



HAL
open science

Évaluation du devenir de la circulation atmosphérique dans le sud-est de la France et de l'enneigement dans les Alpes du Sud entre 1950 et 2100

Guillaume Guerin

► **To cite this version:**

Guillaume Guerin. Évaluation du devenir de la circulation atmosphérique dans le sud-est de la France et de l'enneigement dans les Alpes du Sud entre 1950 et 2100. Géographie. Université Côte d'Azur, 2024. Français. NNT : 2024COAZ2034 . tel-04876325

HAL Id: tel-04876325

<https://theses.hal.science/tel-04876325v1>

Submitted on 9 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT

Évaluation du devenir de la circulation
atmosphérique dans le sud-est de la France et
de l'enneigement dans les Alpes du Sud entre
1950 et 2100.

Guillaume GUERIN

UMR 7300 ESPACE / CNRS

Présentée en vue de l'obtention du
grade de docteur en géographie de
l'Université Nice Côte d'Azur

Dirigée par : Dennis Fox, Nicolas Viaux

Soutenue le : 5/12/2024

Devant le jury, composé de :

Dominique DUMAS, Professeur, Université
de Lyon

Guillaume FORTIN, Professeur, Université
de Moncton

Dennis FOX, Professeur, Université Côte
d'Azur, Nice

Sandra ROME, Maître de conférences, Uni-
versité de Grenoble

Nicolas VIAUX, Maître de conférences, Uni-
versité Côte d'Azur, Nice



**Évaluation du devenir de la circulation atmosphérique dans le sud-est
de la France et de l'enneigement dans les Alpes du Sud entre 1950 et
2100.**

Jury :

Rapporteurs

Dominique DUMAS, Professeur, Université de Lyon (président du jury)
Guillaume FORTIN, Professeur, Université de Moncton

Examineur

Sandra ROME, Maître de conférences, Université de Grenoble

Titre : Évaluation du devenir de la circulation atmosphérique dans le sud-est de la France et de l'enneigement dans les Alpes du Sud entre 1950 et 2100.

Résumé : La thèse explore les impacts du réchauffement climatique sur la circulation atmosphérique et l'enneigement dans le sud-est de la France, en particulier les Alpes du Sud. Le réchauffement climatique affecte la région méditerranéenne de manière significative, provoquant des variations dans les précipitations neigeuses et la couverture neigeuse depuis les années 1980. Les Alpes du Sud, dépendantes du manteau neigeux pour le tourisme hivernal, sont particulièrement vulnérables à ces changements. L'étude s'articule autour de plusieurs objectifs clés : analyser les évolutions historiques des précipitations neigeuses, comprendre les mécanismes synoptiques responsables des chutes de neige, et projeter l'avenir de l'enneigement en utilisant des modèles climatiques. Les questions de recherche incluent également l'identification des circulations atmosphériques spécifiques influençant les précipitations neigeuses. La thèse s'appuie sur des réanalyses climatiques (ERA-INTERIM et ERA5), des modèles de projections CMIP6 et des observations locales de stations nivologiques du réseau Météo-France, pour analyser les tendances passées et futures. Des techniques statistiques avancées, telles que l'analyse en composantes principales et la classification ascendante hiérarchique, sont utilisées pour développer une classification précise des types de circulation atmosphérique. Les résultats montrent une tendance générale au réchauffement, avec une augmentation des températures et une variabilité accrue des précipitations solides. Les configurations cycloniques et méridionales sont identifiées comme favorisant les chutes de neige abondantes, particulièrement en présence de dépressions sur l'Atlantique Nord et l'Europe occidentale. Les scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) montrent des variations à la baisse dans la fréquence des circulations atmosphériques favorables aux précipitations neigeuses, suggérant des changements significatifs dans la dynamique climatique de la région. La thèse apporte donc une contribution importante à la climatologie régionale en améliorant la compréhension des interactions entre circulation atmosphérique et précipitations solides dans les Alpes du Sud. Elle propose des projections futures cruciales pour la gestion des ressources en eau et l'adaptation des infrastructures touristiques dans un contexte de réchauffement climatique.

Mots clés : Réchauffement climatique ; Précipitations solides ; Circulation atmosphérique ; Alpes du Sud ; Projections climatiques.

Title : The evaluation of future atmospheric circulation in southeastern France and snow cover in the southern Alps between 1950 and 2100.

Abstract : The thesis explores the impacts of climate change on atmospheric circulation and snow cover in southeastern France, particularly in the Southern Alps. Climate change significantly affects the Mediterranean region, causing variations in snowfall and snow cover since the 1980s. The Southern Alps, which rely heavily on snow cover for winter tourism, are particularly vulnerable to these changes. The study focuses on several key objectives : analyzing historical trends in snowfall, understanding the synoptic mechanisms responsible for solid precipitation, and projecting the future of snowfall using climate models. The research questions also include identifying specific atmospheric circulations that influence snowfall. The thesis draws on climate reanalyses (ERA-INTERIM and ERA5), CMIP6 projection models, and local observations from the Météo-France network of snow stations to analyze past and future trends. Advanced statistical techniques, such as Principal Component Analysis and Hierarchical Ascendant Classification, are used to develop a precise classification of atmospheric circulation types. The results show a general warming trend, with rising temperatures and increased variability in solid precipitation. Cyclonic and meridional configurations are identified as favoring heavy snowfalls, particularly in the presence of depressions over the North Atlantic and Western Europe. SSP (Shared Socioeconomic Pathways)

scenarios show a downward trend in the frequency of atmospheric circulations favorable to snowfall, suggesting significant changes in the region's climate dynamics. The thesis thus makes an important contribution to regional climatology by enhancing the understanding of interactions between atmospheric circulation and solid precipitation in the Southern Alps. It offers crucial future projections for water resource management and the adaptation of tourist infrastructure in a warming climate context.

Keywords : Climate Change ; Solid Precipitation ; Atmospheric Circulation ; Southern Alps ; Climate Projections.

REMERCIEMENTS.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Nicolas Viaux, dont les compétences et les connaissances m'ont accompagné tout au long de cette thèse. Son soutien constant et son expertise ont été essentiels à la réussite de ce travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers le directeur de ma thèse, Denis Fox, qui m'a offert un encadrement scientifique essentiel tout au long de mon parcours en licence et en master. Ses précieux conseils m'ont permis d'acquérir une rigueur dans mes recherches, et ont joué un rôle clé, notamment dans la rédaction de mes articles.

Je voudrais également remercier chaleureusement Margot Chapuis et Sylvain Bigot pour leur soutien précieux lors des comités de suivi de thèse. Leurs conseils avisés ont largement contribué à l'avancement de mes recherches.

Je remercie également les nombreux relecteurs internationaux de mes articles, dont les retours critiques ont grandement enrichi mon travail.

Enfin, je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à la personne qui m'a le plus poussé et motivé dans la réalisation de ce projet : Lolita Dugué. Son accompagnement, semaine après semaine, m'a permis de garder le cap et de ne jamais abandonner. Sans elle, cette thèse n'aurait pas vu le jour ...

TABLE DES MATIÈRES

Chapitre introductif	1
Contexte et objet d'étude	1
Questions de recherche	2
Objectifs décomposés par article	3
Contribution globale de la thèse à la climatologie	4
Structure de la thèse	4
Chapitre 1 : Réchauffement climatique, précipitations solides et conditions de circulation atmosphérique	8
1.1 Introduction	8
1.2 Revue de la littérature	8
1.2.1 <i>Effet global du réchauffement climatique sur la neige</i>	8
1.2.2 <i>Effets régionaux dans les Alpes du Sud</i>	9
1.3 Mécanismes synoptiques responsables des événements de précipitations solides	10
1.3.1 <i>Rôle des dépressions cycloniques et des anticyclones</i>	10
1.3.2 <i>Configuration cyclonique méridionale</i>	10
1.3.3 <i>Influence des oscillations naturelles</i>	10
1.3.4 <i>Implications pour les tendances futures</i>	11
1.4 Méthodologie	11
1.5 Résultats	11
1.5.1 <i>Tendances des précipitations solides et de la température à Isola 2000</i>	11
1.5.2 <i>Analyse des conditions de circulation atmosphérique</i>	13
1.6 Article 1 : Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps	14
1.6.1 <i>Résumé long</i>	15
1.6.2 <i>Contexte et objectifs de l'article</i>	16
1.6.3 <i>Discussion et limites de l'article</i>	17
1.6.4 <i>Positionnement de l'article dans la thèse</i>	17
1.7 Synthèse du chapitre 1	40
Chapitre 2 : Classification des circulations atmosphériques et précipitations solides	45
2.1 Introduction	45
2.2 Etat de l'art des principales classifications existantes	45
2.3 Présentation du réseau d'observation des précipitations solides	47
2.3.1 <i>Description du réseau de mesure</i>	47
2.3.2 <i>Classification des précipitations solides selon l'intensité des chutes</i>	49
2.4 Tendances climatiques concernant l'évolution des précipitations solides sur le réseau de mesure	50
2.4.1 <i>Analyse saisonnière (1985-2019)</i>	50
2.4.2 <i>Analyse mensuelle (1985-2019)</i>	52
2.5 Article 2 : Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification	54
2.5.1 <i>Résumé long</i>	55
2.5.2 <i>Contexte et objectifs de l'article</i>	56
2.5.3 <i>Discussion et limites de l'article</i>	56
2.5.4 <i>Positionnement de l'article dans la thèse</i>	57
2.6 Synthèse du chapitre 2	79

Chapitre 3 : Analyse des tendances passées de la fréquence des types de circulation atmosphérique propres aux précipitations solides	83
3.1 Introduction	83
3.2 Description des données ERA5	83
3.3 Méthode de production des types de circulation atmosphérique	84
3.4 Tendances décennales (1950-2019) des types de circulation atmosphérique	86
3.5 Article 3 : How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events	88
3.5.1 <i>Résumé long</i>	88
3.5.2 <i>Contexte et objectifs de l'article</i>	89
3.5.3 <i>Discussion et limites de l'article</i>	90
3.5.4 <i>Positionnement de l'article dans la thèse</i>	90
3.6 Synthèse du chapitre 3	118
Chapitre 4 : Projections des tendances futures de la fréquence des types de circulation atmosphérique	125
4.1 Introduction	125
4.2 Définition et rôles des données CMIP6	125
4.3 Méthode de projection des types de circulation atmosphérique	126
4.3.1 <i>Préparation des données</i>	127
4.3.2 <i>Analyse statistique et classification</i>	127
4.3.3 <i>Projection et scénarios SSP</i>	128
4.4 Projections à l'horizon 2100 des types de circulation atmosphérique	128
4.4.1 <i>Analyse de la fréquence d'occurrence des circulations STW et WA</i>	128
4.4.2 <i>Analyse des changements dans l'intensité des variables</i>	130
4.5 Article 4 : Evolution of atmospheric circulations and impacts on solid precipitation	131
4.5.1 <i>Résumé long</i>	132
4.5.2 <i>Contexte et objectifs de l'article</i>	133
4.5.3 <i>Discussion et limites de l'article</i>	133
4.5.4 <i>Positionnement de l'article dans la thèse</i>	134
4.6 Synthèse du chapitre 4	162
Chapitre 5 : Chapitre conclusif	166
Synthèse détaillée des principaux résultats des quatre articles	166
<i>Résultats du premier article</i>	166
<i>Résultats du deuxième article</i>	167
<i>Résultats du troisième article</i>	168
<i>Résultats du quatrième article</i>	169
Contribution globale de la thèse à la compréhension de l'interaction entre circulation atmosphérique et précipitations solides	169
<i>Amélioration de la compréhension des interactions atmosphériques</i>	170
<i>Développement de méthodologies spécifiques</i>	170
<i>Perspectives de recherches basées sur les résultats obtenus</i>	171
<i>Affinement et extension de la classification de la circulation atmosphérique</i>	171
<i>Intégration des facteurs socio-économiques dans les modèles climatiques</i>	171
Réponses aux questions initiales	172

CHAPITRE INTRODUCTIF.

CONTEXTE ET OBJET D'ÉTUDE.

Le réchauffement climatique, largement documenté par des instances scientifiques telles que le 6ème rapport du GIEC (IPCC, 2021) et le GREC-SUD (2018), affecte de manière significative la région méditerranéenne. Cette région, comme le reste de la planète, connaît une augmentation continue des températures de l'air depuis l'époque préindustrielle. Les projections climatiques pour le milieu et la fin du XXI^e siècle confirment la poursuite de ce réchauffement (WMO, 2022). Les Alpes du Sud, particulièrement sensibles aux changements climatiques, ont enregistré des variations dans les précipitations neigeuses et l'épaisseur de neige depuis les années 1980. Des études, notamment celles de Gobiet et al. (2014), Marty (2017) et Savi et al. (2021), mettent en évidence une diminution des ressources en neige à basse et moyenne altitude, un phénomène également observé par Verfaillie et al. (2018), Francon et al. (2020), et Matiu et al. (2021).

