulations réalisées par ARPEGE-Climat étirée (50 km sur la Méditerranée), avec une simulation de référence pour la période 1961-1990, et deux projections climatiques pour 2021-2050 et 2071-2100 pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre (GES) A1B. Les températures de surface de la mer utilisées pour forcer ALADIN-Climat proviennent d'une simulation du modèle couplé du CNRM.

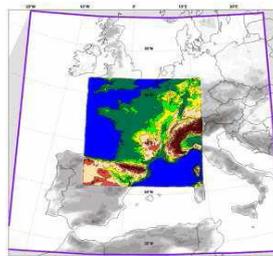


Figure 1 : Domaine ALADIN-Climat utilisé dans cette étude.

Pour rendre les sorties du MRC exploitables pour les études d'impact, une méthode de correction quantile-quantile a été utilisée (Déqué, 2007). Celle-ci consiste à élaborer une fonction de transfert pour ramener la distribution statistique des données simulées à celle des valeurs observées. La correction est réalisée par décomposition des deux jeux de données en quantiles. Dans ce cas les données utilisées comme observations sont les analyses SAFRAN de Météo-France (Quintana-Seguí et al. 2008).

### Les données utilisées

- ✚ Climat présent
  - désagrégation dynamique d'ERA40 (1958-2001)
  - désagrégation dynamique d'ARPEGE simulations ENSEMBLE/CECILIA (1961-1990)
- ✚ Climat futur
  - désagrégation dynamique d'ARPEGE simulations ENSEMBLE/CECILIA : 2 périodes (2021-2050, 2071-2100) et 3 scénarios (A1B, A2, B1)

Variables : Température à 2m (Tmax et Tmin), précipitation solide, précipitation liquide, module du vent moyen à 10m, module du vent max, humidité spécifique, infrarouge descendant, solaire descendant.

## La méthode de désagrégation statistique

La méthode utilisée combine essentiellement une approche en types de temps et une méthode de recherche d'analogues (Boé et al. 2009). L'approche en types de temps permet d'identifier les liens statistiques entre la circulation atmosphérique de grande échelle et la précipitation sur la France, représentée par la base de données SAFRAN sur une grille de 8 km de résolution horizontale. Les coefficients issus d'une régression multiple entre les types de temps et la précipitation sont déterminés lors de la période d'apprentissage, qui est fixée à priori dans l'algorithme. Dans la deuxième étape, une méthode de recherche d'analogues est utilisée, entre autre, pour produire une inflation de la variance de la précipitation reconstruite avec la régression, ainsi que pour produire en sortie les variables supplémentaires qui sont disponibles dans SAFRAN. Les différentes étapes de cet algorithme constituent le logiciel DSCLIM qui permet l'élaboration rapide et efficace des données désagrégées.

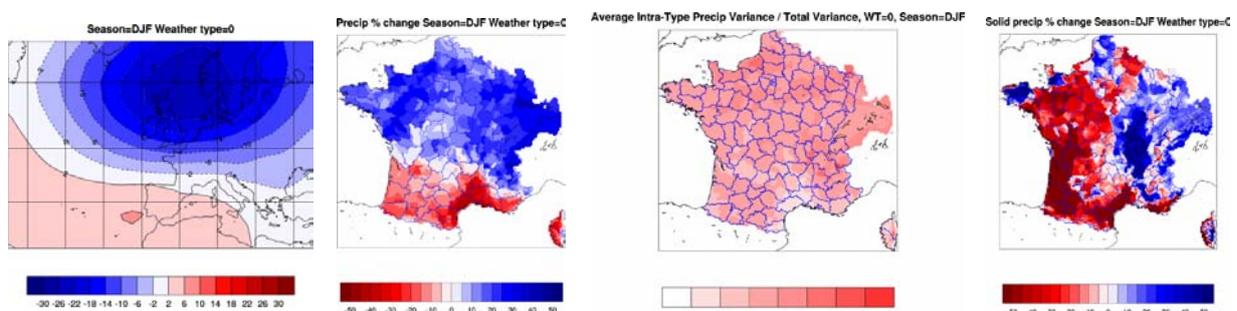
### Les données utilisées

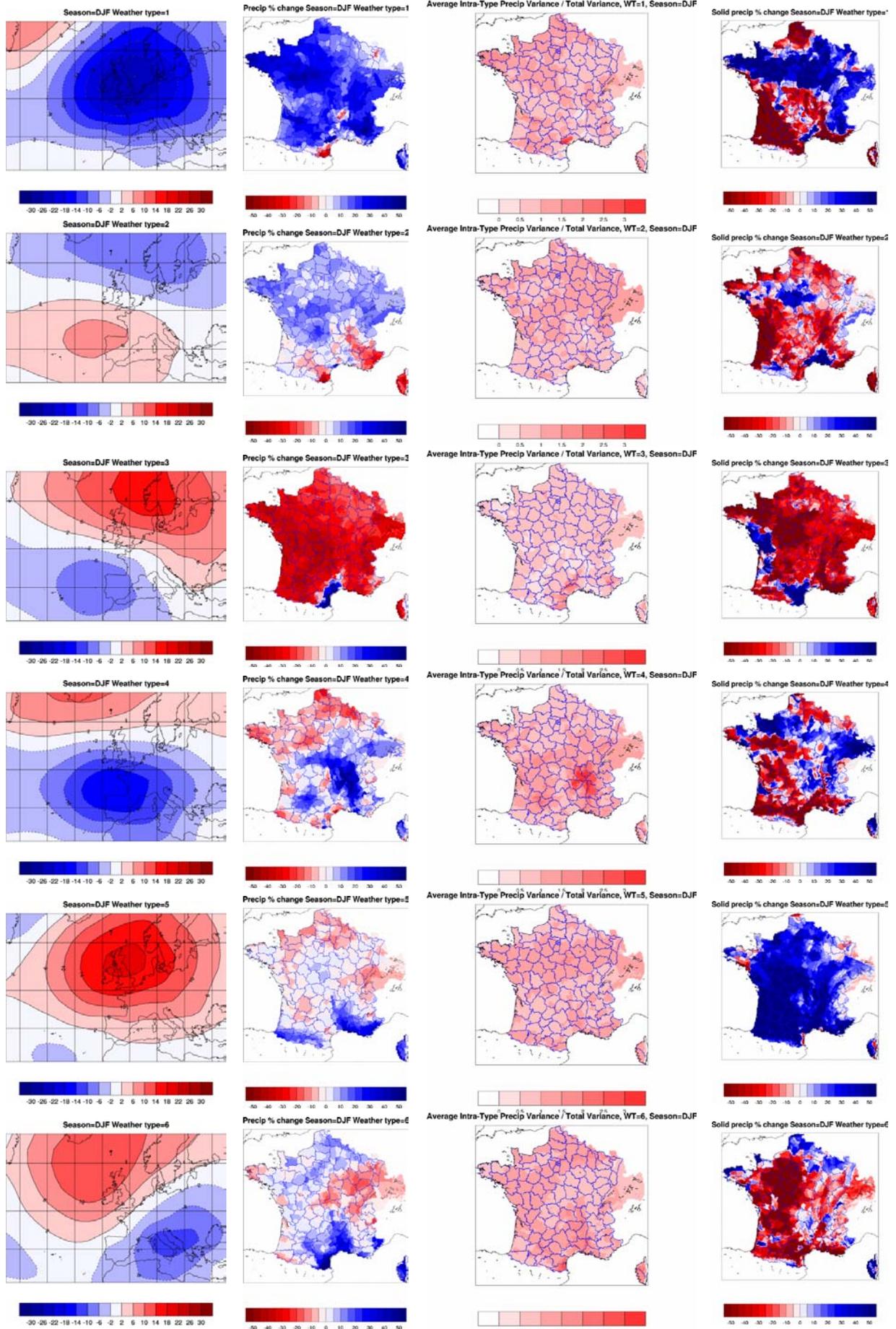
- ✚ Climat présent
  - désagrégation statistique d'ERA40 (1958-2001)
  - désagrégation statistique d'ARPEGE simulations ENSEMBLE/CECILIA (1961-1990)
- ✚ Climat futur
  - désagrégation statistique d'ARPEGE simulations ENSEMBLE/CECILIA : 2 périodes (2021-2050, 2071-2100) et 3 scénarios (A1B, A2, B1)

Variables (journalières) : Température à 2m (Tmoy, Tmax et Tmin), précipitation totale, précipitation solide, précipitation liquide, module du vent moyen à 10m, module du vent max, humidité relative, humidité spécifique, infrarouge descendant en surface, solaire descendant en surface.

### Les types de temps

Pour être suffisamment discriminants, les types de temps (TT) sont définis par saison (DJF, MAM, JJA, SON) par l'anomalie de pression de surface par rapport à la moyenne saisonnière. Toutes les simulations désagrégées avec DSCLIM pour le projet SCAMPEI l'ont été avec les mêmes types de temps. Le Tableau 1 présente les dix types de temps de l'hiver (DJF), avec la pression de surface et les précipitations totale et solide moyennes associées.





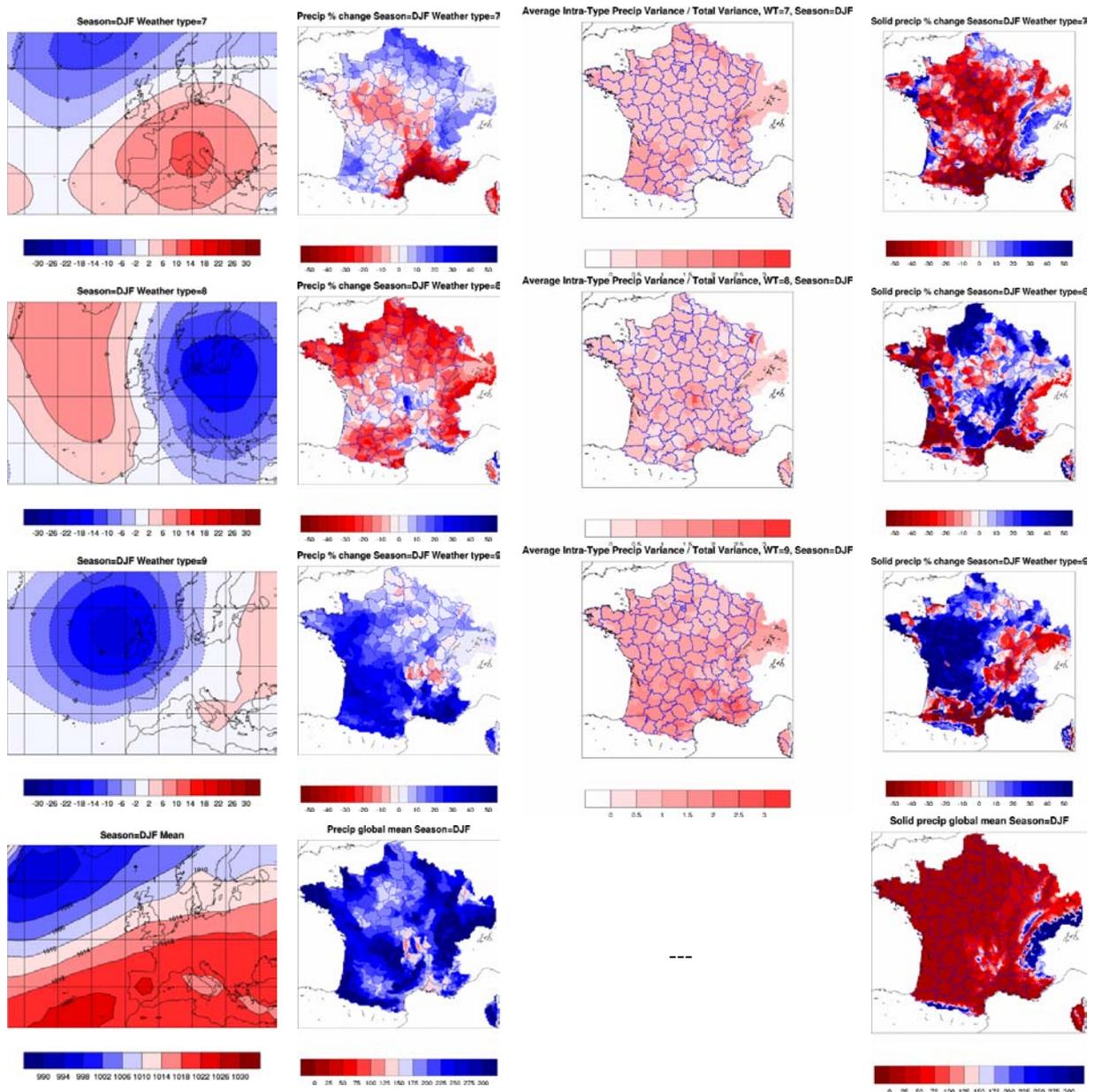


Tableau 1 : Les 10 types de temps d'hiver (DJF). Colonne 1 : anomalie de la pression de surface moyenne (hPa). Colonne 2 : anomalie (%) et variance (Colonne 3) de la précipitation totale moyenne. Colonne 4 : anomalie (%) de la précipitation solide moyenne. La pression de surface provient de la réanalyse NCEP et les précipitations de SAFRAN (1981–2005).

Ces types de temps ont été sélectionnés de façon à être discriminants sur la France entière et pas spécifiquement à une région montagneuse. Dans le cadre de cette étude, on va chercher à isoler parmi ces 10 types de temps les plus discriminants sur les régions concernées : Alpes, Pyrénées et Corse. Les cartes de corrélations spatiales entre la précipitation totale moyenne et la fréquence d'occurrence des types de temps (Tableau 2) nous renseigne sur les circulations atmosphériques de grande échelle les plus discriminantes pour une simulation désagrégée sur les zones étudiées. Ici, on s'intéresse à la simulation ARPEGE climat présent (1961-1990), qui servira de simulation de référence lors de l'étude des scénarios.

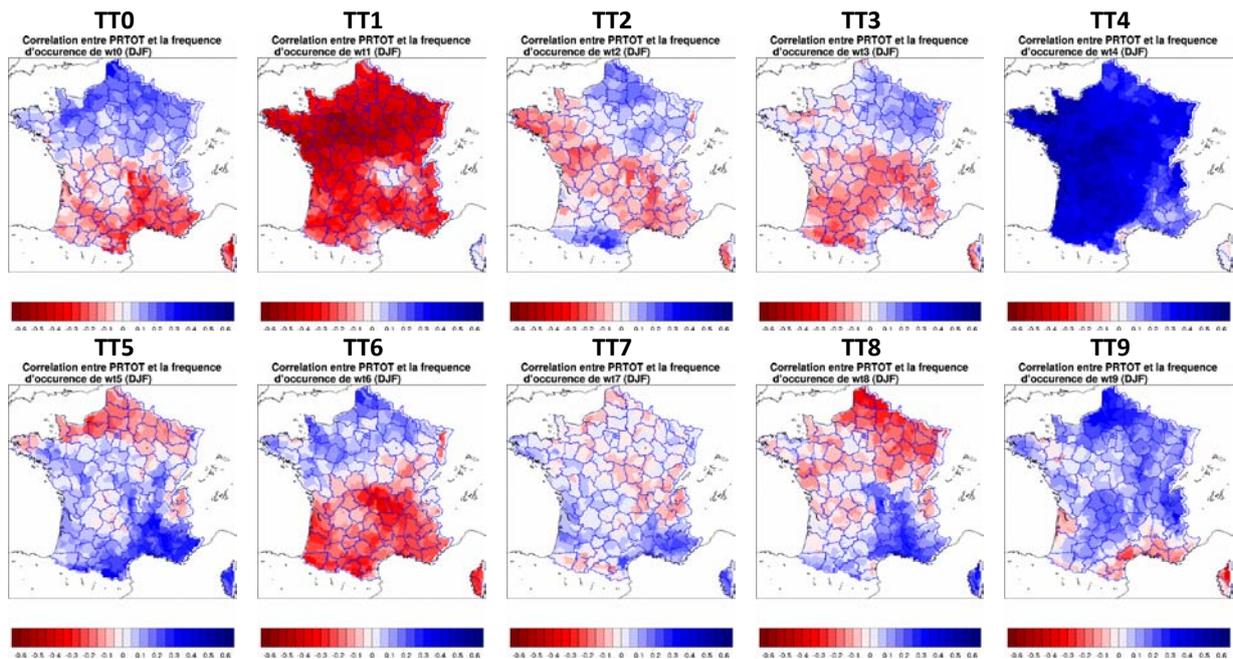


Tableau 2 : Pour chaque type de temps : Corrélation entre la précipitation totale et la fréquence d'occurrence du type de temps en hiver (DJF). La fréquence d'occurrence des types de temps et la précipitation proviennent de la désagrégation statistique d'ARPEGE 1961-1990.

## Découpage spatial

Une première analyse montre que l'association de types de temps spécifiques à une zone de montagnes nécessite un découpage plus fin des massifs. Notamment il faut distinguer les Pyrénées Orientales du reste de la chaîne, ainsi que les Alpes du Nord et les Alpes du Sud. Les domaines utilisés dans la suite de cette étude sont définis par leurs coordonnées présentées dans le Tableau 3.

France	Corse	Alpes		Pyrénées	
41° 51' N	41° 43' N	43°1' 45'6" N		42°2' 43°6' N	
-5° 11'2" E	8°2' 10°5' E	5° 7'6" E		-2° 3'4" E	
		Nord	Sud	Ouest	Est
		44°4' 45°6' N	43°1' 44°4' N	42°2' 43°6' N	42°2' 43°6' N
		5° 7'6" E	5° 7'6" E	-2° 1'9" E	1°9' 3'4" E

Tableau 3 : Coordonnées (latitude et longitude) et carte des domaines et sous-domaines étudiés. On applique ensuite un masque sur l'altitude en fonction des zones (550 m sur les Alpes )

Ce découpage permet d'identifier cinq types de temps (Tableau 4) dont la fréquence d'occurrence est particulièrement corrélée (ou anti-corrélée) avec la précipitation totale en hiver. Le

type de temps 0 est le plus discriminant pour les Pyrénées Orientales, alors que les types de temps 4 et 6 sont davantage discriminants pour le reste des Pyrénées (Pyrénées Ouest). Les Alpes du Nord subissent fortement l'influence du type de temps 2 et les Alpes du Sud des types de temps 1 et 5. La Corse voit quant à elle les flux de Méditerranée, principalement influencés par les types de temps 0, 5 et 6.

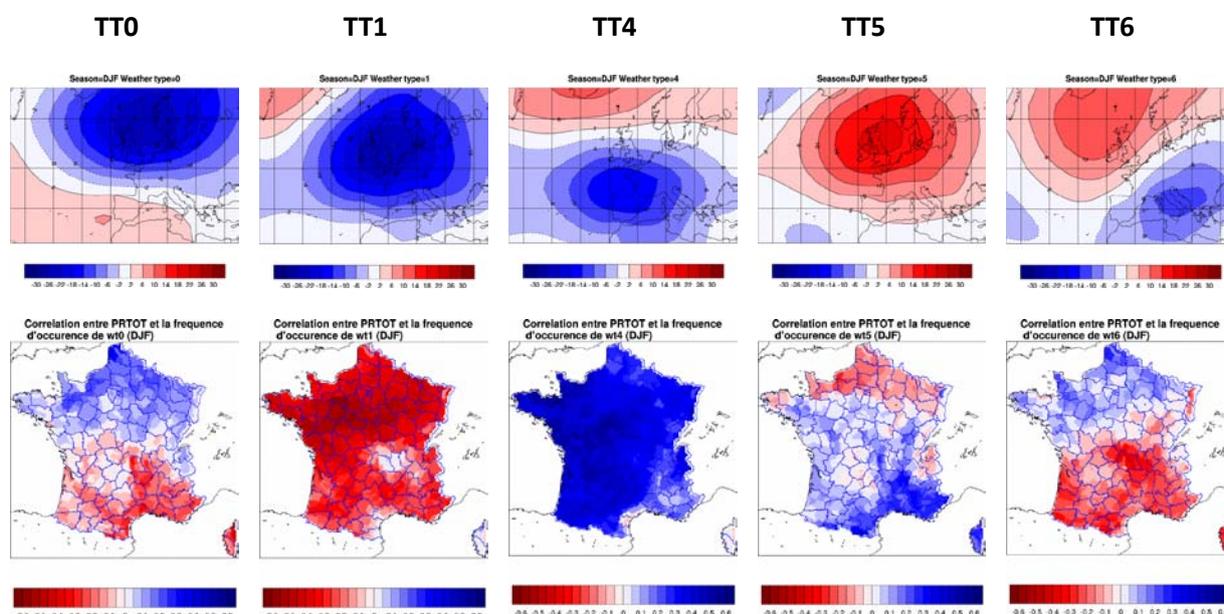


Tableau 4 : Les 5 types de temps les plus discriminants pour la précipitation totale sur les zones de montagnes. En haut : anomalie de pression (hPa). En bas : corrélation entre la fréquence d'occurrence des types de temps et la précipitation totale sur la France. Les données proviennent de la désagrégation par DSCLIM des simulation ARPEGE 1961-1990.

## Validation des méthodes sur le temps présent

On utilise les données provenant du modèle ARPEGE climat présent et d'ERA40, qui ont été désagrégées par la méthode statistique avec DSCLIM et par la méthode dynamique avec ALADIN-Climat. Dans la suite on utilisera respectivement les dénominations suivantes : SDS\_ARP, SDS\_ERA40, DDS\_ARP, DDS\_ERA40.

Il s'agit ici de comparer ces 4 jeux de résultats à SAFRAN pour la période 1961-1990. Dans un premier temps, la corrélation d'ERA40 désagrégé avec SAFRAN permet d'estimer la qualité de la méthode. Ensuite, la comparaison s'appuie sur les paramètres étant parmi les plus importants au niveau du climat de montagne : les classes de précipitation, la quantité de précipitation solide et le nombre de jours de gel.

## Corrélation des données désagrégées et des données observées

La corrélation de la désagrégation d'ERA40 avec les données SAFRAN permet de comparer la qualité de la méthode, statistique ou dynamique, utilisée. La Figure 2 présente ces corrélations en fonction du pas de temps d'intégration (de 1 à 400 jours) pour les deux méthodes et pour chaque région, de novembre à mars (1961-1990), pour les précipitations totale et solide.

La méthode dynamique présente ici une corrélation élevée avec une valeur maximale atteinte dès le 3ème jour. Ces résultats s'expliquent d'une part par la proximité des frontières du

domaine ALADIN avec les zones considérées (Figure 1), les forçages sont donc prédominants sur la variabilité du modèle, et d'autre part par la correction quantile-quantile qui rappelle les sorties ALADIN vers les données SAFRAN.

La méthode statistique présente quant à elle un maximum de corrélation à l'échelle de la saison de l'hiver étendu (>150 jours), qui correspond à la période sur laquelle sont réalisées les analyses statistiques dans la suite de cette étude. En revanche les Pyrénées présentent un creux à ce moment là. Cela pourrait s'expliquer par une forte saisonnalité sur cette région. Pour les précipitations solides, la Corse présente un maximum à 0.8, qui est cependant peut significatif vu le domaine spatial restreint considéré. Le temps d'établissement d'un régime pseudo-permanent s'élève à environ 15 jours, ce qui est dû à la formulation de la recherche d'analogue par DSCLIM où il n'y a pas de prise en compte de la chronologie dans SAFRAN.

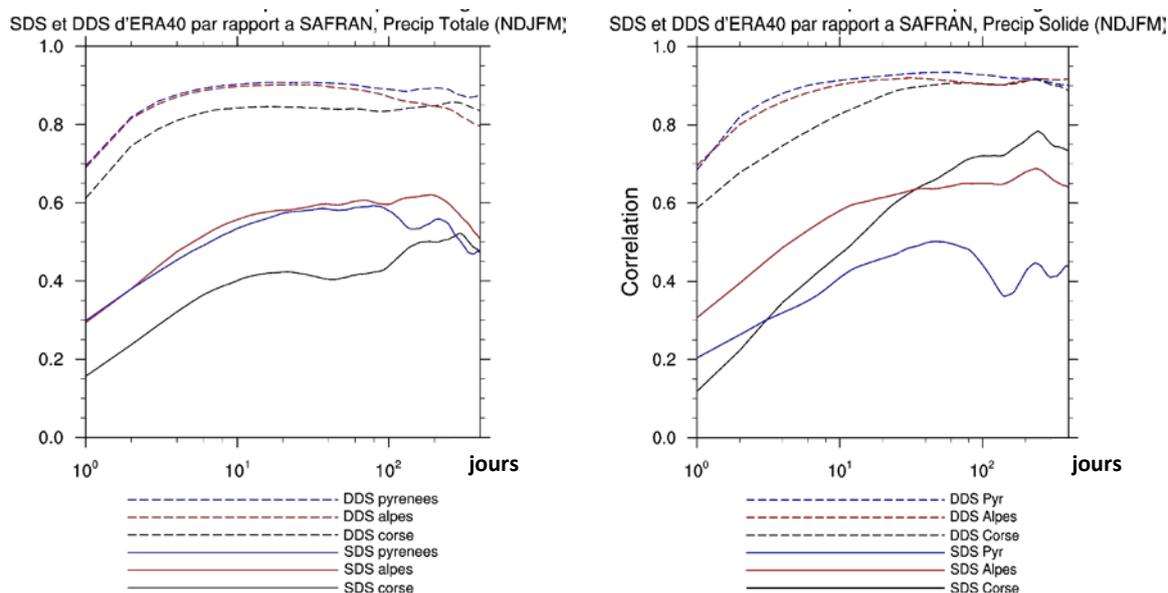


Figure 2 : Corrélation en fonction du pas de temps d'intégration des simulations désagrégées par DSCLIM (traits pleins) et par ALADIN corrigé quantile-quantile (traits pointillés) par rapport aux données SAFRAN, pour les Alpes (rouge), la Corse (noir) et les Pyrénées (bleu) sur l'hiver étendu (novembre à mars, 1961-1990). A gauche : précipitation totale. A droite : précipitation solide.