Les massifs du département français des Alpes-Maritimes, qui constituent la zone d'étude de cette thèse, dépendent largement du manteau neigeux pour le tourisme hivernal, une source économique cruciale pour les communautés locales. Les stations de ski comme Isola 2000, Valberg, et Auron attirent chaque année des milliers de touristes, générant des revenus substantiels et soutenant l'économie locale (Barbier, 1982 ; François et al., 2016 ; Joye, 2019). La diminution de l'enneigement constitue une menace pour la viabilité économique de ces stations et pour les emplois qu'elles génèrent. De plus, la neige joue un rôle essentiel dans la gestion des ressources en eau en agissant comme un réservoir naturel qui stocke l'eau en hiver et la libère progressivement au printemps et en été, alimentant ainsi les rivières et les nappes phréatiques (Magnier, 2013). La réduction de l'enneigement pourrait donc entraîner des pénuries d'eau, affectant à la fois l'approvisionnement en eau potable et les écosystèmes aquatiques. En outre, cela pourrait contribuer à une diminution de l'albédo terrestre, augmentant l'absorption de la chaleur solaire et exacerbant ainsi le réchauffement climatique (Picard et al., 2009 ; Thackeray et al., 2016). Ce phénomène crée un cycle de rétroaction positive particulièrement inquiétant pour l'avenir du climat. Enfin, des changements dans les schémas de précipitation, eux-mêmes influencés par les circulations atmosphériques (Shepherd, 2014), pourraient accroître la fréquence et l'intensité des événements météorologiques extrêmes, tels que les fortes chutes de neige suivies de dégels rapides, augmentant ainsi les risques d'inondation (Kysely et al., 2012 ; Carrega et al., 2021).

La thèse que je présente se décline sous la forme de quatre articles dont l'objet principal est l'analyse passée et future des précipitations neigeuses qui constituent le manteau neigeux sur les massifs montagneux. Il est couramment admis que les modèles climatiques régionaux actuels présentent des biais significatifs dans la représentation des précipitations, limitant ainsi la précision des projections locales (Barrier et al., 2013 ; Mahamadou et al., 2018). Ces modèles sont toutefois nettement plus robustes lorsqu'il s'agit de modéliser des variables typiques de la circulation atmosphérique telles que la pression au niveau de la mer ou la hauteur du géopotentiel (Boé et Terray, 2008 ; O'Loughlin, 2021 ; Kusumastuti et al., 2021). Ces variables peuvent servir à alimenter un modèle de classification de la circulation atmosphérique, qui est en grande

partie à l'origine du mécanisme de formation des chutes de neige. En effet, Bednorz (2013), Esteban et al. (2005), et Merino et al. (2014) ont démontré l'importance des circulations synoptiques pour comprendre les précipitations abondantes dans différentes régions montagneuses. Il est donc essentiel de développer une compréhension fine des interactions entre les circulations atmosphériques et les précipitations neigeuses afin de projeter l'avenir de l'enneigement dans les Alpes-Maritimes.

Toutefois, aucune étude approfondie sur les interactions entre l'échelle synoptique et les précipitations neigeuses n'a été menée spécifiquement pour les Alpes-Maritimes, une région unique en raison de ses caractéristiques topographiques et climatiques. Une classification plus fine et objective des circulations atmosphériques est donc nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes spécifiques des chutes de neige dans cette partie des Alpes. La combinaison d'analyses en composantes principales (ACP) et de classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) pourrait fournir un éclairage plus précis (Chiadjeu et al., 2016).

QUESTIONS DE RECHERCHE.

Les questions centrales de cette thèse se concentrent sur plusieurs thèmes liés à l'objet d'étude, à savoir l'avenir des précipitations neigeuses dans le département des Alpes-Maritimes. Ces questions explorent l'impact du réchauffement climatique actuel sur les précipitations, les mécanismes atmosphériques associés, le rôle des oscillations naturelles, ainsi que la précision des réanalyses et des modèles de projection CMIP6 dans l'élaboration des classifications de la circulation atmosphérique. Les problématiques abordées dans les quatre articles de la thèse peuvent être formulées comme suit :

- Quelles sont les circulations atmosphériques spécifiques qui influencent les précipitations neigeuses dans cette région ?
- Quels mécanismes synoptiques sous-tendent la formation des précipitations neigeuses ?
- Quel est l'impact de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et de l'Oscillation Arctique (AO) sur les régimes de précipitations neigeuses et les conditions climatiques locales ?
- Peut-on identifier, à l'aide d'outils de clustering et des réanalyses ERA5, des types spécifiques de circulations atmosphériques propices aux précipitations neigeuses dans le territoire étudié ?
- Comment la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses a-t-elle évolué de 1950 à 2019 dans le contexte du changement climatique contemporain ?
- Les modèles de projection CMIP6 sont-ils suffisamment fiables pour anticiper les types de circulation à l'horizon 2100 ?
- Comment la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses évoluera-t-elle entre 2030 et 2100 en fonction des différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ?
- Comment évoluera la limite pluie neige à l'horizon 2100 ?

Cette thèse, riche en interrogations, vise à apporter des réponses concrètes concernant l'avenir de l'enneigement dans les Alpes-Maritimes. Ces questions seront progressivement abordées

à travers un corpus de quatre articles interconnectés, destinés à être publiés dans des revues internationales à comité de lecture.

OBJECTIFS DÉCOMPOSÉS PAR ARTICLE.

Les objectifs de recherche de cette thèse sont répartis dans quatre articles distincts. Le premier article vise à analyser l'évolution des températures, des précipitations neigeuses et du manteau neigeux à Isola 2000, station météorologique de référence des Alpes-Maritimes, pour les mois de janvier à mars, depuis 1972. Cet article documente les tendances historiques afin d'identifier les évolutions liées au changement climatique pour le poste d'observation de Météo-France situé à une altitude de 1912 mètres. Un autre objectif est d'identifier les schémas de circulation atmosphérique associés aux précipitations neigeuses en utilisant des tests de corrélation entre un panel de variables atmosphériques d'échelle globale issues des réanalyses ERA-INTERIM. Les variables corrélées sont ensuite cartographiées, et des anomalies (différence entre la moyenne climatique et la moyenne par temps de neige) sont produites pour comprendre les mécanismes synoptiques à l'origine des précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes. Enfin, l'étude établit des relations entre les conditions de circulation atmosphérique et les classes de précipitations neigeuses, permettant de déterminer les types de circulation favorisant les fortes chutes de neige. Ce premier article vise ainsi à analyser les tendances climatiques historiques et à explorer les mécanismes atmosphériques sous-jacents pour mieux prédire et gérer les impacts futurs du changement climatique sur les régions montagneuses.

Le deuxième article a pour objectif d'analyser la fréquence saisonnière des précipitations neigeuses à la station de référence d'Isola 2000 entre 1985 et 2019, pour les mois de décembre à avril (DJFMA). Les tendances temporelles de ces précipitations sont examinées mois par mois afin de comprendre les variations interannuelles et les changements climatiques saisonniers. Cet article évalue également l'efficacité de la classification de Hess et Brezowsky pour produire des types de circulation atmosphérique spécifiques aux précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes.

Le troisième article vise à établir une classification de la circulation atmosphérique propre aux précipitations neigeuses, en utilisant des variables atmosphériques issues des réanalyses ERA5. Cette classification permet d'identifier les schémas influençant les événements neigeux. L'article analyse ensuite l'évolution de ces schémas sur plusieurs décennies, de 1950 à 2019, afin de comprendre comment les changements dans les schémas de circulation atmosphérique affectent les conditions nivales dans les montagnes européennes de latitude moyenne. Si la classification initiale s'avère robuste, elle servira de base à une seconde classification utilisant les modèles de projection climatiques CMIP6. Cela permettrait de prévoir les futurs schémas de précipitation jusqu'en 2100, en tenant compte de différents scénarios socio-économiques (SSP - CMIP6).

Le quatrième article examine les projections des schémas favorables aux précipitations neigeuses dans la zone d'étude jusqu'en 2060 et 2100, en utilisant conjointement les données des réanalyses ERA5 et celles des modèles climatiques CMIP6. Cet article se concentre sur deux types de circulations clés : la circulation cyclonique du sud avec un creux sur l'Europe occidentale (STW) et la circulation anticyclonique d'ouest (WA). L'article vise à comprendre comment ces schémas influencent les précipitations neigeuses et à prévoir leur évolution future

CHAPITRE INTRODUCTIF.

à l'aide d'outils de classification statistique tels que l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces méthodes offrent des perspectives pour la gestion et l'adaptation aux changements climatiques futurs dans les Alpes-Maritimes.

CONTRIBUTION GLOBALE DE LA THÈSE À LA CLIMATOLOGIE.

Cette thèse apporte plusieurs contributions significatives à la climatologie, en particulier dans le contexte des massifs des Alpes-Maritimes et des régions montagneuses similaires. Premièrement, en analysant les tendances historiques des précipitations neigeuses et de l'épaisseur de neige, cette thèse offre une compréhension approfondie des changements climatiques locaux sur plusieurs décennies. Les résultats, basés sur des séries de données longues et continues, sont cruciaux pour identifier des tendances de changement et fournir une base solide pour les projections futures. Elle met en lumière les effets du réchauffement climatique en montrant son impact direct sur la fréquence des précipitations neigeuses et l'épaisseur du manteau neigeux.

Deuxièmement, en utilisant des données de réanalyses et en corrélant ces données avec les observations de précipitations neigeuses, la thèse identifie les mécanismes atmosphériques précis qui influencent ces précipitations. Cette analyse détaillée enrichit la compréhension des processus synoptiques qui conduisent à des événements neigeux abondants. La thèse explore également l'influence des oscillations naturelles, telles que la North Atlantic Oscillation (NAO) et l'Arctic Oscillation (AO), sur les précipitations neigeuses. En clarifiant comment ces oscillations modulent les conditions climatiques locales, cette recherche contribue à une meilleure compréhension des interactions entre les variabilités climatiques d'échelle globale et les phénomènes météorologiques locaux.

Troisièmement, la thèse utilise des techniques statistiques avancées pour développer une classification plus précise des schémas de circulation propres aux précipitations neigeuses. Cette approche novatrice permet une meilleure discrimination des conditions synoptiques spécifiques qui favorisent les événements neigeux. Une projection de cette classification est ensuite réalisée à l'aide des modèles CMIP6, offrant ainsi une perspective sur l'avenir de l'enneigement dans le Sud-Est des Alpes.

En conclusion, cette thèse offre une contribution substantielle à la climatologie en améliorant la compréhension des tendances climatiques locales et des mécanismes atmosphériques influençant les précipitations neigeuses. Elle développe des méthodes de prédiction plus précises et, en se concentrant sur une région montagneuse sensible, enrichit le corpus de connaissances nécessaires pour gérer les effets du réchauffement climatique dans les régions similaires à travers le monde.

STRUCTURE DE LA THÈSE.

Cette recherche est présentée sous la forme d'une thèse par articles, composée de quatre articles et de cinq chapitres. Le premier chapitre, "Réchauffement climatique, précipitations solides et conditions de circulation atmosphérique", présente une revue de la littérature sur le réchauffement climatique, avec un accent particulier sur l'aspect nivologique. Ce chapitre détaille les tendances climatiques en termes de température de l'air, de précipitations neigeuses et d'épaisseur du manteau neigeux à la station d'Isola 2000. En outre, il explore les mécanismes

synoptiques responsables des événements neigeux dans la région étudiée. L'article 1, intitulé "Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the southern Alps : Case of the Isola 2000 weather station", ainsi que son résumé étendu, sont inclus à la fin de ce chapitre.

Le second chapitre, "Classification des circulations atmosphériques et précipitations solides", traite de la classification des circulations atmosphériques en relation avec les précipitations neigeuses. Il présente un état de l'art des principales classifications existantes et évalue spécifiquement la classification de Hess et Brezowsky dans le cadre de l'article 2, "Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification : case in the French department of the Alpes-Maritimes", qui est placé à la fin du chapitre, accompagné de son résumé étendu.

Le troisième chapitre, "Analyse des tendances passées de la fréquence des types de circulation atmosphérique propres aux précipitations solides", analyse les tendances passées (1950-2019, DJFMA) dans la fréquence des schémas de circulation propres aux précipitations neigeuses. Il présente les données ERA5 et décrit en détail la méthodologie employée pour produire ces schémas, avant de fournir une analyse de leur évolution sur plusieurs décennies. L'article 3, "How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region ? Use of the ERA5 reanalyses", est intégré à la fin du chapitre, avec son résumé étendu.