La division spatiale des Alpes et des Pyrénées révèle que la désagrégation statistique des Alpes du Nord est davantage corrélée que sur les Alpes du Sud, idem pour les Pyrénées de l'Ouest et de l'Est respectivement (Figure 3). Sur une même zone de montagne, les courbes présenteront la même allure mais avec un décalage systématique, d'amplitude maximale 0.2 entre Pyrénées de l'Ouest et Pyrénées de l'Est pour la précipitation solide.

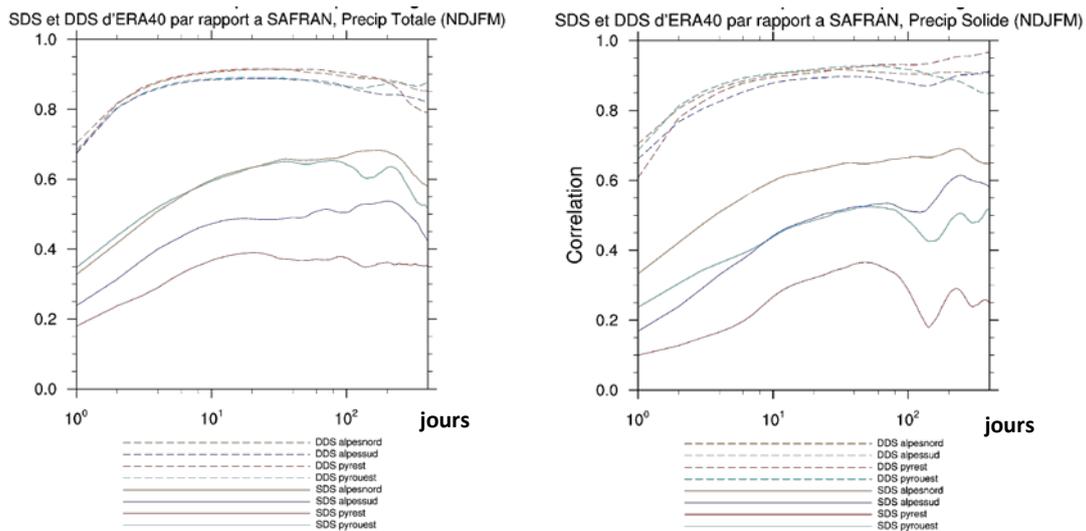


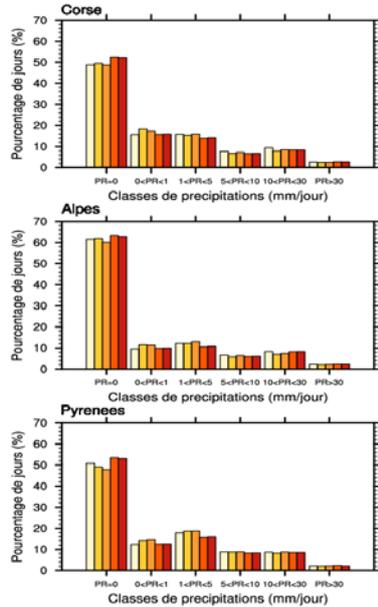
Figure 3 : Idem Figure 2 pour les Alpes Nord et Sud, et les Pyrénées Est et Ouest.

### Comparaison des classes de précipitation

On s'intéresse ici à la précipitation totale pour laquelle on définit 6 catégories, des épisodes secs (0 mm/jour) jusqu'aux précipitations excédant les 30 mm/j (Figure 4). Dans un premier temps, on compare le pourcentage moyen de jours par saison (de novembre à mars) dans chaque catégorie. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.a. Pour les 3 régions, on observe une forte correspondance entre les données SAFRAN et les données désagrégées, avec des différences de l'ordre de 2 à 3%, en particulier pour les classes de précipitation faible ( $PR < 5$  mm/j).

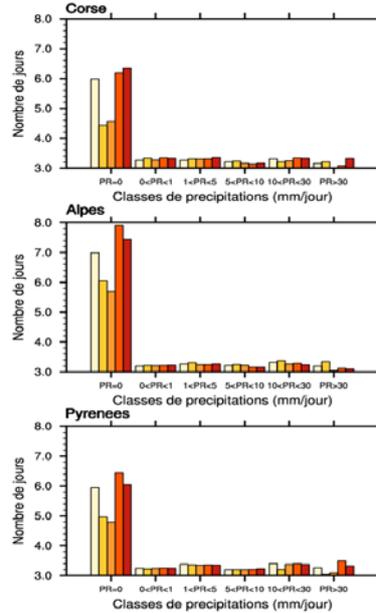
On compare également la persistance moyenne des épisodes secs et pluvieux répartis en classes d'intensité. Pour les 3 régions d'étude, on compte en chaque point le nombre de jours successifs appartenant à une même classe d'intensité avant d'effectuer la moyenne spatiale sur la région donnée. Enfin, pour chaque classe d'intensité, on calcule la durée moyenne obtenue sur la période d'étude. Les résultats sont présentés sur la Figure 4.b. Premièrement, on constate qu'en dehors des événements forts, les méthodes utilisées donnent des résultats très proches de SAFRAN. Pour les épisodes secs ( $PR = 0$  mm/j), on observe une sous-estimation de la persistance par la méthode statistique, contrairement à une légère surestimation par la méthode dynamique. Les différences entre la désagrégation d'ERA40 et d'ARPEGE pour une même méthode reste très faible, excepté pour les épisodes de fortes précipitations ( $PR > 30$  mm/j), pour lesquels ERA40 et ARPEGE montrent un écart plus grand que la méthode de désagrégation utilisée.

Repartition des precipitations par categories  
Temps Present (1961-1990)



(a)

Persistence des precipitations par categories  
Temps Present (1961-1990)



(b)

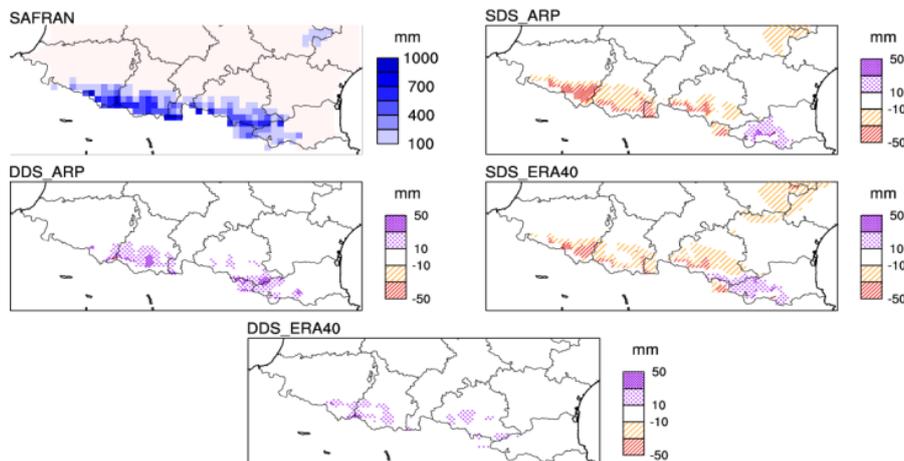
SAFRAN SDS\_ARP SDS\_ERA40 DDS\_ARP DDS\_ERA40

Figure 4 : Pour les 3 massifs (Corse, Alpes et Pyrénées) : (a) nombre de jours (%) pour chaque classe de précipitation et (b) persistance moyenne (nombre de jours) pour chaque classe de précipitation. Du plus clair au plus foncé : SAFRAN (référence), SDS d'ARPEGE (notée SDS\_ARP) et d'ERA40 (SDS\_ERA40), et DDS d'ARPEGE (DDS\_ARP) et d'ERA40 (DDS\_ERA40).

### Comparaison du cumul de précipitation solide

La Figure 5 montre les anomalies par rapport aux données SAFRAN du cumul moyen des précipitations solides entre novembre et mars pour les 4 jeux de données. On applique un masque en-dessous de 500m sur les Pyrénées et les Alpes et en-dessous de 300m sur la Corse. Les résultats montrent que, contrairement à la DDS, la SDS sous-estime les précipitations solides sur les plus hauts sommets, en particulier avec ARPEGE, et surestime légèrement sur les Pyrénées Orientales. Pour les deux méthodes, les biais constatés restent faibles relativement aux valeurs de référence de SAFRAN. Ces résultats sont comparables sur les autres massifs (Alpes et Corse).

Cumul des precipitations solides  
Temps present (1961-1990), pyrenees (NDJFM)



Temps present (1961-1990), alpes (NDJFM) Temps present (1961-1990), corse (NDJFM)

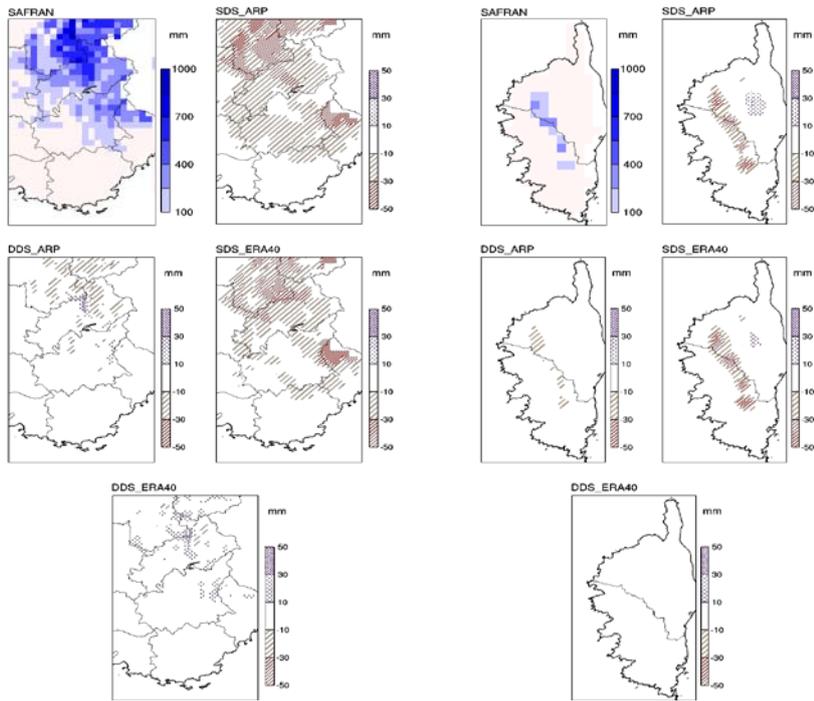


Figure 5 : Différence du cumul de précipitation solide (en mm d'eau équivalent) des désagrégations statistiques d'ARPEGE climat présent et d'ERA40 (SDS\_ARP et SDS\_ERA40), et dynamiques (DDS\_ARP et DDS\_ERA40), par rapport à SAFRAN, pour les Pyrénées, Alpes et Corse.

### Comparaison du nombre de jours de gel

On définit un jour de gel comme un jour où la température minimale est inférieure à 0°C. On observe sur la Figure 6 que le nombre de jours de gel est le plus important dans les Alpes, où les résultats entre les deux méthodes sont très proches. Sur les Pyrénées, la méthode statistique avec ERA40 montre une sous-estimation du nombre de jours de gel de 12%. En Corse, où le nombre moyen de jours de gel est inférieur à 20 jours, la SDS prévoit jusqu'à 6 jours supplémentaires, soit une erreur de 30%. On peut expliquer cette imprécision par le faible échantillon de jours de gel disponible pour la SDS.

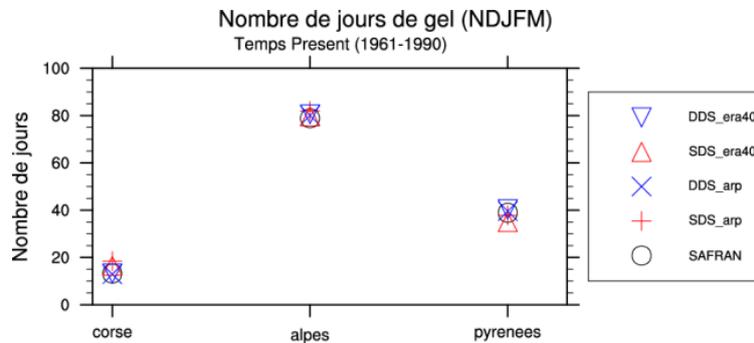


Figure 6 : Nombre moyen de jours de gel pour chaque massif considéré pour les 4 jeux de données et SAFRAN.

## Comparaison des méthodes : Scénarios et prédictions

Dans cette section, on s'intéresse à la désagrégation statistique et dynamique des simulations ARPEGE uniquement pour le scénario A1B du GIEC. Les résultats sont présentés en pourcentage d'anomalie par rapport à la période de référence (1961-1990).

### Comparaison des classes de précipitation

Comme pour le temps présent, on s'intéresse à la répartition de la précipitation totale par classes (Figure 7.a), ainsi qu'à la persistance moyenne par classes (Figure 7.b). Les deux méthodes de désagrégation donnent des résultats très similaires pour la répartition des précipitations, et constants d'un massif à l'autre.

En particulier, on ne remarque aucune différence notable entre le milieu de siècle et la fin de siècle. Pour la persistance, les résultats sont également très proches en dehors des événements fortement précipitant ( $PR > 30\text{mm/j}$ ), pour lesquels les incertitudes sont fortes aussi bien sur un même massif que d'un massif à l'autre. Si l'on s'intéresse aux épisodes de sécheresse, les deux méthodes prévoient une légère augmentation de leur durée sur tous les massifs. D'autre part, on retrouve, comme pour le temps présent, des persistance des épisodes secs systématiquement inférieures avec la SDS qu'avec la DDS, mais dans un ordre de grandeur similaire.

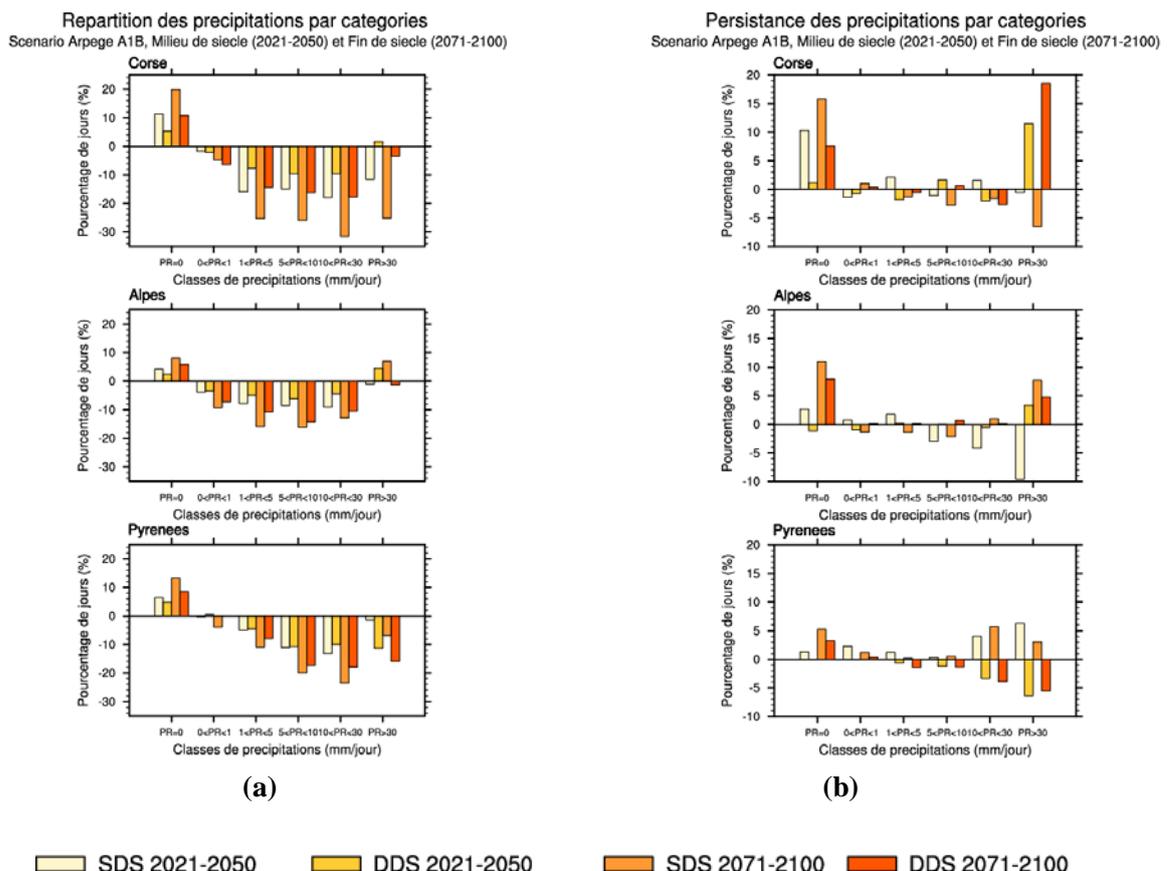


Figure 7 : Pour les 4 jeux de données : (a) anomalie relative (%) du nombre de jours pour chaque catégorie de précipitation pour les 4 jeux de données SDS et DDS et (b) anomalie relative (%) de la persistance moyenne pour chaque catégorie de précipitation pour les deux périodes du futur, par rapport au présent. Du plus clair au plus foncé : SDS et DDS des simulations ARPEGE selon le scénario A1B, pour le milieu de siècle puis pour la fin de siècle.

## Comparaison du cumul de précipitation solide

Pour comparer l'évolution de la quantité de neige selon la méthode de désagrégation utilisée, on calcule l'anomalie de la précipitation solide moyenne par rapport à la période de référence afin d'obtenir un pourcentage indépendant de la quantité de neige présente dans le climat présent. Les résultats sont présentés sur la Figure 8, uniquement pour les Pyrénées. Les régions en dessous de 550 mètres et le massif Central ne sont pas prises en compte. Les deux méthodes montrent une diminution importante de la quantité des précipitations solides dès le milieu du siècle, entre -10% et -25% sur les plus hauts sommets. Quant au piémont pyrénéen, les projections climatiques s'accordent pour afficher une quasi-disparition des précipitations solides en fin de siècle. La comparaison entre la SDS et de la DDS sur les Alpes et la Corse donnent des résultats similaires, avec une linéarité de la diminution de la précipitation solide dans le temps, et une répartition spatiale similaire, avec des anomalies décroissantes avec l'altitude aussi bien pour la SDS que pour la DDS.

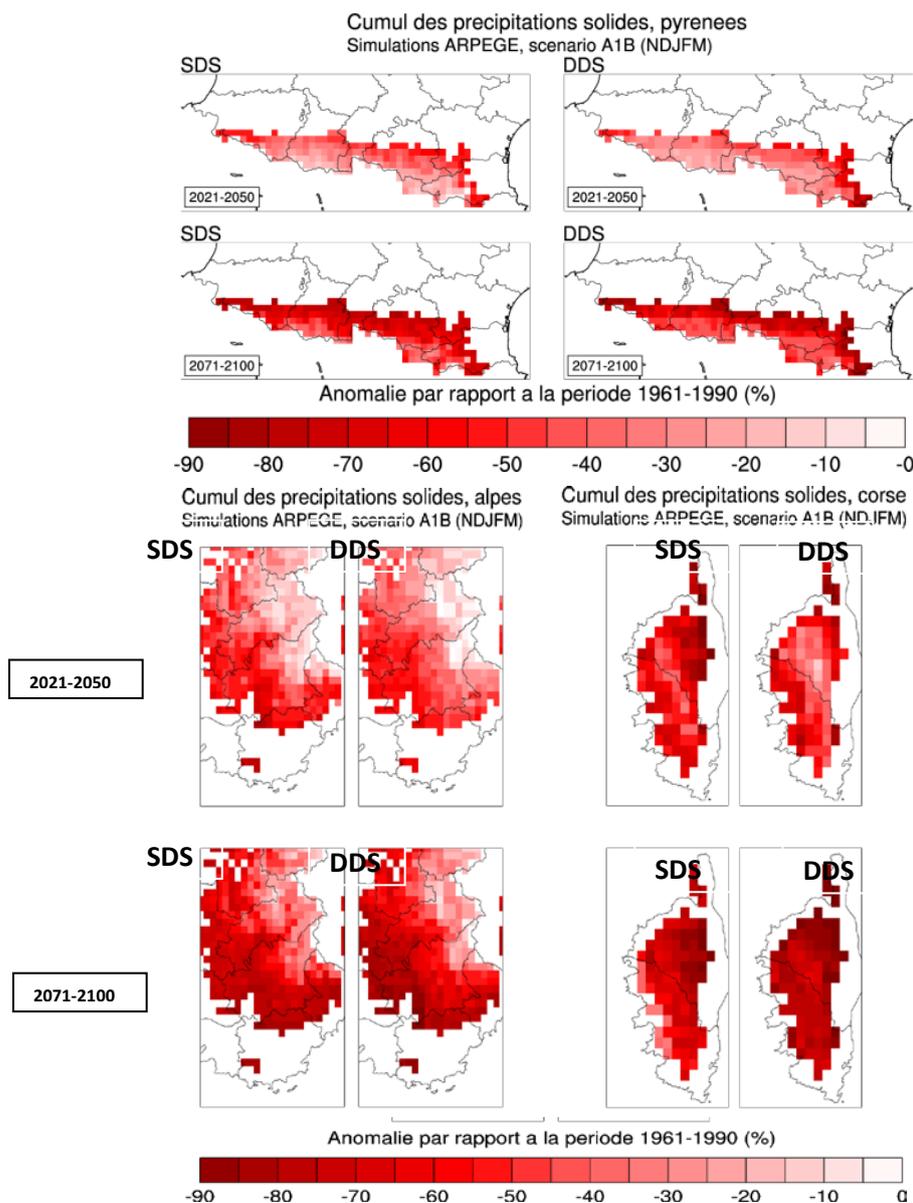


Figure 8 : Anomalie relative (%) du cumul de précipitation solide pour deux périodes du futur (2021-2050 en haut et 2071-2100 en bas) par rapport au climat présent (1961-1990), pour les deux méthodes de désagrégation (SDS à gauche et DDS à droite).

## Comparaison du nombre de jours de gel

L'anomalie du nombre de jours de gel est calculée par rapport à la période de référence pour chacun des 3 massifs, pour le milieu et la fin de siècle. Les résultats sont présentés sur la Figure 9. Sur les 3 massifs, la SDS et la DDS s'accordent sur une diminution du nombre de jours de gel de plus en plus importante à la fin du siècle. Sur la Corse, où le nombre de jours de gel sur la période de référence est déjà faible, c'est la méthode utilisée plus que la période qui semble déterminer le réchauffement du massif. Sur la Corse, la SDS montre un réchauffement plus important que la DDS. Cependant, les résultats sur la Corse sont discutables, en particulier à cause du faible échantillon spatial. En revanche, sur les Alpes et les Pyrénées, les deux méthodes fournissent des résultats similaires aussi bien pour le milieu que pour la fin de siècle.

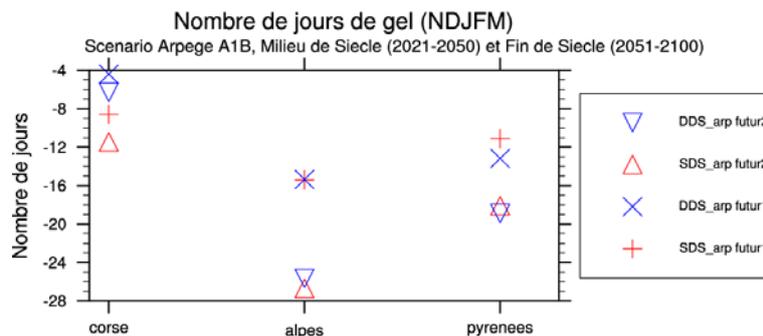


Figure 9 : Anomalie du nombre moyen de jours de gel des désagrégations statistique et dynamique d'ARPEGE selon le scénario A1B pour les deux périodes du futur (2021-2050 et 2071-2100) par rapport à la période de référence (1961-1990), sur la Corse, les Alpes et les Pyrénées.