Le quatrième chapitre, "Tendances futures de la fréquence des types de circulation atmosphérique propres aux précipitations solides", explore les tendances futures (2030-2100, DJFMA) des types de circulations atmosphériques propices aux précipitations neigeuses. Il définit les données CMIP6 utilisées en entrée, ainsi que les projections à l'horizon 2100 concernant l'avenir des circulations atmosphériques favorables aux chutes de neige. L'article 4, "Evolution of atmospheric circulations and impacts on solid precipitation in the alpine stations of the Mediterranean region of the Côte d'Azur : Climatic perspectives until 2100 using ERA5 and CMIP6 data", conclut ce chapitre.

Enfin, le cinquième et dernier chapitre synthétise les résultats obtenus et propose une discussion sur les implications scientifiques et pratiques de cette thèse. Il se termine par des recommandations pour la recherche future.

Ainsi, les quatre articles sont interconnectés de manière à fournir une vue d'ensemble cohérente et exhaustive des tendances climatiques, des mécanismes atmosphériques, et des impacts socio-économiques. Chaque article contribue à un aspect spécifique de la thèse, tout en étant relié aux autres par une méthodologie et des objectifs communs, créant ainsi une recherche intégrée et multidimensionnelle sur les précipitations neigeuses et les conditions de circulation atmosphérique dans la zone d'étude. L'ensemble du corpus d'articles a été rédigé par Guillaume GUERIN en tant que premier auteur. Nicolas VIAUX, co-encadrant de la thèse, a activement contribué à l'analyse scientifique des articles ainsi qu'à leur révision approfondie.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE INTRODUCTIF.

Barbier, B., 1982 : *L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports)*. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 485-486, pp. 121-124.

Barrier, N., Tréguier, A.-M., Cassou, C., Deshayes, J., 2014 : *Influence des régimes de temps atmosphériques sur la circulation océanique de l'Atlantique Nord*. *La Météorologie, Météo et Climat*, 2014, 8(87), pp. 38-44. (<https://doi.org/10.4267/2042/54335>). (hal-01156419)

Bednorz, E., 2013 : *Synoptic conditions related to heavy snowfalls in Tatra mountains*. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*.

Boé, J., Terray, L., 2008 : *Régimes de temps et désagrégation d'échelle*. *La Houille Blanche*, N°2, pp. 45-51.

Capozzi, V., De Vivo, C., Budillon, G., 2022 : *Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015*. *The Cryosphere*, 16, 1741–1763. (<https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>).

Carrega, P., et al., 2021 : *Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes*. *Physio-Géo*, 16, 70. (<https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>).

Chiadjeu, O., Gratton, Y., St-Hilaire, A., 2016 : *Analyse multivariée des paramètres morphologiques des lacs de la province du Québec*. *Rapport No R1684, INRS-ETE, Québec (QC)*, vi + 23 p.

Esteban, P., Jones, P.D., Martín-Vide, J., Mases, M., 2005 : *Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees*. *International Journal of Climatology*, 25, 319-329.

François, H., Morin, S., Spandre, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., George-Marcelpoil, E., 2016 : *Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture)*. *La Houille Blanche*, N°4, pp. 66-84.

Francon, L., 2020 : *Influence du réchauffement climatique sur la croissance des ligneux bas dans les Alpes françaises : analyse dendroécologique de *Rhododendron ferrugineum* L. en contextes topoclimatiques contrastés*. *Géographie*. Université Clermont Auvergne. Français. ffNNT : 2020CLFAL021ff. fftel-03468756.

IPCC, 2021 : *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, L., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, J.B.R., Matthews, T.K., Maycock, T., Waterfield, T., Yelekçi, O., Zhou, B.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014 : *21st century climate change in the European Alps—a review*. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151.

Groupe Régional d'Experts sur le Climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD), 2018 : *Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud*, *Cahier Montagne, GeographR*.

Joye, J.-F., 2019 : *Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. Le point après l'annulation partielle du décret UTN*. *Journal Spécial des Sociétés*.

Kysely, J., Beguería, S., Beranová, R., Gaál, L., López-Moreno, J.-I., 2012 : *Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean*. *Global and Planetary Change*, 98-99, 63-74.

Mahamadou, Y., Saley, M., 2018 : *Analyse multimodèle régional de climat des régimes de précipitations et de températures au Niger*. *La Météorologie*, 50. (<https://doi.org/10.4267/2042/67430>).

CHAPITRE INTRODUCTIF.

Magnier, E., 2013 : *Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse). Thèse de doctorat en géographie, Paris et Lausanne, Université Paris IV Sorbonne et Université de Lausanne, 388 p.*

Marty, C., Schlögl, S., Bavay, M., Lehning, M., 2017 : *How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. The Cryosphere, 11, 517-529.*

Mathew, S.-S., Kumar, K.-K., 2019 : *Characterization of the long-term changes in moisture, clouds and precipitation in the ascending and descending branches of the Hadley Circulation. Journal of Hydrology, 570, 366-377. (<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.047>).*

Kusumastuti, C., Jiang, Z., Mehrotra, R., Sharma, A., 2021 : *A Signal Processing Approach to Correct Systematic Bias in Trend and Variability in Climate Model Simulations. Geophysical Research Letters, 48. (<https://doi.org/10.1029/2021GL092953>).*

Merino, A., Fernández, S., Hermida, L., López, L., Sánchez, J.L., García-Ortega, E., Gascón, E., 2014 : *Snowfall in the northwest Iberian Peninsula: synoptic circulation patterns and their influence on snow day trends. Scientific World Journal. (<https://doi.org/10.1155/2014/480275>). Epub 2014 Jul 24. PMID: 25152912; PMCID: PMC4134785.*

O'Loughlin, R., 2021 : *Robustness reasoning in climate model comparisons. Studies in History and Philosophy of Science Part A, 85, 34-43.*

Picard, G., Arnaud, L., Domine, F., Fily, M., 2009 : *Determining snow specific surface area from near-infrared reflectance measurements: numerical study of the influence of grain shape. Cold Regions Science and Technology, 56(1), 10-17. (<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.10.001>).*

Savi, S., Comiti, F., Strecker, M.R., 2021 : *Pronounced increase in slope instability linked to global warming: A case study from the eastern European Alps. Earth Surface Processes and Landforms, 46, 1328-1347. (<https://doi.org/10.1002/esp.5100>).*

Shepherd, T., 2014 : *Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. Nature Geoscience, 7, 703-708. (<https://doi.org/10.1038/ngeo2253>).*

Thackeray, S., Henrys, P., Hemming, D., et al., 2016 : *Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. Nature, 535, 241-245. (<https://doi.org/10.1038/nature18608>).*

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., Morin, S., 2018 : *Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. The Cryosphere, 12, 1249-1271.*

World Meteorological Organization, 2022 : *State of the Global Climate. WMO-No. 1316. 55 p. 978-92-63-11316-0.*

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

1.1 INTRODUCTION.

Ce chapitre examine l'impact du réchauffement climatique sur les précipitations solides et la couverture neigeuse, avec un focus particulier sur les Alpes du Sud et la station météorologique d'Isola 2000. Il débute par une revue de la littérature mettant en lumière les études qui montrent les effets significatifs des émissions anthropiques sur la diminution de la neige. Les recherches de Pulliainen (2024) et de Young (2023) sont discutées pour illustrer la réduction globale de la neige et ses conséquences écologiques et économiques. Le chapitre explore ensuite les défis auxquels sont confrontées les stations de ski européennes, soulignés par François et ses collègues (2016).

Il aborde également les études régionales spécifiques, telles que celles du CREA Mont-Blanc, qui montrent une diminution de la neige à des altitudes moyennes dans les Alpes françaises. En outre, à partir des conclusions tirées du premier article de la thèse, ce chapitre analyse les mécanismes synoptiques responsables des événements de précipitations solides à Isola 2000, en utilisant les réanalyses ERA-INTERIM pour identifier les variables atmosphériques les plus corrélées. Il décrit comment certaines configurations de circulation atmosphérique influencent les chutes de neige, offrant ainsi une base pour comprendre les impacts futurs du changement climatique.

Enfin, l'article intitulé « Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the southern Alps: Case of the Isola 2000 weather station » est inclus à la fin du chapitre. Cet article propose une analyse détaillée des tendances historiques des précipitations solides et des mécanismes atmosphériques associés à la station météorologique d'Isola 2000, établissant une base solide pour les analyses climatiques et météorologiques ultérieures de la thèse.

1.2. REVUE DE LA LITTÉRATURE.

1.2.1 Effet global du réchauffement climatique sur la neige.

Le réchauffement climatique a des impacts profonds et variés sur les précipitations solides et la couverture neigeuse à l'échelle mondiale, un phénomène largement étudié par de nombreux chercheurs. Des scientifiques, tels que Pulliainen, ont établi un lien direct entre la fonte de la neige et les émissions anthropiques, démontrant que les changements observés dans la couverture neigeuse au cours des quatre dernières décennies sont principalement dûs aux activités humaines (Pulliainen, 2021).

Les recherches menées par Young montrent une diminution significative de la couverture neigeuse mondiale depuis 2000, avec une baisse annuelle de 5.12 %. L'Asie et l'Europe sont les régions les plus affectées, tandis que l'Amérique du Nord enregistre la plus faible diminution relative par rapport à sa superficie totale (Young, 2022). La réduction de la couverture neigeuse a des conséquences importantes sur les écosystèmes montagnards et les ressources en eau, affectant directement la biodiversité et les activités humaines.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

Une étude menée par François et ses collègues, publiée dans *Nature Climate Change*, évalue l'impact du réchauffement climatique sur les stations de ski européennes. Sans recours à la neige artificielle, entre 53 % et 98 % des stations de ski seraient à très haut risque de pénurie de neige sous un réchauffement global de 2 °C à 4 °C. L'étude souligne les défis auxquels les stations de ski devront faire face, notamment l'augmentation de la demande en eau et en électricité nécessaires à la production de neige artificielle (François et al., 2023).

1.2.2 Effets régionaux dans les Alpes du Sud.

L'enneigement des massifs des Alpes du Sud est particulièrement vulnérable au réchauffement climatique. Les études menées par le CREA Mont-Blanc montrent qu'à partir de 1970, la quantité de neige tombant à des altitudes moyennes a diminué, réduisant la période de couverture neigeuse de près d'un mois dans le massif du Mont-Blanc. À des altitudes plus élevées (> 2 500 m), bien que les niveaux de précipitations hivernales soient restés stables, les températures plus élevées au printemps et en été ont conduit à une fonte plus rapide de la neige (Bonnet et al., 2016).

Une étude utilisant le modèle climatique régional MAR a analysé les tendances de la neige et des précipitations dans les Alpes françaises, y compris la région du Mercantour. Cette étude, couvrant la période de 1902 à 2010, montre une diminution significative de la durée de la couverture neigeuse, particulièrement marquée aux altitudes basses et moyennes (Beaumont et al., 2021).

Ainsi, les précipitations sont directement affectées par le réchauffement climatique. Une étude utilisant les données de réanalyse ERA-INTERIM a révélé que les précipitations solides sont de plus en plus rares à basse et moyenne altitude, où la neige est souvent remplacée par de la pluie en raison de l'élévation des températures (EPA, 2023). Les recherches sur les Alpes du Sud montrent que les précipitations solides sont essentielles pour la régénération du manteau neigeux et qu'elles sont fortement corrélées avec des variables atmosphériques telles que la température de l'air, l'humidité spécifique et la pression au niveau de la mer. Ces corrélations aident à comprendre comment les changements climatiques affectent les précipitations solides et, par conséquent, la couverture neigeuse (François et al., 2023).

De plus, les précipitations solides dans les Alpes du Sud sont fortement influencées par les conditions de circulation atmosphérique. Des études ont montré que certaines configurations de circulation, telles que les dépressions centrées sur l'Islande et les anticyclones sur les Açores et la mer Noire, favorisent les flux d'air humide vers les Alpes, entraînant des chutes de neige importantes (Bonnet et al., 2016). Par exemple, des circulations cycloniques occidentales sont souvent associées à des chutes de neige modérées, tandis que des circulations méridionales avec des dépressions centrées sur l'Islande sont liées à des chutes de neige abondantes (Bonnet et al., 2016). La compréhension de ces dynamiques est cruciale pour prévoir les impacts futurs du réchauffement climatique sur les régimes de précipitations solides et la couverture neigeuse.

En résumé, le réchauffement climatique affecte la couverture neigeuse mondiale, avec des conséquences particulièrement marquées dans les Alpes du Sud. Les recherches montrent une tendance à la diminution des précipitations solides et de la couverture neigeuse, affectant les écosystèmes locaux et les activités humaines, notamment les stations de ski.