## Comparaison par rapport aux modèles CMIP3 (détailler CMIP3)

On dispose des simulations désagrégées par DSCLIM de 15 modèles CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project 3), pour le présent (1961-1990), le milieu de siècle (2046-2064) et la fin de siècle (2081-2100), selon le scénario A1B d'émission du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat). On souhaite y positionner les simulations ARPEGE désagrégées selon les deux méthodes, avec comme critères de comparaison la précipitation totale et la précipitation solide sur les zones de montagnes en hiver (DJF). Les résultats sont présentés sur le Tableau 5.

Les données DDS n'étant pas disponibles sur l'intervalle 2046-2064 entier, on ne donne pas de valeur pour ce cas. Du fait du faible échantillon de valeurs sur la Corse, dû à un domaine spatial réduit, la significativité des valeurs obtenues est plus faible que sur les autres domaines. C'est pourquoi dans la suite de ce paragraphe, on laissera la Corse de côté pour se concentrer sur les Alpes et les Pyrénées. On remarque ainsi que pour la précipitation totale comme pour la précipitation solide, la SDS se situe toujours entre les écart-types des modèles CMIP3, et généralement plus près de la médiane des modèles CMIP3 que la DDS, malgré un domaine ALADIN réduit. En outre, la division des Alpes en deux domaines Nord et Sud traduit des disparités de prédiction des précipitations (Tableau 6) : dans les scénarios, la SDS a tendance à sous-estimer les précipitations dans les Alpes du Nord par rapport à la médiane des modèles CMIP3, et à les surestimer dans les Alpes du Sud.

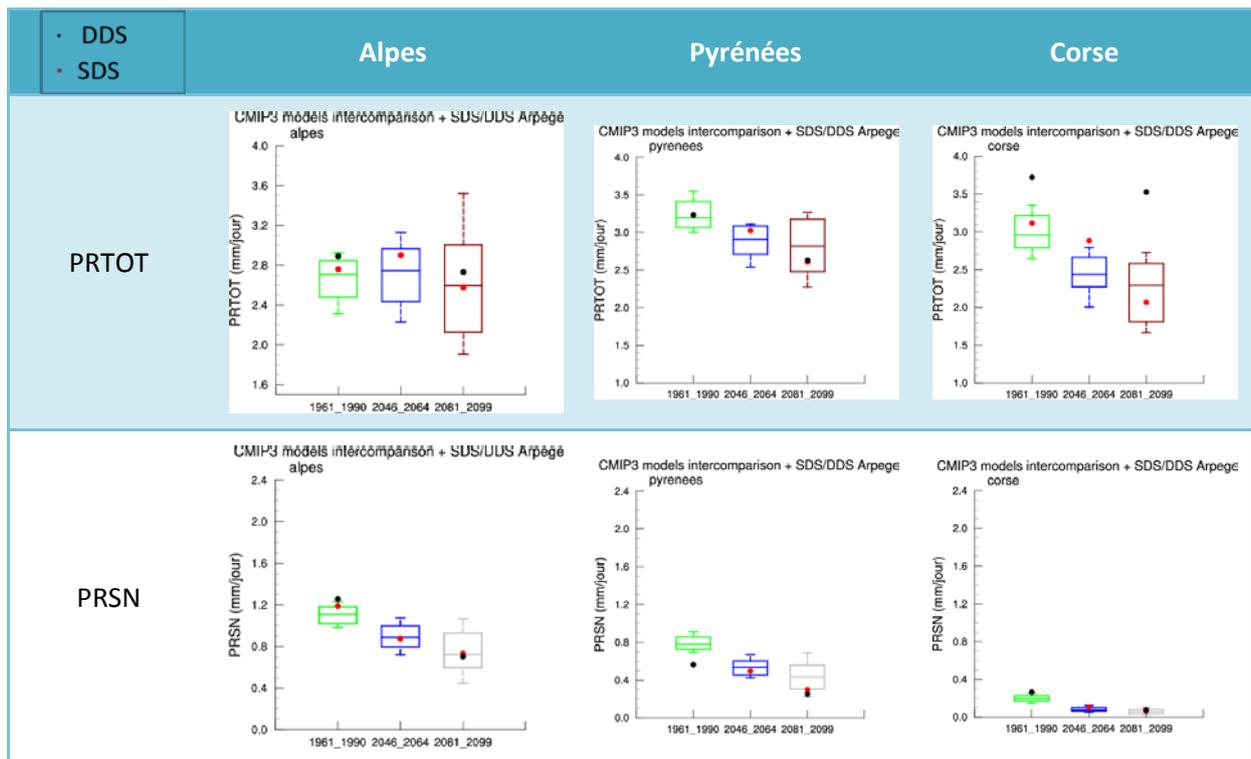


Tableau 5 : Comparaison des précipitations totale et solide des simulations ARPEGE désagrégées (SDS point rouge, et DDS point noir) par rapport aux précipitations moyennes des 15 modèles CMIP3, pour le présent (1961-1990), le milieu de siècle (2046-2064) et la fin de siècle (2081-2100) avec le scénario A1B.

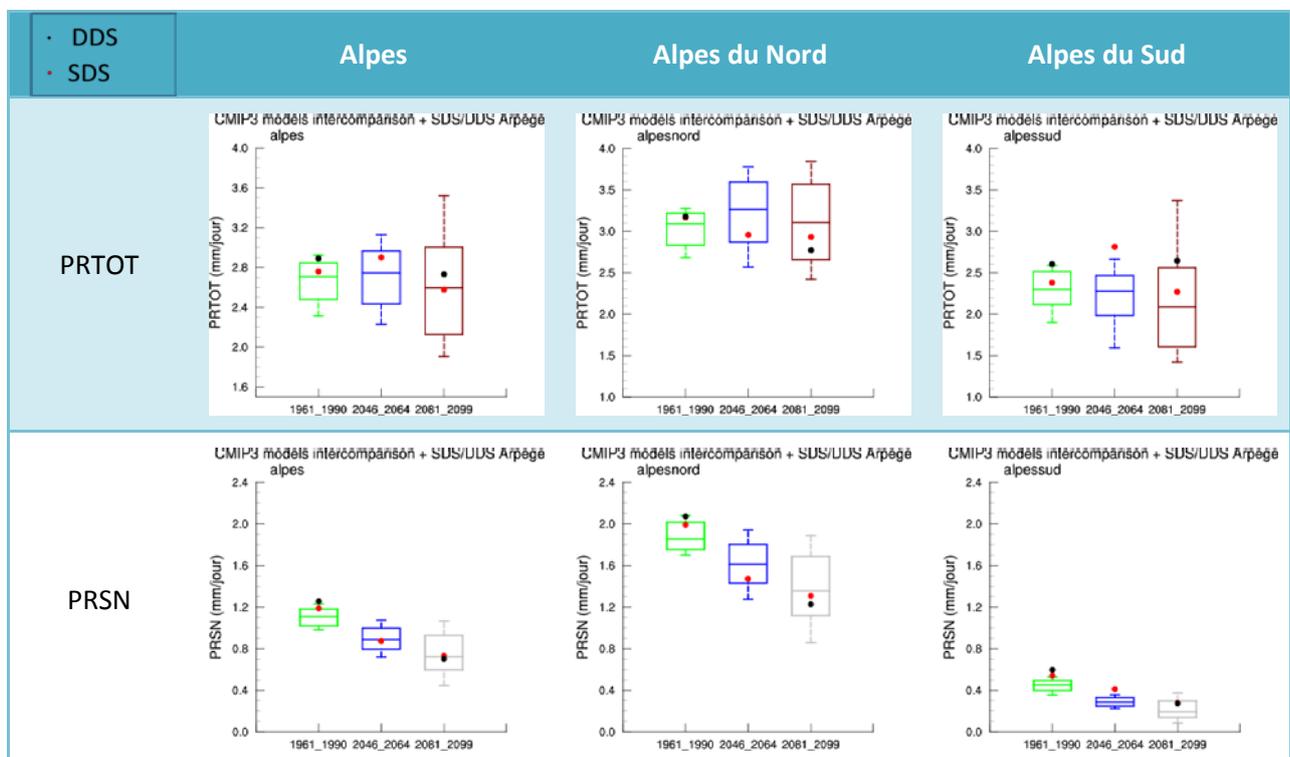


Tableau 6 : Idem Tableau 5 pour les domaines Alpes et ses subdivisions spatiales Nord et Sud.

## Conclusion

Bien que la définition des types de temps utilisés dans DSCLIM pour la désagrégation statistique n'est pas été optimisée pour les zones étudiées, la comparaison des méthodes de désagrégation statistique avec DSCLIM et dynamique avec ALADIN-Climat (avec correction quantile-quantile) pour quelques paramètres (classes de précipitation, cumul de précipitation solide et nombre de jours de gel), représentatifs du climat présent sur les montagnes françaises, révèle peu de différences significatives entre la SDS et la DDS, qui présentent toutes les deux de faibles biais par rapport à SAFRAN. La corrélation entre les précipitations solide et totale des désagrégations des réanalyses ERA40 par rapport aux observations SAFRAN donne de meilleurs résultats pour la DDS, quel que soit le pas d'intégration et la région considérée. Cependant, pour la SDS, c'est sur l'échelle de la saison que la corrélation est la plus forte.

Les méthodes de désagrégation appliquées aux projections réalisées selon les scénarios de réchauffement du GIEC pour le 21<sup>ème</sup> siècle s'accordent sur une forte diminution du nombre de jours de gel dans les trois zones de montagne (Alpes, Corse et Pyrénées), accompagnée d'une importante diminution des précipitations solides, mais aussi des précipitations liquides avec une augmentation moyenne du pourcentage de jours secs supérieure à 10%. Les résultats obtenus sur la Corse pour les deux méthodes sont plus contrastés et discutables car le domaine spatial est réduit et ne permet sans doute pas un échantillonnage statistique suffisamment pertinent. En revanche, un découpage spatial plus fin s'avère nécessaire sur les autres massifs étant donné les influences et les climats très contrastés existant entre Alpes du Nord et Alpes du Sud, et Pyrénées Occidentales et Pyrénées Orientales.

La suite de ce travail s'orientera sur l'évaluation des incertitudes liées à la méthode de désagrégation utilisée et de la pertinence des types de temps utilisés dans DSCLIM pour les projections.

## Références

- [1] Boé, J., Terray, L., Habets, F., Martin, E. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21<sup>st</sup> century. *Water Resour. Res.*, 45, W08426. Boé, J., Terray, L., Habets, F.
- [2] Brun, E., Martin, E., Simon, V., Gendre, C. and C. Coléou (1989). An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting. *J. Glaciol.*, 35(121) : 333–342.
- [3] Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 16-26.
- [4] Durand, Y., Brun, E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre, B. and E. Martin (1994). A meteorological estimation of relevant parameters for snow models. *Ann. Glaciol.*, 18 : 65–71.
- [5] Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, B. & Mérindol, L. (2009a). – Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958-2002) : Methodology, model validation, climatology and trends for air temperature and precipitation, *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, 48, 429-449, doi :10.1175/2008JAMC1808.1.

- [6] Durand, Y., Giraud, G., Laternser M., Etchevers, P., Mérindol L. and B. Lesaffre (2009b). – Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958-2005) : Climatology and trends for snow cover, *J. Appl. Meteor. and Climatol.*, 48, 2487-2512, doi:10.1175/2009JAMC1810.1.
- [7] Giorgi, F. (1990). – Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model, *J. Climate*, 3, 941-943.
- [8] Mahalanobis P. C. (1936). On the generalised distance in statistics, Proceedings of the National Institute of Sciences of India, 2(1), 49–55.
- [9] Pagé, C., Terray, L. & Boé J., (2009). - dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. *Technical Report TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS*, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.
- [10] Quintana Seguí, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S. (2008). – Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France, *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.
- [11] Radu, R., Déqué, M., Somot, S. (2008). – Spectral nudging in a spectral regional climate model, *Tellus*, 60A, 898-910 doi:10.1111/j.1600-0870.2008.00341.xc.