1.3 MÉCANISMES SYNOPTIQUES RESPONSABLES DES ÉVÉNEMENTS DE PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Les précipitations solides, telles que la neige, sont influencées de manière significative par les configurations de circulation atmosphérique à grande échelle, appelées mécanismes synoptiques. Ces mécanismes comprennent des systèmes de pression, des flux d'air, et des conditions thermodynamiques qui déterminent non seulement la nature mais aussi la quantité des précipitations qui se produisent dans une région donnée.

1.3.1 Rôle des dépressions cycloniques et des anticyclones.

Les configurations synoptiques associées aux précipitations solides dans les Alpes du Sud sont principalement déterminées par l'interaction entre les dépressions cycloniques et les anticyclones (Bednorz., 2013). Les dépressions centrées sur l'Islande, par exemple, sont connues pour entraîner des flux d'air humide et froid vers les Alpes, favorisant ainsi des chutes de neige abondantes (Bednorz., 2013). Ce type de circulation est souvent associé à des conditions météorologiques hivernales rigoureuses dans la région (Bednorz., 2013). À l'inverse, les anticyclones situés sur les Açores ou la mer Noire tendent à bloquer les flux d'air humide, réduisant ainsi les précipitations neigeuses (Bednorz., 2013). Ces anticyclones sont souvent responsables des périodes de type de temps sec et froid qui suivent les tempêtes de neige, limitant les nouvelles accumulations de neige (Bednorz., 2013).

1.3.2 Configuration cyclonique méridionale.

Une autre configuration clé pour les précipitations solides dans les Alpes du Sud est la circulation cyclonique méridionale (Merino et al., 2014). Cette configuration est caractérisée par une goutte froide centrée sur l'Italie ou l'Adriatique, qui entraîne des flux d'air humide en provenance du sud-ouest (Merino et al., 2014). Ces flux d'air, lorsqu'ils rencontrent les versants sud des Alpes, provoquent des chutes de neige importantes, notamment à des altitudes moyennes (Merino et al., 2014). Cette configuration est particulièrement importante pour comprendre les événements de neige abondante dans les Alpes-Maritimes, où les précipitations neigeuses peuvent être intensifiées par la topographie régionale et les interactions complexes entre les flux d'air chaud et humide provenant de la Méditerranée (Merino et al., 2014).

1.3.3 Influence des oscillations naturelles.

Les oscillations naturelles, telles que la North Atlantic Oscillation (NAO) et l'Arctic Oscillation (AO), jouent également un rôle crucial dans la modulation des conditions synoptiques favorables aux précipitations solides (Hurrell et al., 2013). Par exemple, une phase positive de la NAO est souvent associée à un renforcement des dépressions atlantiques, ce qui augmente la probabilité de chutes de neige dans les Alpes du Sud (Hurrell et al., 2013). D'autre part, une phase négative de l'AO peut entraîner des descentes d'air arctique plus au sud, provoquant des périodes de froid intense accompagnées de neige abondante (Hurrell et al., 2013).

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

Ces oscillations influencent non seulement la fréquence mais aussi l'intensité des événements de précipitations solides dans la région (Hurrell et al., 2013).

1.3.4 Implications pour les tendances futures.

La compréhension de ces mécanismes synoptiques est essentielle pour projeter les impacts futurs du réchauffement climatique sur les régimes de précipitations solides dans les Alpes du Sud. Les changements dans la fréquence et l'intensité des configurations synoptiques favorables aux chutes de neige auront des répercussions directes sur l'enneigement des stations de ski et la disponibilité des ressources en eau dans cette région montagneuse. Par conséquent, une analyse approfondie de ces configurations peut fournir des indications précieuses pour l'adaptation des infrastructures et des pratiques de gestion de l'eau dans le contexte du changement climatique.

1.4 MÉTHODOLOGIE.

Les travaux exposés dans le 1^{er} article (Guerin & Viaux, 2022), utilisent une combinaison de variables atmosphériques provenant des réanalyses ERA-INTERIM et d'observations directes à long terme de la station météorologique d'Isola 2000 pour analyser les changements dans les précipitations solides et les températures.

L'approche méthodologique inclut des analyses statistiques pour identifier les tendances à long terme et les variations saisonnières de cet ensemble de variables. De plus, les réanalyses atmosphériques ERA-INTERIM (réanalyses disponibles au moment du démarrage de ces travaux) sont employées pour examiner les configurations moyennes de circulation atmosphérique durant les épisodes de précipitations solides, en se basant sur des variables telles que la température, l'humidité, la pression et la direction du vent à différentes altitudes. Cela permet de corréler ces variables avec les événements de précipitations solides observés au poste de mesure. Cette approche intégrée aide à comprendre non seulement les tendances des précipitations et des températures, mais aussi les processus atmosphériques qui les influencent.

1.5 RÉSULTATS.

1.5.1 Tendances des précipitations solides et de la température à Isola 2000.

Les résultats montrent une augmentation significative des températures minimales, moyennes et maximales, mesurées à la station d'Isola 2000 pendant les mois de janvier à mars depuis les années 2000 (Figure 1). Cette tendance au réchauffement est corrélée avec une variabilité accrue des précipitations solides, marquée par une diminution initiale jusqu'au début des années 1990, suivie d'une nouvelle augmentation (Figure 2). Il faut néanmoins considérer cette évolution des précipitations solides avec prudence, puisque la durée de la période étudiée (1972-2019) et les mois inclus dans l'analyse (janvier à mars) influencent le résultat final. Une simple extension de la saison (par exemple en incluant décembre et avril) pourrait changer drastiquement la tendance observée.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

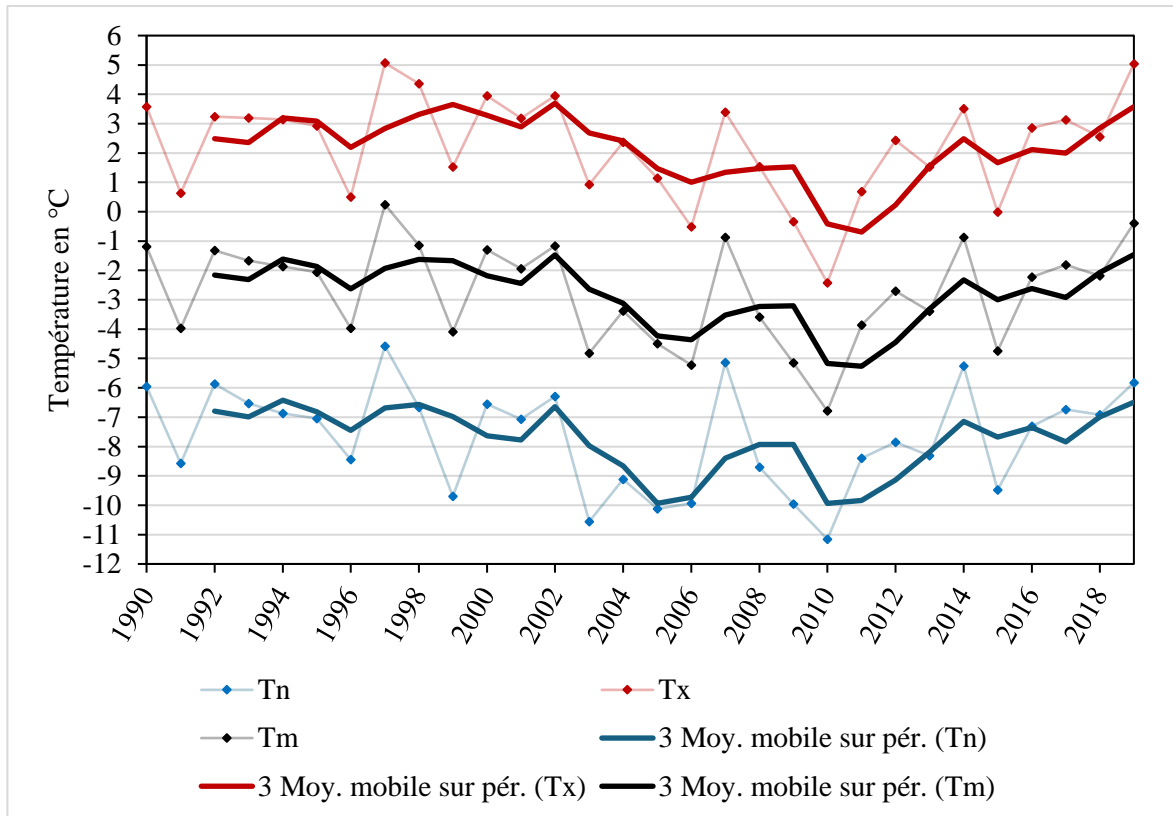


Figure 1 : Moyenne mobile sur 3 ans de la température annuelle moyenne (Tm), de la température minimale (Tn) et de la température maximale (Tx), mesurées de janvier à mars entre 1990 et 2019, à la station météorologique d'Isola 2000 (Source : Météo-France).

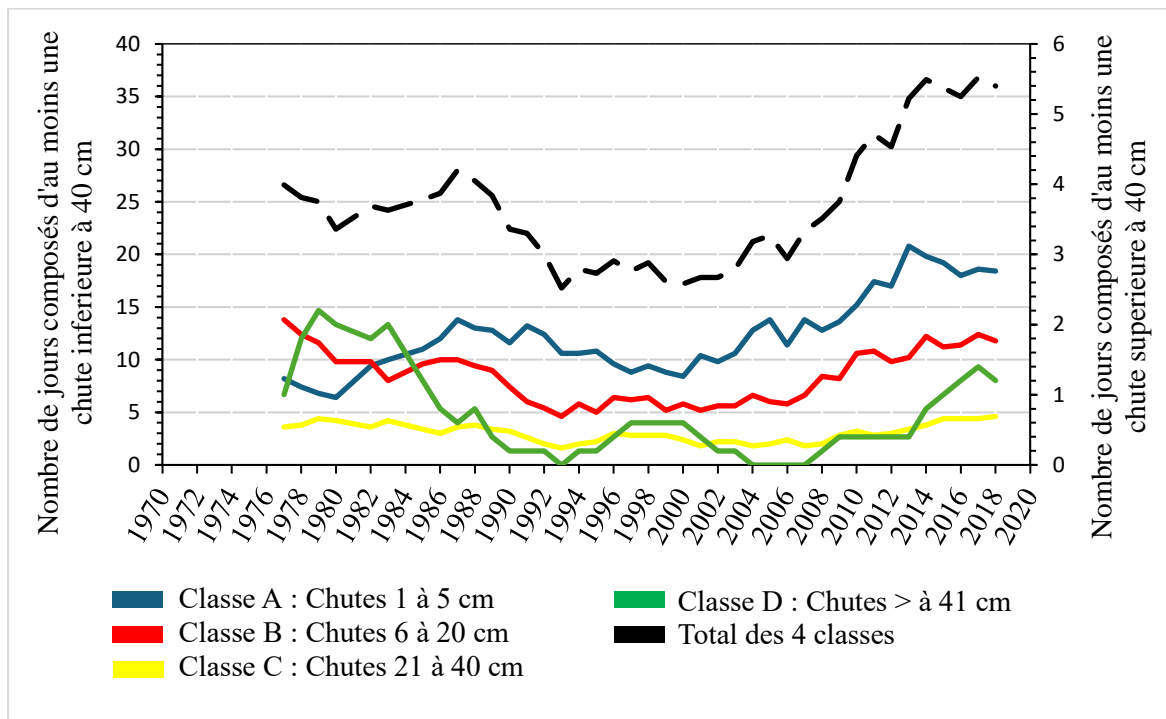


Figure 2 : Évolution du nombre de jours, composés au minimum d'une chute de neige quotidienne, par classe (« A », « B », « C », « D ») et par an à Isola 2000 entre 1972 et 2018, pour les mois de janvier à mars. Pour la classe "D", les nombres se lisent sur l'axe des ordonnées à droite, tandis que pour les 3 autres classes, l'axe de référence est à gauche (Source : Météo-France).

1.5.2 Analyse des conditions de circulation atmosphérique.

L'analyse des conditions de circulation atmosphérique a permis d'identifier les configurations spécifiques qui favorisent les précipitations solides à Isola 2000. En utilisant les données de réanalyse ERA-INTERIM, les principales configurations de circulation atmosphérique associées aux épisodes neigeux ont été cartographiées. Cette cartographie a révélé plusieurs types de circulation ayant une influence significative sur la fréquence et l'intensité des précipitations solides.