# ANNEXES

Les diagnostics présentés ici permettent de réaliser une première comparaison entre SAFRAN et les méthodes de désagrégation statistique (SDS) et dynamique (DDS) d'ERA40 et d'ARPEGE (simulations ENSEMBLE/CECILIA). Il s'agit de cartes de la France pour les paramètres suivants (temps présent) : précipitation totale moyenne, variabilité interannuelle (écart type), quantile 95, variabilité interannuelle du quantile 95, persistance moyenne des épisodes de sècheresse, cumul annuel de précipitation solide. La saison d'étude est l'hiver étendu (de novembre à mars). On réalise aussi des cartes de probabilité de significativité de la précipitation totale moyenne pour les 4 configurations, ainsi que des cartes de corrélation interannuelle pour SAFRAN/SDS\_ERA40 et pour SAFRAN/DDS\_ERA40.

Pour le climat futur, les résultats des simulations ARPEGE sont présentés par région (Alpes, Pyrénées, Corse) en anomalie par rapport à la période de référence (climat présent 1961-1990), pour deux périodes : milieu de siècle (2021-2050) et fin de siècle (2071-2100), et pour 3 scénarios d'émission de GES de l'IPCC : A1B, A2 et B1. Les paramètres étudiés sont les suivants : précipitation totale moyenne, variabilité interannuelle, quantile 95.

## Climat présent (1961-1990)

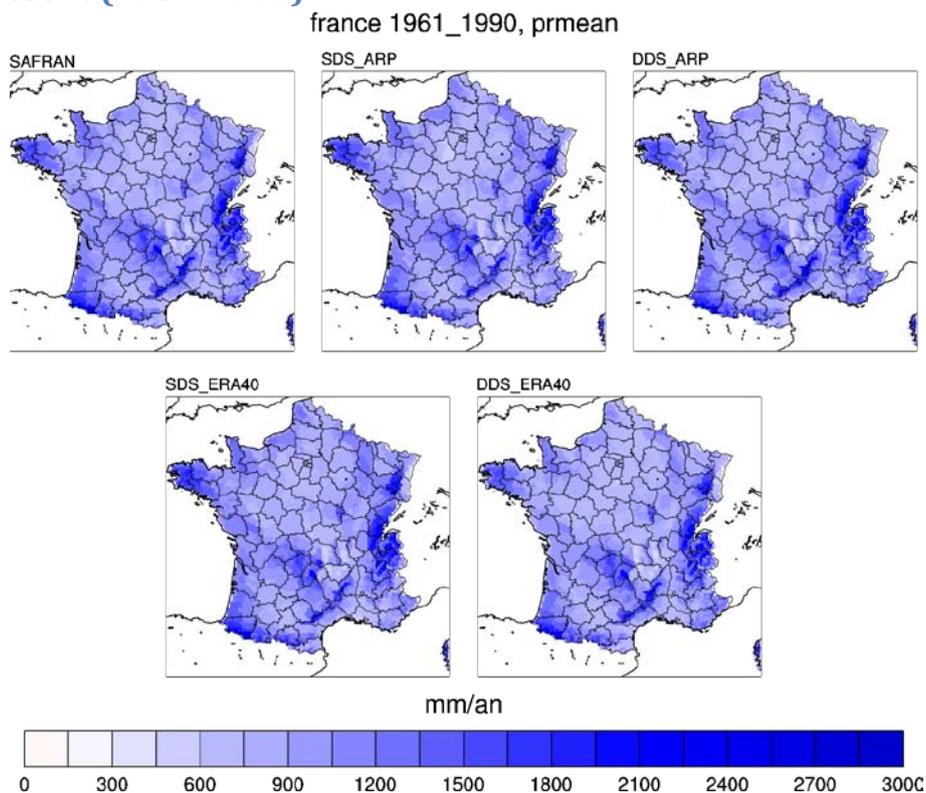


Figure 10 : Précipitation totale moyenne

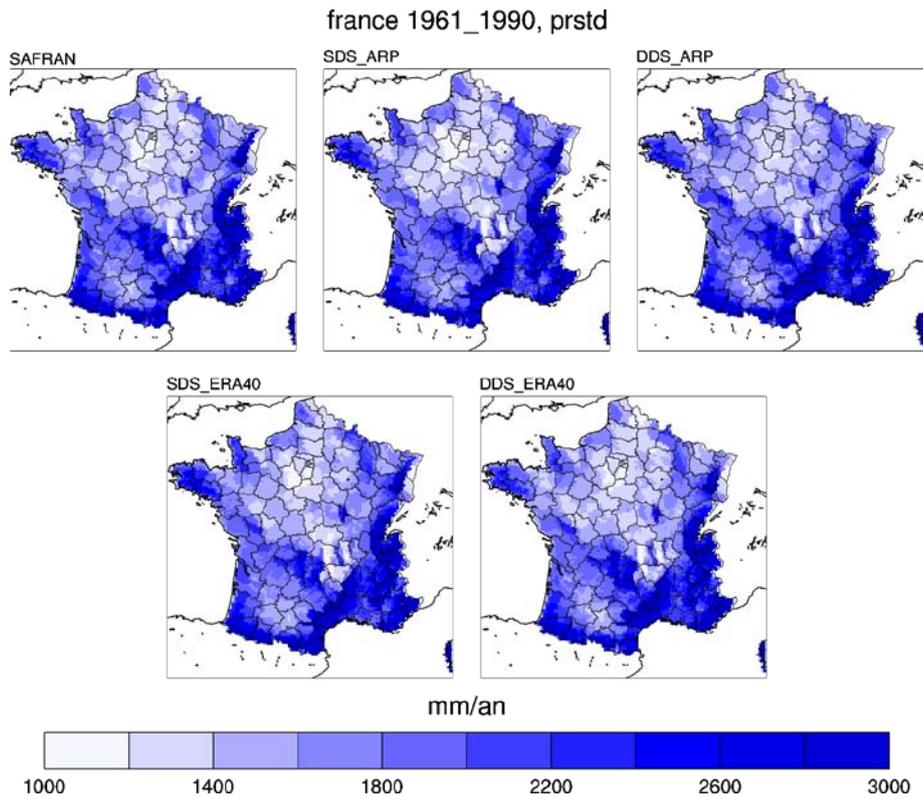


Figure 11 : Variabilité interannuelle de la précipitation totale

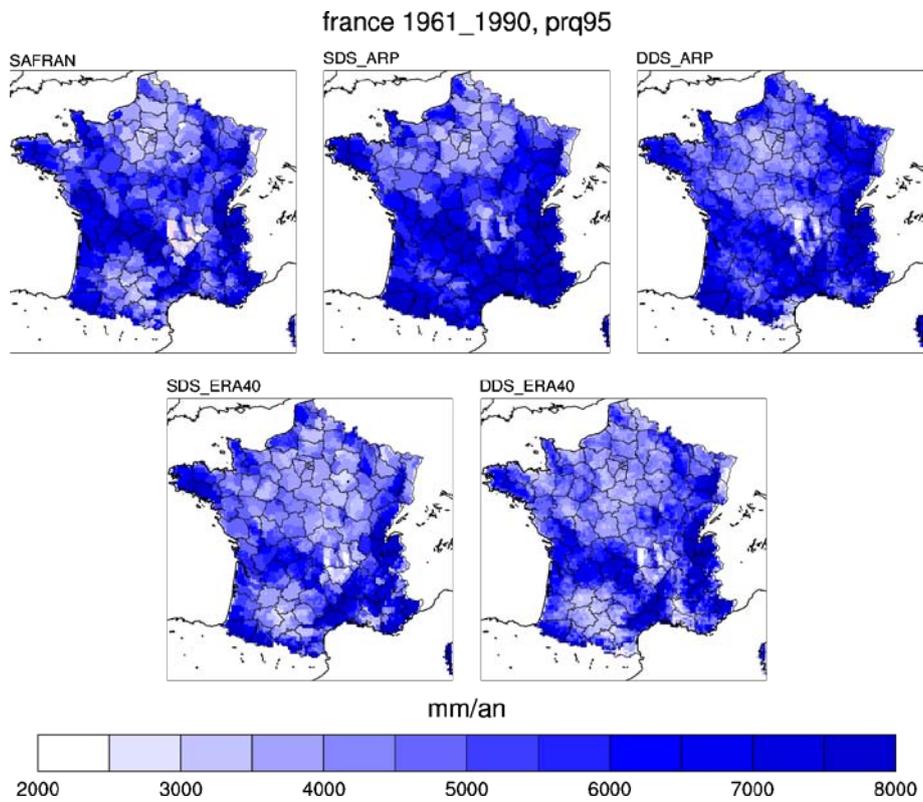


Figure 12 : Quantile 95 de la précipitation totale

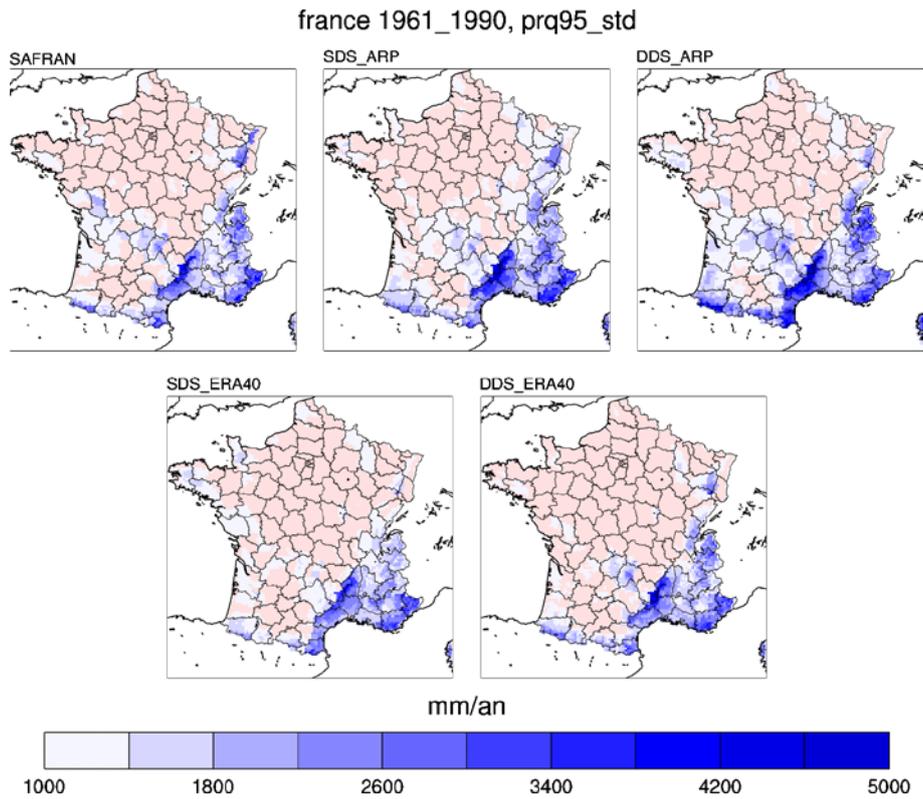


Figure 13 : Variabilité interannuelle du quantile 95 de la précipitation totale

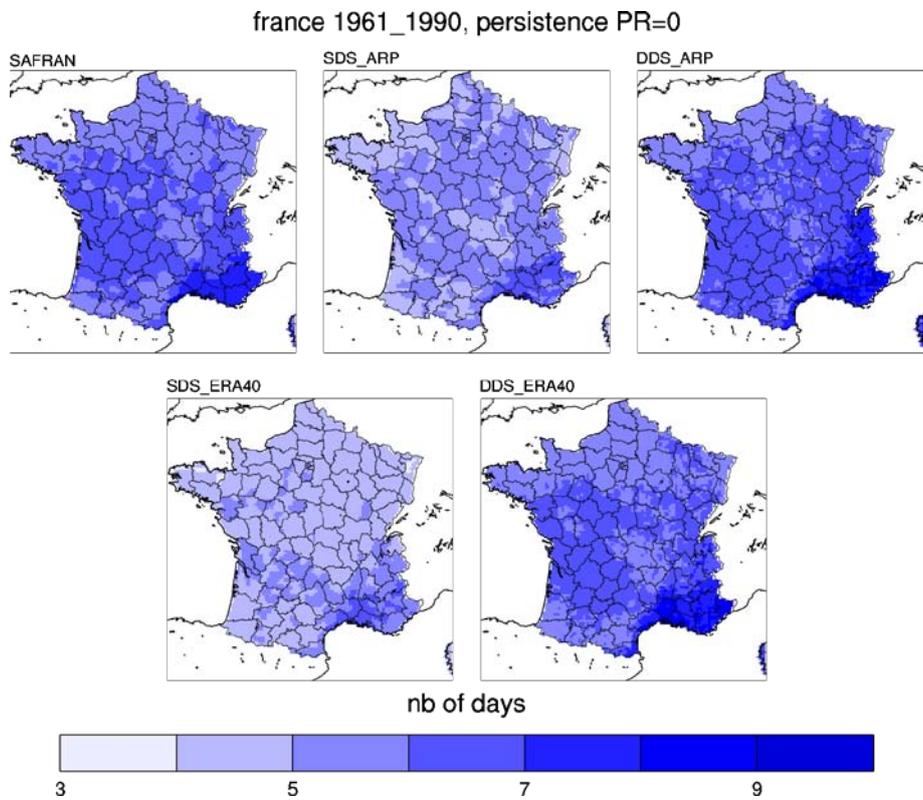


Figure 14 : Persistence moyenne des épisodes de sécheresse (précipitation totale=0 mm/jour)

france 1961\_1990, Cumul annuel des precip solides (prsnCum)