Les configurations cycloniques, caractérisées par la présence de dépressions sur l'Europe occidentale, se sont révélées être particulièrement propices aux chutes de neige abondantes (Figure 3). Ces configurations sont souvent accompagnées de flux d'air humide et froid en provenance de l'Atlantique Nord, ce qui crée des conditions favorables à la formation de neige. En revanche, les configurations anticycloniques situées au-dessus de la Méditerranée ou de l'Europe centrale tendent à limiter les précipitations neigeuses, en raison de la stabilisation de l'atmosphère et de l'augmentation des températures locales.

L'analyse a également montré que les circulations méridionales, associées à des dépressions centrées sur la région méditerranéenne, peuvent entraîner des épisodes de précipitations solides significatives, en particulier lorsque ces flux d'air chaud et humide rencontrent les versants sud des Alpes. Ces configurations sont souvent responsables des événements neigeux extrêmes observés à Isola 2000, avec des accumulations de neige importantes sur de courtes périodes.

En combinant les résultats de cette analyse avec les tendances des précipitations et des températures, il est possible de mieux comprendre les mécanismes atmosphériques sous-jacents qui influencent les précipitations solides à Isola 2000. Ces informations sont cruciales pour anticiper les changements futurs dans les régimes de neige, en particulier dans le contexte du réchauffement climatique. La corrélation entre les configurations de circulation identifiées et les anomalies climatiques observées renforce l'importance de ces configurations dans la prévision des épisodes neigeux.

Les résultats principaux du premier article ont été présentés de manière succincte. La section suivante présente l'intégralité du premier article publié dans le cadre de cette thèse.

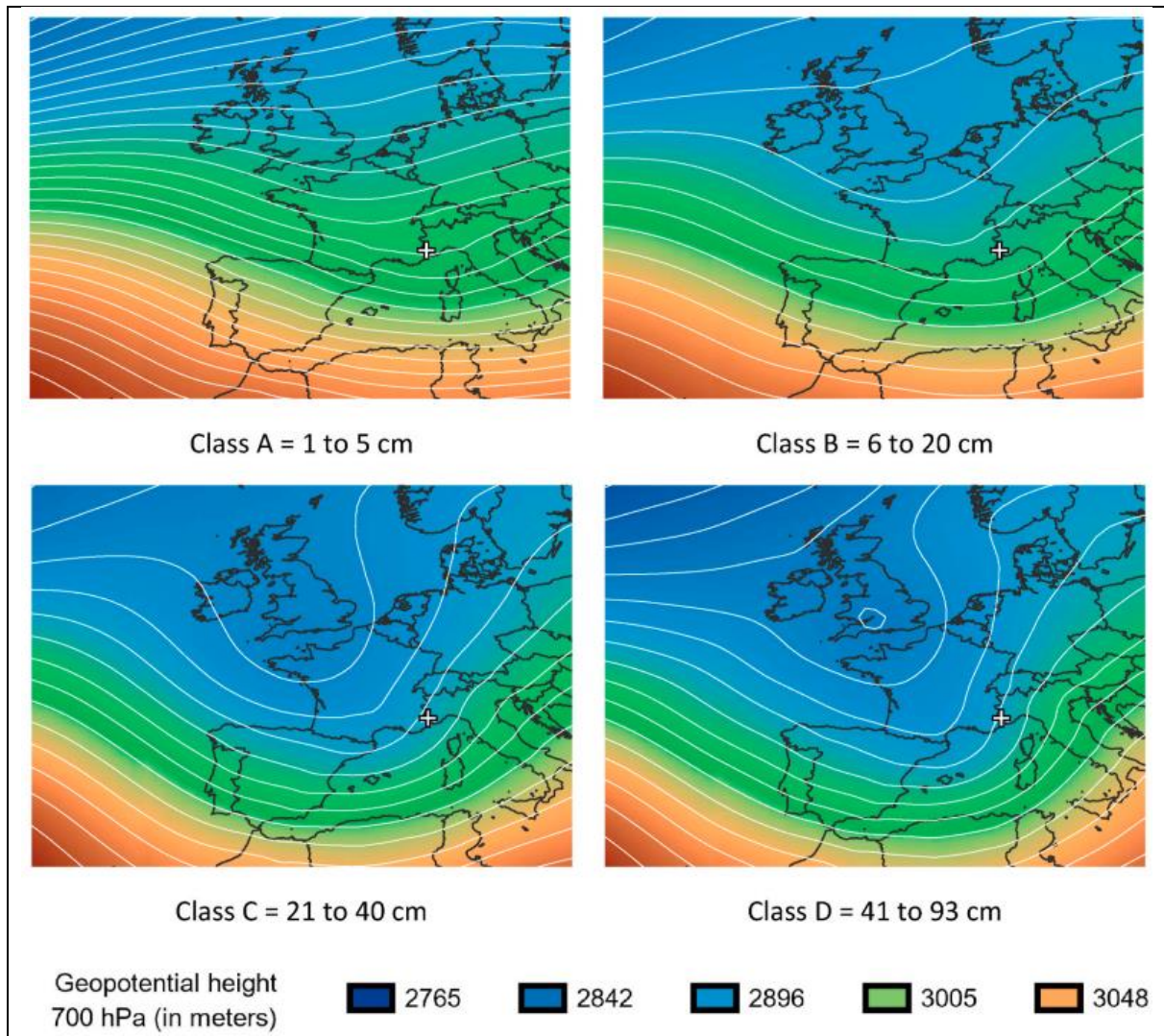


Figure 3 : Altitude du géopotiel 700 hPa (en m) pour les classes 1-5 cm (A), 6-20 cm (B), 21-40 cm (C) et 41 cm et plus (D) (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

1.6 ARTICLE 1 : « ATMOSPHERIC CIRCULATION CONDITIONS AND SNOWY WEATHER IN THE SOUTHERN ALPS : CASE OF THE ISOLA 2000 WEATHER STATION ».

Cette partie débute par un résumé approfondi du premier article de la thèse, offrant ainsi une vue d'ensemble des observations et des analyses réalisées. Ensuite, le contexte de l'étude est présenté, avec une explication claire des objectifs spécifiques que cet article vise à atteindre dans le cadre de la recherche globale. Une discussion suit, où les résultats de l'article sont mis en relation avec d'autres études, soulignant les contributions uniques de l'article tout en reconnaissant les limites méthodologiques qui ont pu influencer les conclusions. Enfin, avant la présentation intégrale de l'article, une sous-partie sur son positionnement dans la thèse vient clore cette section, en situant l'article dans le contexte plus large de la thèse, expliquant comment il s'intègre dans le fil conducteur de la recherche et en quoi il contribue aux objectifs globaux de la thèse.

1.6.1 Résumé long.

Les Alpes du Sud en France, comme le reste du monde, connaissent une augmentation des températures depuis l'époque préindustrielle. Les projections climatiques pour le XXI^e siècle prévoient une poursuite de ce réchauffement, impactant la cryosphère (GREC-SUD, 2018 ; 6th IPCC report, 2021). Les Alpes européennes ressentent déjà ces effets, avec une diminution de l'épaisseur du manteau neigeux observée depuis la fin des années 1980, principalement à basse et moyenne altitude (Gobiet et al., 2014 ; Marty, 2017 ; Savi et al., 2021). Cela pose un sérieux problème, puisque la neige naturelle joue un rôle crucial pour les écosystèmes montagnards, les ressources en eau et le tourisme (Barbier, 1982 ; François et al., 2016 ; Joye, 2019).

L'étude se concentre sur la station météorologique d'Isola 2000 dans les Alpes-Maritimes en France. Cette station est une référence pour le département en termes de données nivologiques, grâce à une longue série de mesures débutant en 1972 et des lacunes relativement faibles comparées aux stations voisines. Le poste Météo-France d'Isola 2000 fournit des mesures de précipitations solides, de l'épaisseur du manteau neigeux et des températures locales, tandis que la réanalyse ERA-INTERIM du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) fournit les variables atmosphériques nécessaires pour une analyse synoptique. Au début des travaux, les réanalyses citées précédemment, représentaient les données à une échelle continentale avec la résolution la plus fine (79 km x 79 km). Également, un large panel de paramètres atmosphériques étaient disponibles et il existait un véritable consensus scientifique concernant leur fiabilité, justifiant leur utilisation (Zhu, 2021).

Les résultats montrent une augmentation saisonnière des températures moyennes, minimales et maximales mesurées à la station d'Isola 2000 depuis le milieu des années 2000 pour les mois de janvier, février et mars. Concernant la température de l'air atmosphérique (à 850 hPa), les anomalies positives sont prédominantes depuis les années 1990, indiquant un réchauffement significatif.

En ce qui concerne les précipitations neigeuses, les jours composés au minimum d'une chute sont classés en quatre catégories basées sur la quantité tombée en 24 heures : classe A (1-5 cm), classe B (6-20 cm), classe C (21-40 cm) et classe D (41-93 cm). L'analyse de la fréquence d'occurrence des précipitations solides s'est concentrée sur la période 1972 à 2019 de janvier à mars. Sur 1006 jours concernés, la classe A représente 54 % des occurrences, la classe B 32 %, la classe C 12 %, et la classe D 2 %. L'évolution de la fréquence totale des précipitations solides se divise en deux périodes : d'abord une diminution de 1972 au début des années 1990, puis une augmentation depuis le milieu des années 2000. De plus, l'épaisseur moyenne annuelle du manteau neigeux a fortement diminué de 1972 à 1993, puis a augmenté avant de se stabiliser depuis les années 2000, suivant ainsi la tendance des précipitations solides. Les valeurs actuelles restent cependant bien en dessous de celles relevées au début des années 1980.

Enfin, les corrélations entre les précipitations solides et les variables atmosphériques sont analysées pour identifier les conditions de circulation associées et comprendre les mécanismes de formation des chutes de neige. Les variables de grande échelle les plus corrélées incluent la vitesse verticale à 700 hPa, l'humidité spécifique à 850 hPa, la pression au niveau de la mer, la température de l'air à 850 hPa, la hauteur du géopotential à 700 hPa et les composantes U et V du vent à 700 hPa. Les cartes des configurations moyennes (des variables citées précédemment) lors des journées concernées par une chute, montrent une forte humidité et des

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

températures basses associées aux événements de classe C et D. Une dépression sur l'Atlantique Nord, accompagnée d'un creux orienté NO-SE, favorise les flux d'air humide provenant de la Méditerranée. Les circulations atmosphériques associées aux classes A et B sont principalement cycloniques d'ouest, tandis que les classes C et D sont associées à des circulations méridionales avec une dépression en Islande et un creux sur l'Europe occidentale.

1.6.2 Contexte et objectifs de l'article.

L'étude se concentre sur la station météorologique d'Isola 2000 dans les Alpes-Maritimes, reconnue pour ses longues séries de données nivologiques et climatiques depuis 1972. Utilisant à la fois des observations locales et des variables atmosphériques de grande échelle (réanalyses ERA-INTERIM), les travaux visent à comprendre l'évolution des précipitations solides et de l'épaisseur du manteau neigeux, ainsi qu'à identifier les conditions de circulation atmosphérique associées.

La station météorologique d'Isola 2000, gérée par Météo-France, est située à proximité du Parc National du Mercantour, plus précisément dans la station de sports d'hiver du même nom (44.1892N, 7.1496E, Z = 1912 m). La mer Méditerranée, située à seulement 40 km, influence significativement le climat local en apportant de l'humidité dans l'air et en augmentant les précipitations lors des épisodes méditerranéens (Trzpit, 1980 ; Kyselý et al., 2012 ; Piras, 2016 ; Chochon et al., 2021 ; Carrega et al., 2021).

Le poste de mesure a été mis en service en 1972. Il recueille quotidiennement (lors des mois d'ouverture de la station de sport d'hiver) des données sur les précipitations solides, l'épaisseur de la neige au sol et la température de l'air. Il est réputé pour la continuité et la fiabilité de ses données, étant en service depuis plus de 50 ans. Cette longue série de données est cruciale pour les études climatiques et météorologiques régionales, fournissant des informations précieuses pour la compréhension des interactions neige-climat et des tendances climatiques à long terme. Malgré plusieurs déplacements au fil des ans, les données du poste de mesure n'ont montré aucune rupture d'homogénéité grâce à l'application du test de Pettitt (1979). Bien que la station fournisse majoritairement des données continues et fiables, il existe plusieurs lacunes dans les séries, rendant impossible le comblement statistique des valeurs manquantes. La plupart de ces lacunes sont non aléatoires, survenant principalement en décembre et en avril. Ces périodes correspondent à la fermeture de la station de ski. Les relevés ne sont donc pas réalisés, et comprennent des séries de plus de 10 jours consécutifs, empêchant l'utilisation de techniques d'imputation conventionnelles. C'est pourquoi les tendances sont traitées sur la saison allant de janvier à mars.

De plus, les conditions de circulation atmosphérique sont essentielles pour les événements neigeux car elles déterminent la provenance et les caractéristiques des masses d'air qui apportent la neige à une région donnée. Elles contrôlent le déplacement des masses d'air, qui peuvent être chargées d'humidité provenant de différentes sources, telles que les océans, les mers intérieures ou les plaines. En fonction de la trajectoire de ces masses d'air, les conditions de précipitation peuvent varier considérablement. Les masses d'air en mouvement interagissent avec la topographie locale, notamment les chaînes de montagnes (Planchon et al., 2015). Lorsqu'une masse d'air humide rencontre des reliefs montagneux, elle est forcée de s'élever, se refroidit en altitude et peut entraîner la formation de précipitations, y compris de neige. Certaines

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

configurations de la circulation atmosphérique, telles que les dépressions et les fronts météorologiques, sont plus propices à la formation de précipitations solides. Ces systèmes météorologiques peuvent apporter des conditions favorables pour que l'humidité se condense et se solidifie en neige. En étudiant les schémas de circulation atmosphérique associés aux événements neigeux, les chercheurs peuvent identifier des régimes ou des types de circulation atmosphérique spécifiques corrélés aux précipitations solides. Comprendre ces schémas peut aider à prédire et à interpréter les conditions météorologiques futures.

1.6.3 Discussion et limites de l'article.

L'article se positionne de manière unique par rapport aux autres travaux en se concentrant spécifiquement sur les Alpes du Sud françaises, une région caractérisée par sa proximité avec la mer Méditerranée et ses hauts sommets. Contrairement à de nombreuses études précédentes qui se sont focalisées sur les Alpes européennes en général, cette recherche utilise des données de longue durée, collectées depuis 1972, provenant de la station météorologique d'Isola 2000. Cette série de données continue et fiable est rare et offre une base solide pour analyser les précipitations solides et les conditions atmosphériques associées. En classifiant les chutes de neige en quatre catégories distinctes et en identifiant deux types de circulations atmosphériques favorables, l'étude apporte une compréhension plus nuancée des mécanismes météorologiques en jeu, ajoutant ainsi une valeur significative aux connaissances existantes sur les interactions neige-climat dans cette région.

Cependant, l'étude présente certaines limites. Bien que la station d'Isola 2000 fournisse des données principalement continues et fiables, des lacunes subsistent, principalement en décembre et avril, limitant l'analyse complète pour ces mois. Ces lacunes, souvent sur des périodes de plus de 10 jours, empêchent l'utilisation de techniques d'imputation conventionnelles. De plus, la résolution spatiale de 79 km x 79 km des données de réanalyse ERA-INTERIM peut ne pas capturer toutes les nuances locales des conditions atmosphériques spécifiques à la station. Les données atmosphériques utilisées, couvrant la période de 1979 à 2019, limitent également l'analyse des tendances plus anciennes, ce qui pourrait être crucial pour comprendre les évolutions climatiques actuelles.

Par ailleurs, les travaux se basent sur les observations d'une seule station météorologique, ce qui peut restreindre la généralisation des résultats à l'ensemble des Alpes du Sud ou à d'autres régions montagneuses. Enfin, distinguer les effets de la variabilité naturelle du climat des impacts anthropiques du changement climatique reste complexe et pourrait nécessiter des analyses complémentaires pour une clarification plus précise. Malgré ces limitations, l'article apporte une contribution précieuse à la compréhension des impacts du réchauffement climatique sur les précipitations solides et le manteau neigeux dans les Alpes du Sud françaises, offrant des perspectives importantes pour des études futures.

1.6.4 Positionnement de l'article dans la thèse.

L'article s'inscrit dans le cadre de la prise en main des données d'observations du territoire d'étude, de l'analyse des lacunes et des ruptures d'homogénéité, et permet d'envisager les possibilités de traitement de ces données. Il offre également une première étude climatique

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

locale pour comprendre les tendances d'évolution des précipitations solides, de l'épaisseur du manteau neigeux et de la température de l'air. Enfin, il analyse les corrélations entre les précipitations neigeuses mesurées et différentes variables atmosphériques, permettant de déterminer les paramètres clés dans les mécanismes de formation des chutes de neige et de cartographier des schémas de circulation spécifiques à la zone d'étude.

Le premier article de la thèse est disponible dans son intégralité ci-dessous. Il se compose de 18 pages et a été publié dans la revue Polar science.



Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps: Case of the Isola 2000 weather station

Guillaume Guerin^{*}, Nicolas Martin

Université Côte d'Azur, CNRS ESPACE, Nice, France

<https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100922>

Received 17 August 2022; Received in revised form 14 November 2022; Accepted 12 December 2022

Available online 13 December 2022

1873-9652/© 2022 Elsevier B.V. and NIPR. All rights reserved.

Abstract : This paper focuses on the relationship between atmospheric circulation and solid precipitation (SP) happening in the weather station of Isola 2000. Located in the French department of the Alpes-Maritimes at an altitude of 1912 m, it has the oldest series of daily SP and snow depth (SD) observations from the department. Study has two objectives, analyzed past orientations concerning air temperature, SP and SD, then, characterizes and explains the atmospheric circulation condition producing SP. Results show a warming of air temperature since the early 2000s, counterintuitive accompanied by an increase in the frequency of SP and a larger thickness of SD. In addition, by crossing SP observations with ERA-INTERIM reanalysis (EI-R), seven covariations have been measured: vertical velocity 700 hPa; specific humidity 850 hPa; sea level pressure; air temperature 850 hPa; geopotential height 700 hPa; U-component of wind 700 hPa, V-component of wind 700 hPa. The mapping of these variables shows two types of atmospheric circulation implicated in SP: westerly cyclonic circulation, producing SP in the range of 1–5 cm and 6–20 cm; southern circulation with a depression focused on Iceland and a trough on Western Europe, causing SP in the range of 21–40 cm and 41–93 cm.

Keywords : Climate change ; Solid precipitation ; Snow depth ; ERA-INTERIM reanalysis ; Atmospheric circulation ; Southern Alps.

Abbreviations : AO, Arctic Oscillation ; CMIP6, Coupled Model Intercomparison Project 6 ; EAWR, Eastern Atlantic Western Russia ; ECMWF, European Center for Medium-Range Weather Forecasts ; EI-R, Era-Interim Reanalysis ; HCA, Hierarchical Clustering Analyze ; hPa, hectopascal ; NCEP, National Centers for Environmental Prediction ; NCAR, National Center for Atmospheric Research ; NETCDF, Network Common Data Form ; PCA, Principal Component Analyze ; r, correlation coefficient ; SD, Snow Depth ; SP, Solid Precipitation ; UTC, Universal Time Coordinated.

1. Introduction

Southern Alps in France, like the entire planet, have been experiencing a rise in air temperature since pre-industrial times (GREC-SUD, 2018 ; 6th IPCC report, 2021 ; Zhai et al., 2021). Climate projections for the middle and the end of the 21st century, indicate a pursuit of warming in progress for greenhouse gas low emission scenarios, and an accentuation of warming for greenhouse gas high emission scenarios, with an impact on the cryosphere (WMO, 2022).

Global warming has already an effect in the European Alps (Gobiet et al., 2014 ; Marty et al., 2017 ; Savi et al., 2021). In the scientific literature, several studies (Swiss, French, Austrian) have shown a decrease in snow depth (named “SD” in this article) since the end of the 1980s (Verfaillie et al., 2018 ; Francon et al., 2020 ; Matiu et al., 2021). This is for moment observed at low and medium altitudes and remains more uncertain concerning higher mountain areas (around an altitude of 2000 m).

Natural snow plays an important role for ecosystems and communities living in the mountains, whether for the availability of water resources, or for tourism and the practice of winter sports (Barbier, 1982 ; Goncalves, 2013 ; Francois et al., 2016 ; Joye, 2019). Consequently, upcoming changes, trajectories to be followed and investments for the development of these mountain territories will be linked to the quantity of snow available in the future. Also, if SD decreases in future, terrestrial albedo should increase, with the consequence of an amplification of the initial forcing in a worrying positive feedback loop for the future climate (Picard et al., 2015 ; Thackeray and Fletcher C., 2016).

Natural solid precipitation (named “SP” in this article) is the main source of SD (Mallardel S., 2009). It is a meso and micro-scale meteorological event, which is the result of a set of processes occurring thousands of kilometers away, over a large geographical area and level of atmospheric pressure (Planchon et al., 2015). In this sense, SP depends on the general atmospheric circulation (i.e. on the synoptic scale), which redistributes (from now on) at the planetary level the energy surplus resulting from the intensification of the greenhouse effect, more specifically infrared emitted into space (Shepherd, 2014 ; Screen et al., 2018). In this way, atmospheric circulation is described as the engine of past, present and future weather (Pédélaborde, 1956 ; Pena and Schulte, 2019). Thus, if global warming impacts atmospheric circulation, there should be consequences for the frequency of SP.

Actually, SP is the result of the action of a certain type of atmospheric circulation, which acts on the local weather in synergy with the substratum, topography, etc. (Cassou, 2002 ; Planchon et al., 2015), by identifying specific atmospheric circulation, it could be possible to study future evolution of SP. This last point is very interesting, since it has been accepted that regional climate models have biases on the representation of sensitive variables, such as precipitation, and seem for the moment unable to give an accurate projection at a fine scale (Barrier et al., 2014 ; Mahamadou et al., 2018). On the other hand, they are robust on typical atmospheric circulation variables, such as surface pressure, geopotential height etc. (Boé and Terray, 2008 ; O’Loughlin, 2021 ; Mehrotra and Sharma, 2021).

Several studies have already investigated the interaction between SP and synoptic conditions, as well as the associated circulation patterns. However, none of them was interested in the Southern region of the French Alps, which is original from a climatic point of view, due to

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

the presence of high peaks just a few kilometers away from the Mediterranean. For example, the synoptic patterns responsible of extreme SP (exceeding 30 cm per day) in the Tatras (Carpathian Mountains) were determined by Bednorz (2013). The author used reanalysis data of daily sea level pressure, geopotential heights 500 hPa and air temperature 850 hPa, derived from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) – National Center for Atmospheric Research (NCAR) dataset. Four types of synoptic patterns favorable for heavy SP in the Tatra Mountains were distinguished and the study highlighted that the abundant SP events require sufficient supply of moisture at low temperature conditions.

A study in Andorra (Pyrenees massif) was conducted by Esteban et al. (2005). The authors used the pressure at sea level, the geopotential height 500 hPa and the geopotential thickness of 1000 to 500 m, to build seven circulation patterns, most of them with an Atlantic component of the wind, and others with a clear Mediterranean advection, that could be combined with cold continental air.

Merino et al. (2014) investigated the meteorological causes of the SP decreases in the Northwest Iberian Peninsula, by analyzing changes in synoptic scale patterns. They defined four synoptic patterns and found that the reason of this decrease was related to changes in the frequencies of snow events belonging to each synoptic pattern favorable for SP production at the observatory locations.

In the Italian Apennine mountains, Capozzi et al. (2022), studied the SP for a long period (1884–2020) at 1280 m above sea level. They highlighted the strong interannual variability of winter SP amounts, the absence of a relevant trend from the late 19th century to the mid-1970s, the strong reduction in the SP amount and frequency of occurrence from the mid-1970s to the end of the 1990s and the increase in average SP amount and frequency of occurrence in the past 20 years. Moreover, six different synoptic types, describing the meteorological scenarios triggering the SP in the study area, have been identified using two essential atmospheric variables, the geopotential height 500 hPa and the sea level pressure. These patterns are characterized by the presence of a blocking high-pressure anomaly over Scandinavia or the North Atlantic and by a cold air outbreak involving both maritime and continental cold air masses.

As it concerns this work, it is a part of a European project called ALPIMED (for ALPs and Mediterranean), which tries to understand and act on the effects of climate change at the scale of the cross-border area between France and Italy (www.interreg-alcotra.eu). It is based on the weather station M'et'eo-France, located at the Isola 2000 ski resort (1912 m above sea level), which has the longest series of daily SP and SD observations in the French department of the Alpes-Maritimes.

The first objective is the analysis of the frequency of SP and thickness of SD since 1972, in order to see how they have evolved. The second objective is to identify atmospheric circulation condition in case of SP event, focusing on atmospheric variables best correlated with observations. These will be mapped and will provide a better understanding of the mechanism producing SP. This final step will be done by crossing observation data with the ERA-INTERIM reanalysis (named "EI-R" here) of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF).

2. Data and methods

This part presents the study area and the two types of data used (SP observations and EI-R), then, describes methods used.