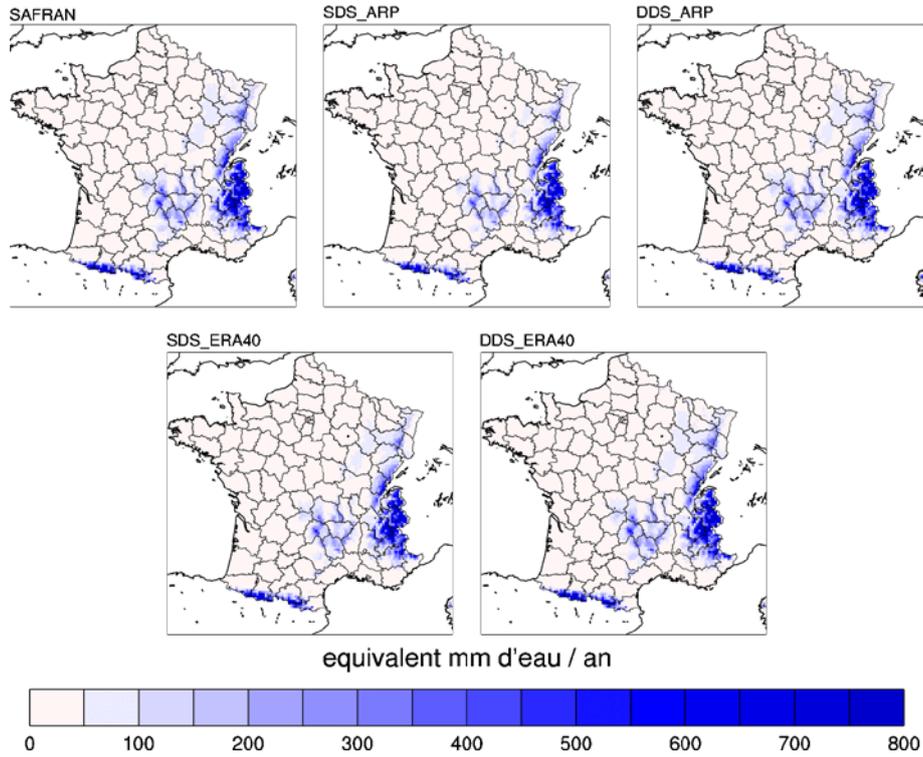


Figure 15 : Cumul annuel de la précipitation solide

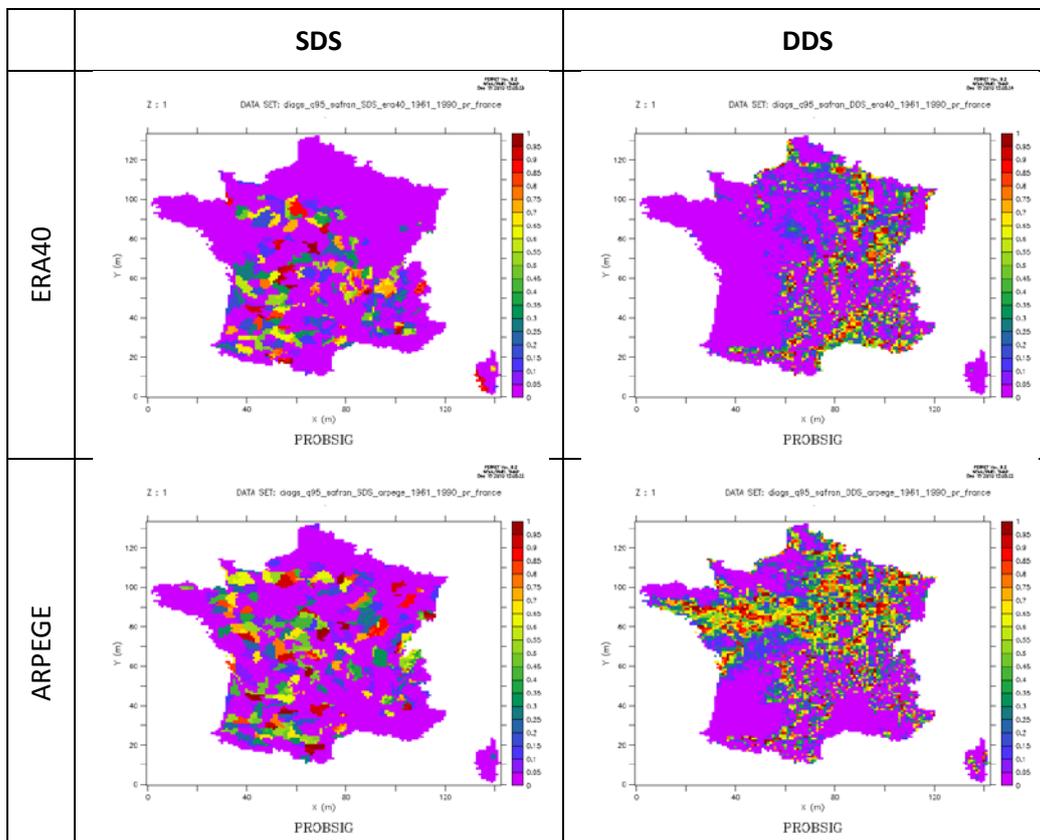


Figure 16 : Probabilité de significativité de la précipitation totale pour les désagrégations d'ERA40 et d'ARPEGE par rapport aux données SAFRAN. En dessous de 0.9 (90%) on considère que les différences entre les séries ne sont pas significatives.

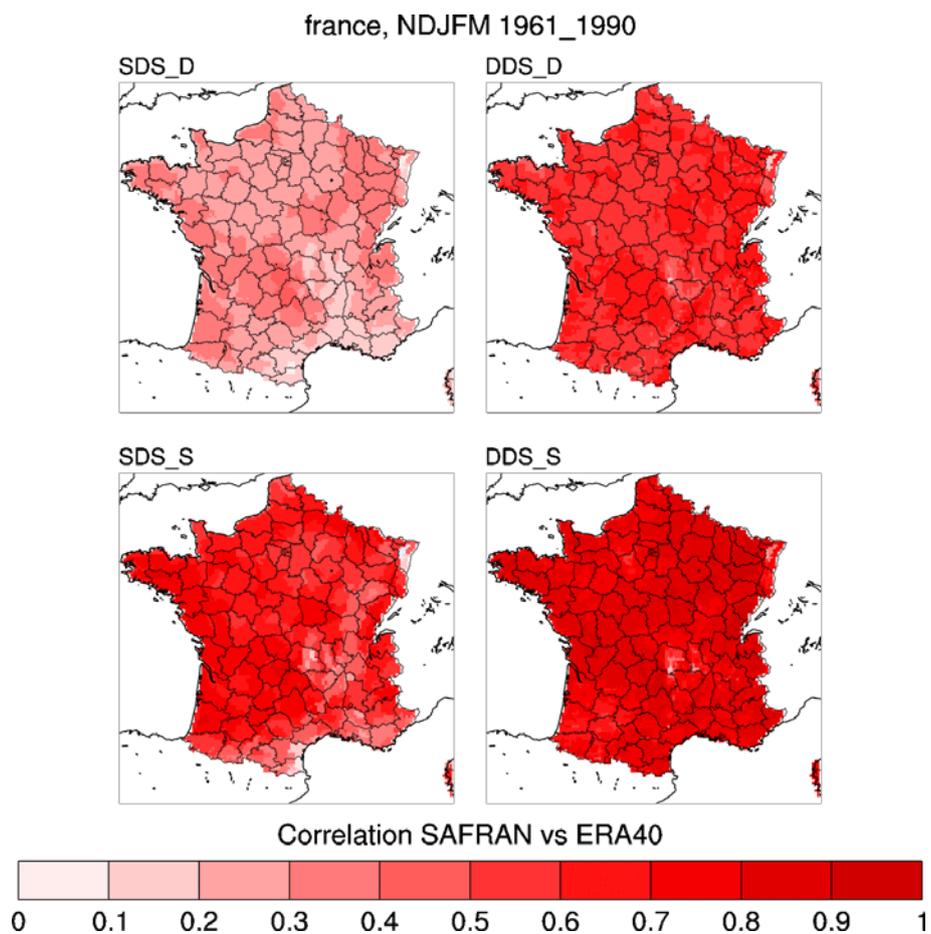


Figure 17 : Corrélations journalière (ligne du haut) et saisonnière (NDJFM, ligne du bas) entre la précipitation totale de SDS\_ERA40 et de DDS\_ERA40 par rapport aux données SAFRAN. (A rattacher aux Figure 2 et Figure 3, p. 11)