2.1. Study area

Study area is located in the Southern Alps, at the gates of the Mercantour National Park, in the French department of the Alpes-Maritimes. It corresponds more precisely at the winter sports resort of Isola 2000 (cf. Fig. 1). The site enjoys a particular topographical context since it is at a geodesic distance of 40 km from the Mediterranean Sea. The influence of this reservoir of warm water throughout the year (the water temperature rarely drops below 12 °C even in winter) on the land borders, is an obvious fact, with as a consequence, the important total rainfall during Mediterranean episodes (Trzpit, 1980 ; Kyselý et al., 2012 ; Piras et al., 2016 ; Chochon et al., 2021 ; Carrega et al., 2021). This place was chosen because it has a Météo-France weather station (44.1892N ; 7.1496E), which measures daily : the air temperature, the amount of SP and the thickness of SD. Operational since 1972, it is located at 1912 m of altitude and offers the oldest and continuous series of digitized daily SP and SD observations in this French department.

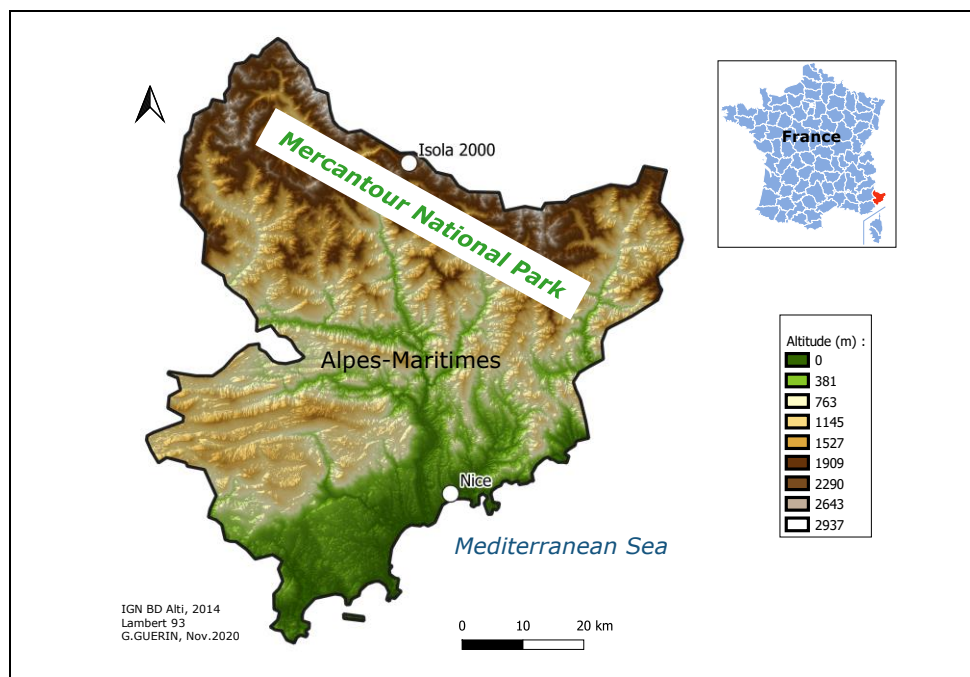


Fig. 1. Location of the “Météo-France” weather station in Isola 2000 (French department of the Alpes-Maritimes).

2.2. Observations data from the Isola 2000 Météo-France weather station

The SP measurements are done manually once a day at 6 : 00 UTC. The SP data observations corresponding therefore to the amount of new SP fallen in 24 h. The SP is counted from

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

6 : 00 UTC Day-D to 6 : 00 UTC Day-D+1. In other words, D-Day SP are measured the next morning at 6 : 00 UTC.

The SD measurements are also performed manually once a day at 6 : 00 UTC. In this case, the measurement taken at 6 : 00 UTC, is counted for the same day. They correspond to the total thickness of the SD at the level of the weather station.

The weather station has been in three different locations (cf. Table 1) without showing a break in the homogeneity of the data related to these movements, according to the application of the Pettitt’s test (Rome et al., 2015) on the three series (air temperature, SP and SD).

On the other hand, although no irregularities seem to appear, there are many gaps in the three series, making a statistical filling of the missing values impossible. Weather station of Isola 2000 is the reference in the region, both in terms of years of service and reliability. This is why a filling of the gaps using multiple linear regressions, by crossing the data from other stations (Taki et al., 2019), is not possible. In addition, most of the missing values are “non-random” and constitute series of more than 10 consecutive days, which prevents from using conventional imputation techniques.

Moreover, it was necessary to choose homogeneous time ranges to draw trends. In regard to air temperature series, the period chosen extends from 1990 to 2018. Concerning the snow series (SP and SD), in order to obtain a data set without temporal breaks, it is possible to extend the analysis over 47 years (1972–2018). The season of SP extends from November to April, but, due to missing data for November, December and April, the study season has been restricted to three months (JFM) : January (J) ; February (F) and March (M).

Table 1. Locations of the weather station in Isola 2000 (Source : Météo-France).

Locations	Start	End	Altitude	Latitude	Longitude	Movements (km)
1	01/ 01/ 1972	18/ 12/ 2009	1910 m	44.2	7.1666	X
2	19/ 12/ 2009	17/ 07/ 2014	1870 m	44.1928	7.1368	2.5 km
3	18/ 07/ 2014	X	1912 m	44.1895	7.149	1.0 km

2.3. The ERA-INTERIM reanalysis

The study is made possible by combining observations of the weather station and the EI-R reanalysis of the ECMWF. Reanalysis make it possible to identify and then map the atmospheric conditions specific to SP, on the scale of the Euro-Atlantic area. It is at the interface between observation and modeling (Nogueira, 2020). This is, to simplify, a modeling fed by all the past networks measurements, in other words, they are corrected by observations. Exploitable from 1979 to 2019, EI-R has a resolution of 79 km (Dee et al., 2011). The pixel value of

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

extraction used here to calculate correlations is located above the weather station of Isola 2000 (cf. Fig. 2). Although quite similar to the geographic and climatic context of the place, the extraction pixel represents the average state of the atmosphere for an area of 6241 km², which does not fully reflect the variables of the study site. It is nevertheless the closest spatial indicator producing a complete daily data series, for a wide choice of atmospheric variables, at different levels.

The reanalyses can be downloaded for two timesteps, 6 : 00 UTC and 18 : 00 UTC, while the measurements of the SP from the weather station are taken at 6 : 00 UTC the next day. The choice of the hourly steps is therefore essential to increase the chances of not missing the synoptic conditions specific to the snow event. For the study, it was decided to test the correlations for these two timesteps, the SP measurement being made the next day at 6 : 00 UTC, this should make it possible not to miss the synoptic conditions preceding the meteorological event.

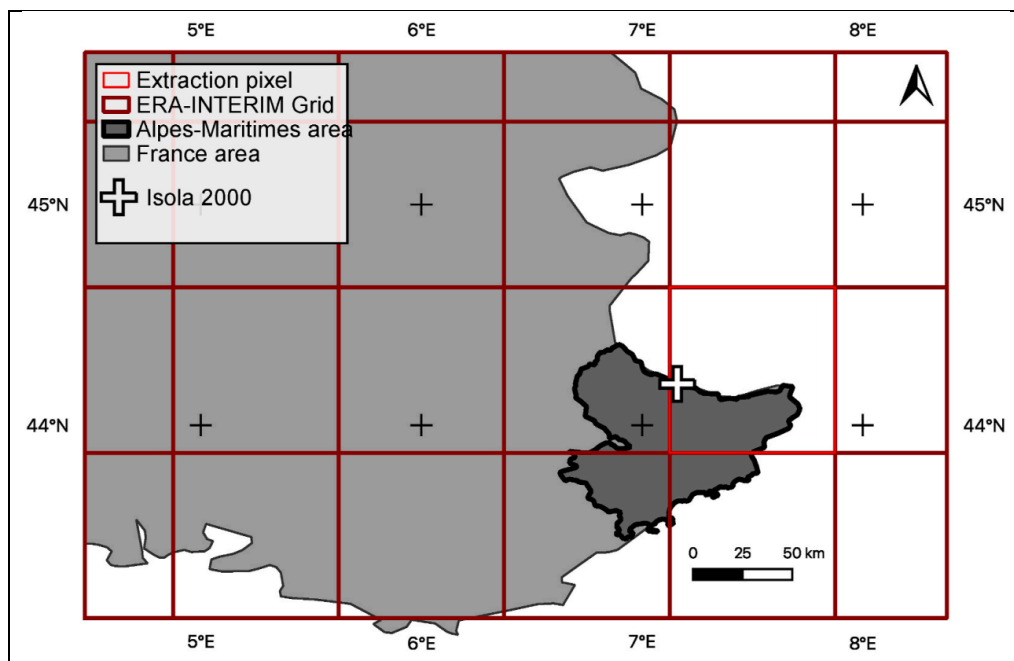


Fig. 2. Representation of the extraction pixel of the EI-R at the Isola 2000 weather station.

2.4. Solid precipitation classification

A classification is produced on SP observations in order to calculate a frequency of appearance for different amount of snowfall. They are classified according to the amount fallen in 24 h, with the aim of identify natural slope breaks in the statistical distribution (cf. Fig. 3). This method built four classes of SP : A, B, C and D.

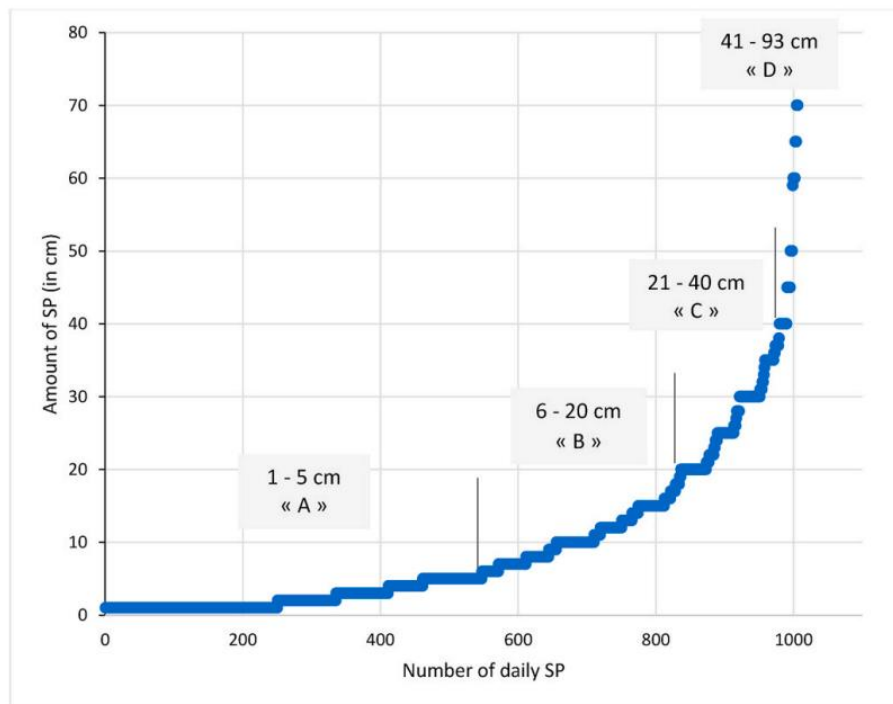


Fig. 3. Classification of the daily SP (January to March 1972–2018) arranged in ascending order, according to the amount precipitated (Source : METEOFRANCE).

2.5. Mapping atmospheric circulation condition in case of solid precipitation

The method to identify atmospheric circulation condition in case of SP is based on correlations between SP observations and atmospheric variables provided by the EI-R. All steps are described below :

- A. Choice of EI-R atmospheric variables possibly correlated with SP : sea level pressure, geopotential height 500-700-850 hPa ; vertical velocity 700–850 hPa ; air temperature 700–850 hPa ; U-component of wind 700–850 hPa ; V-component of wind 700–850 hPa ; specific humidity 700–850 hPa, i.e. 14 variables in total.
- B. Choice of temporal referencing: the 14 variables are extracted for two daily time steps (6:00 UTC and 18:00 UTC) between 1979 and 2018, i.e., from the 14 previous variables, a total of 28 variables will be tested (cf. Table 2).
- C. Retrieving the 28 variables using Python coding scripts. The output data are Network Common Data Form (NETCDF) grids, centered on the Euro-Atlantic space.
- D. Extracting the daily values of the 28 EI-R variables at the spatially closest Isola 2000 grid point.
- E. Correlation analysis between the 28 EI-R combinations and SP, then retaining the best time step, then, atmospheric variables with the highest correlation coefficients (r).
- F. Discriminative mapping of the combinations of variables most correlated with SP at the scale of the Euro-Atlantic area, based on the average of all daily situations constituting the four classes of SP.
- G. Identification of the condition of atmospheric circulation for each class of SP.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

H. Computed the climatological mean 1979–2018 (JFM) of all the atmospheric variables retained, then, computed the anomalies as the difference between, the mean of the variable of each SP classes, and the climatological mean.