## Scénarios

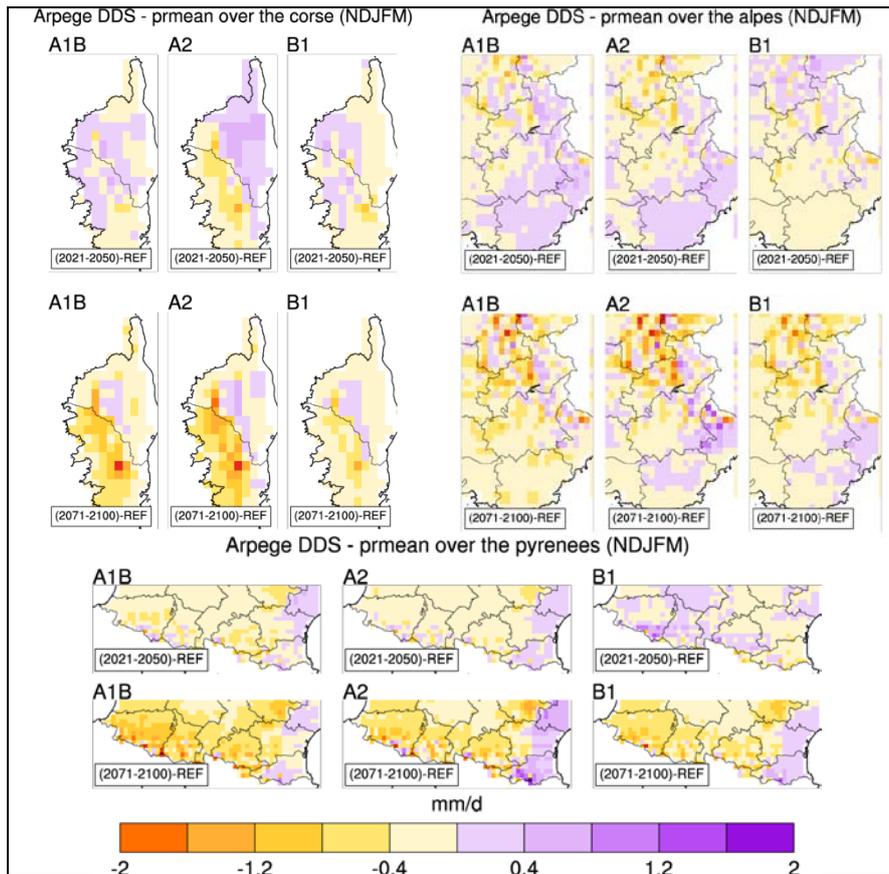


Figure 18 : Précipitation totale moyenne, DDS d'ARPEGE

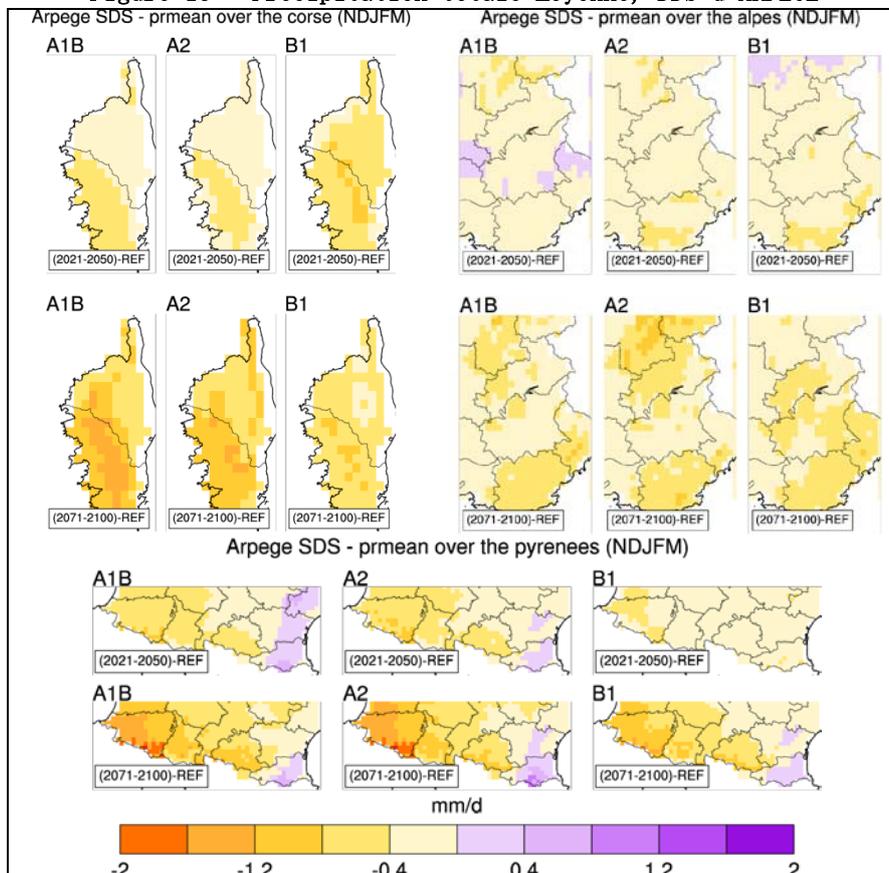


Figure 19 : Précipitation totale moyenne, SDS d'ARPEGE

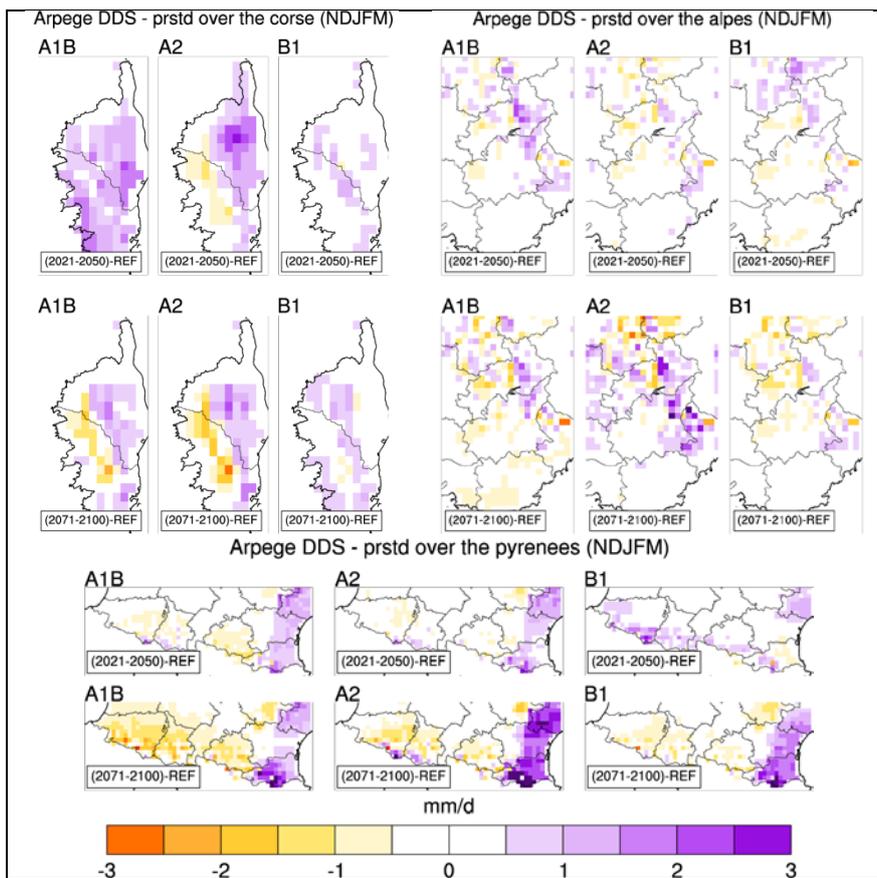


Figure 20 : Variabilité interannuelle de la précipitation totale, DDS d'ARPEGE

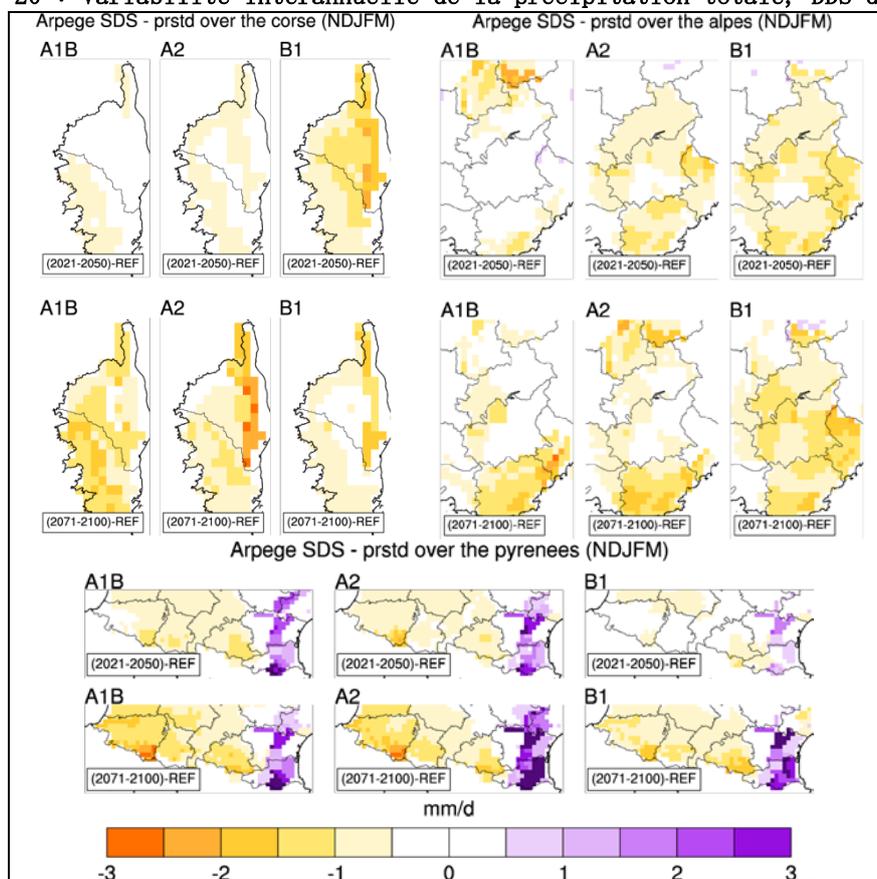


Figure 21 : Variabilité interannuelle de la précipitation totale, SDS d'ARPEGE

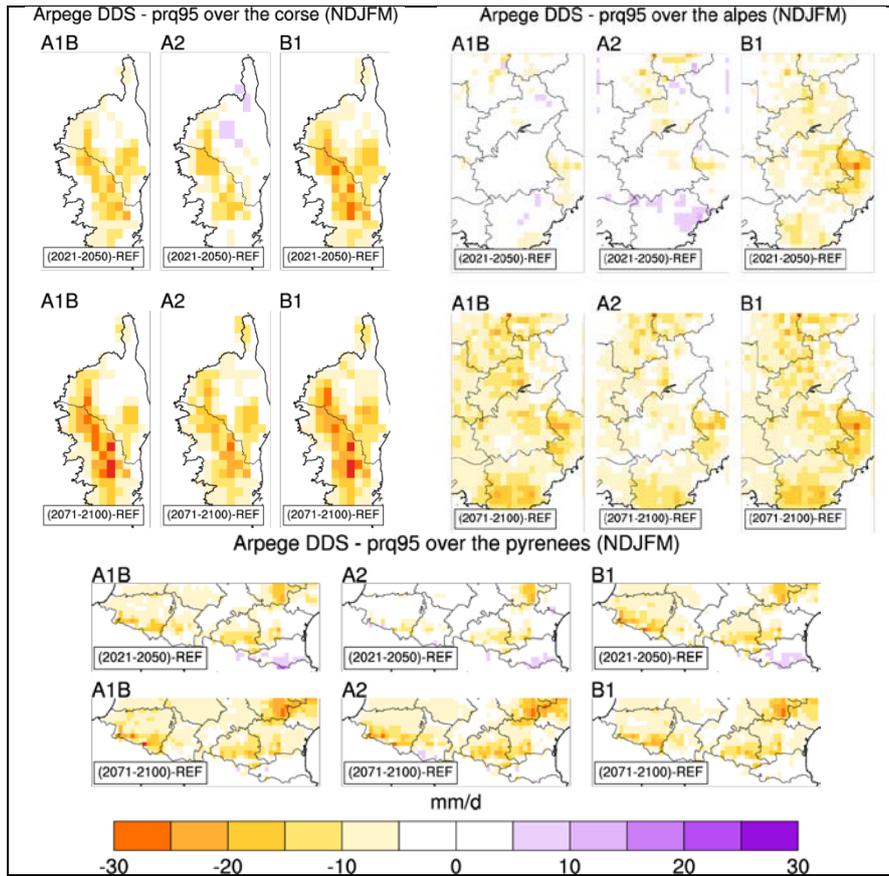


Figure 22 : Quantile 95 de la précipitation totale, DDS d'ARPEGE

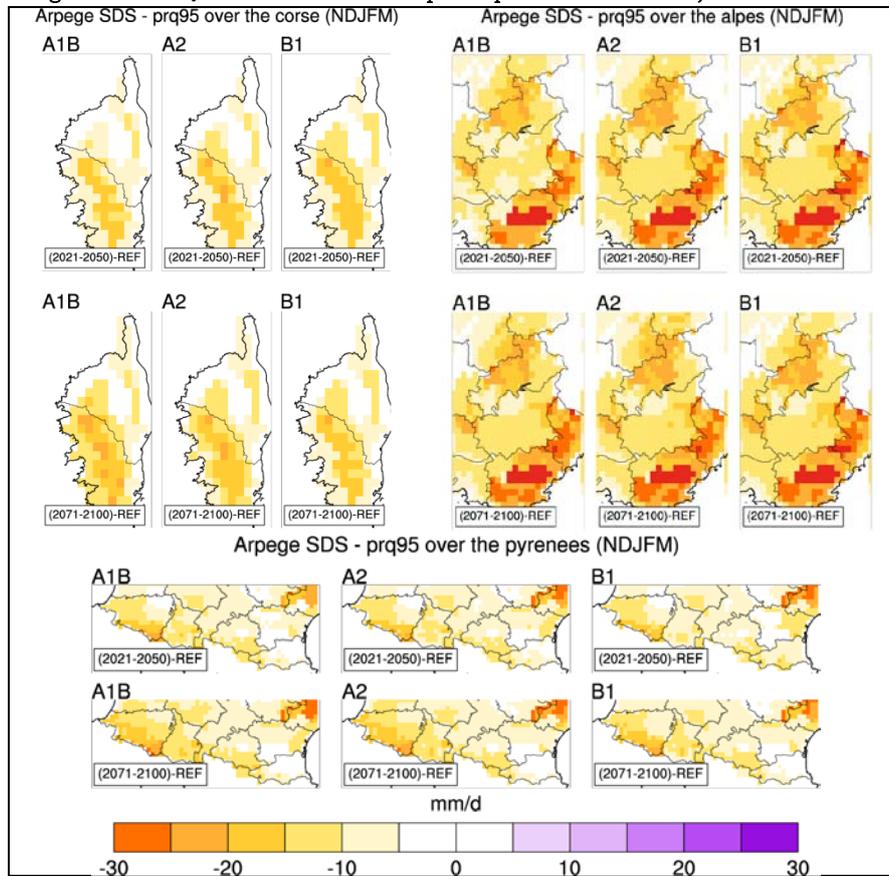


Figure 23 : Quantile 95 de la précipitation totale, SDS d'ARPEGE