Consequently, the area of study, the data used, and the main methods have been defined.

The next part presents results obtained.

Table 2. Summary of the atmospheric variables from the EI-R tested for correlations with daily SD observations.

Variables (EI-R)	Pressure level (hPa)	Hour (TU)	Period (year)
Sea level pressure	Surface	6–18	1979–2018
Geopotential height	500 - 700 - 850	6–18	1979–2018
Vertical velocity	700–850	6–18	1979–2018
Air-temperature	700–850	6–18	1979–2018
Specific humidity	700–850	6–18	1979–2018
U-component of wind	700–850	6–18	1979–2018
V-component of wind	700–850	6–18	1979–2018

3. Results

This part presents results obtained. A point will be made on the evolution of the air temperature observed by the weather station in order to find a possible climatic signal in a context of global warming, then the frequency of SP and the thickness of SD will be analyzed. Finally, SP observations will be related to atmospheric variables in order to see snow-climate interactions.

3.1. Air temperature evolution at the Isola 2000 weather station

The 5-year moving average of the annual air temperature mean (T_m), minimum (T_n) and maximum (T_x), measured in January, February and March, at the Isola 2000 weather station, for the period 1990–2018 is presented on Fig. 4. According to the graph, it seems difficult to determine a trend over the period concerned. This is confirmed with the use of the Mann-Kendall test, which highlights the existence or not of a linear trend (upwards or downwards) on a time series (Nyikadzino et al., 2020).

On the other hand, by zooming on the period 2005–2018, an upward trend seems to appear. Indeed, the T_m close to -4 °C in 2005, reaches about -1.5 °C in 2018, a rise of almost $+2.5\text{ °C}$. This is confirmed here by the Mann-Kendall test, a trend on the statistical sample is therefore accepted. It shows a clear climatic signal towards an increase in air temperature measured at the Isola 2000 weather station in the mid2000s. This trend can be also observed with the annual maximum and mean air temperature.

In addition, for the purpose of obtaining an air temperature evolution over a longer time step, it was decided to use the EI-R between 1979 and 2018 for the pixel above Isola 2000. Fig. 5 shows the deviation from the historical reference average 1981–2010 of the mean annual air temperature in January, February and March at 850 hPa ($\sim 1500\text{ m}$ of altitude almost the same attitude than the weather station). It is noted that between 1979 and 1988, negative anomalies

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

are the majority with 9 cold years, against 1 warm. The trend is completely reversed from 1989 to 2018 with only 9 cold years against 21 warm. As a result, positive anomalies have been reinforced since the early 1990s. This observation supports the previous analysis on the evolution of air temperature measured by the weather station.

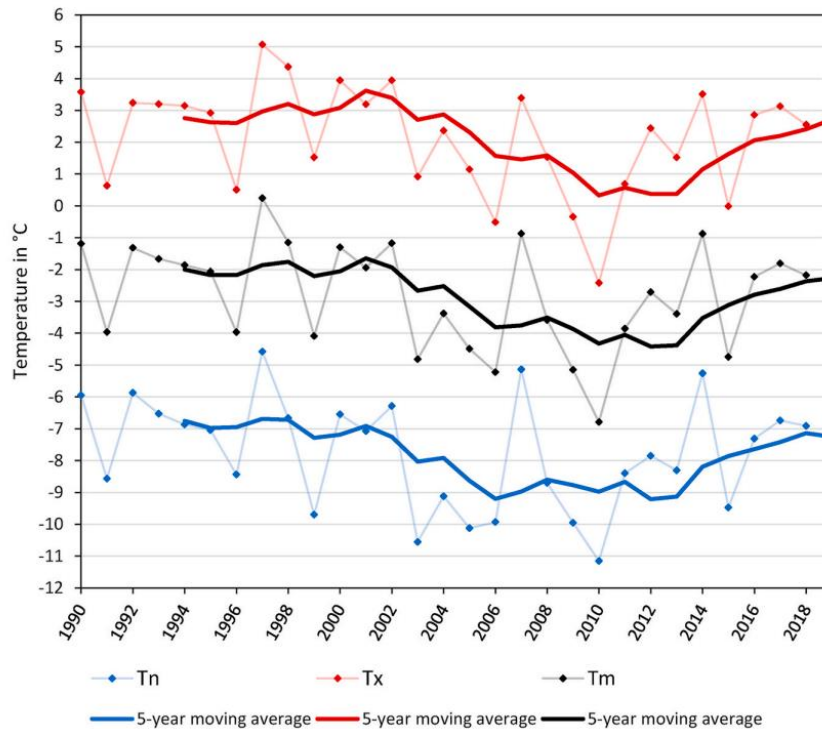


Fig. 4. Moving average (5-year) of the mean (Tm), minimum (Tn) and maximum (Tx) seasonal air temperature, measured from January to March (period 1990–2018), in Isola 2000 weather station (Source : Météo-France).

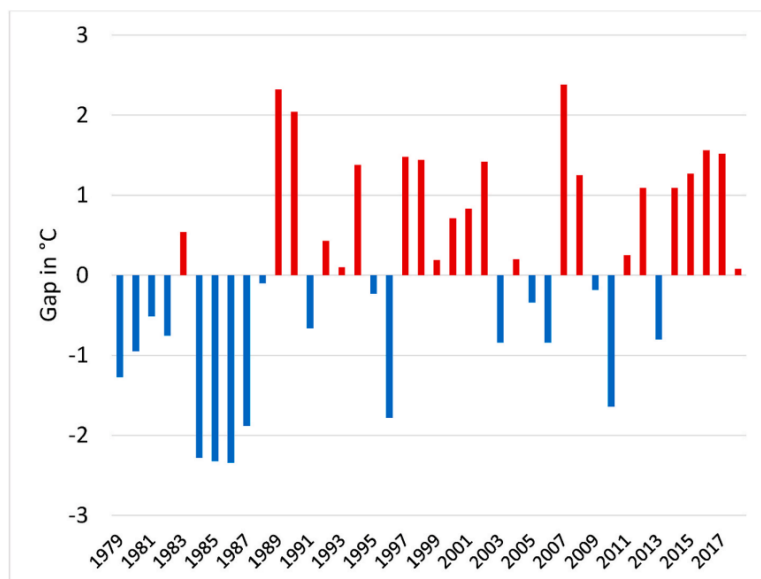


Fig. 5. Deviation from the historical reference average 1981–2010 of the mean seasonal air temperature from January to March, at 850 hPa, between 1979 and 2018, extracted from the EI-R (pixel above Isola 2000) (Source : ERA-INTERIM reanalysis, ECMWF).

3.2. *Frequency of solid precipitation at the Isola 2000 weather station*

An amount of 1006 daily SP observations are recorded at the Isola 2000 weather station, in January, February and March, from 1972 to 2018. The discretization into four classes (cf. Part 2.4), gave the possibility to obtain a frequency of appearance (cf. Table 3) for all classes of SP.

Table 3. Statistical summary of daily SP measured at the Isola 2000 weather station between January to March (Period 1972–2018) (Source : Météo-France).

Classes	Number of days	%	Amount of SP (meters)
« A » (1–5 cm)	547	54	12.78
« B » (6–20 cm)	326	32	38.48
« C » (21–40 cm)	117	12	34.87
« D » (>40 cm)	16	2	8.84
Total	1006	100	94.97

Class A, corresponds to a fall between 1 and 5 cm and represents most of the sample with a frequency of 54 % (547 days) ; class B is a fall between 6 and 20 cm and has an occurrence around 32 % (326 days) ; class C (fall 21–40 cm) has a frequency about 12 % (117 days) ; and finally, class D (fall 41–93 cm) appears in 2 % of cases (16 days). In addition, the amount in meters of each classes, shows that B and C classes, are those producing the highest accumulation of snow, with respectively 38.48 and 34.87 m, over the entire period of analysis (1972–2018).

Fig. 6 shows the 5-year moving average of the number of daily SP observations per class and per year, for the same study range. The curve of total SP (black curve) is marked by a slight decrease until the beginning of the 90s, from 25 SP per year in 1972 to less than 20 in 1993. It stabilizes around 20 per year until 2006, then shows a significant increase, bringing it beyond 35 SP between 2006 and 2018. Thus, the trend over the last 25 years is towards an increase in the frequency of SP observations at the Isola 2000 weather station.

However, intra-class specificities exist. The occurrence of class A (blue curve) grows significantly over time, with on average less than 10 SP per year at the end of the 80s, against more than 15 currently. Class B (red curve) declined until the early 2000s (~15 SP in 1972 against ~5 in 2000), then followed an upward trend until 2018 (~12). Class C remains stable over time, always being around five falls per year. Finally, class D weakened overall between 1972 and the mid-2000s, but a rise seems to begin in 2005.

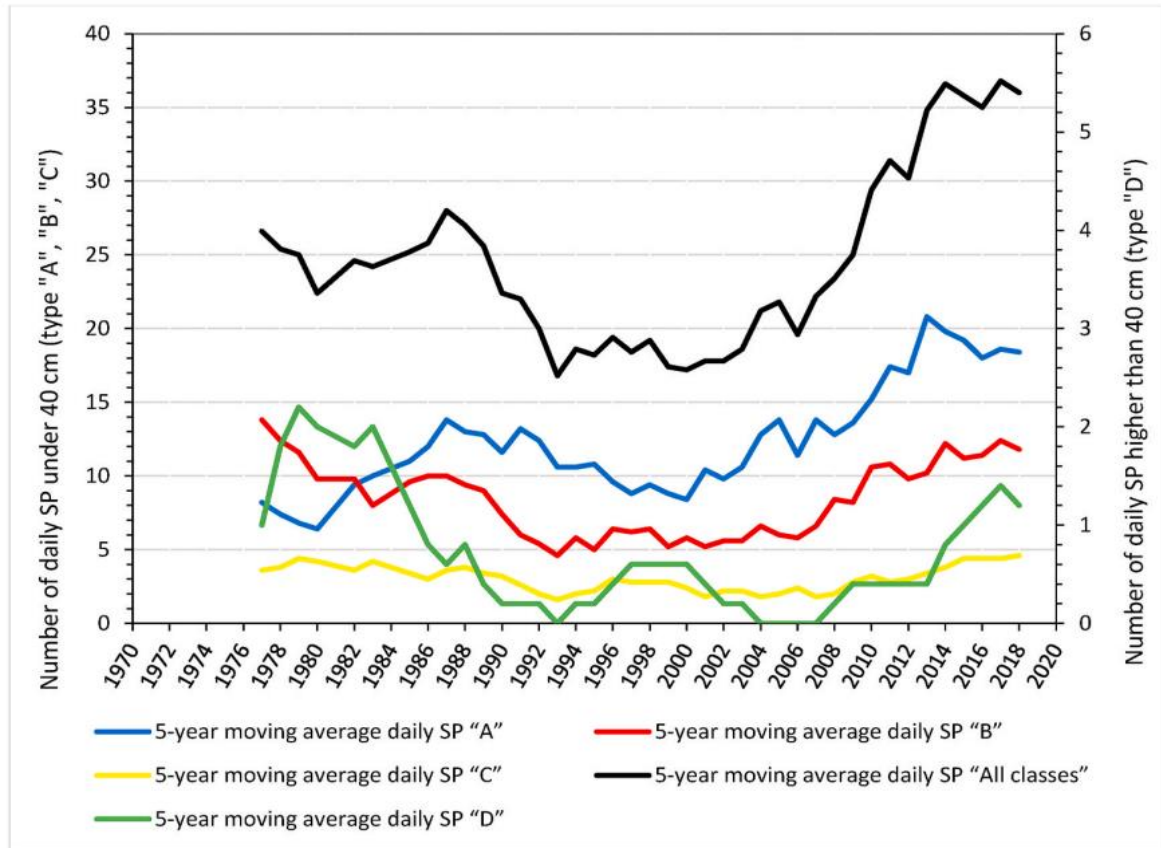


Fig. 6. Evolution of the number of daily SP by class (“A”, “B”, “C”, “D”) and per season in Isola 2000 between 1972 and 2018, for the months of January, February and March. For the class “D” the numbers are read on the y-axis on the right, while for the other 3 classes the reference axis is on the left (Source : METEO-FRANCE).

3.3. Evolution of snow depth at the Isola 2000 weather station

The analysis of the evolution of SD is also made possible by the use of daily surveys from the Météo-France weather station. Fig. 7 shows the mean annual thickness of SD from 1972 to 2018 in January, February and March. It decreases sharply between the early 70s (150 cm per year) and the early 90s (less than 50 cm per year) : the 5-year moving average loses more than 100 cm in 25 years. An important increase took place from 1993 to 1998, then the average stabilized around 80 cm per year until 2010. Finally, since 2010, SD is increasing to exceed 100 cm per year. In reality, there is a dual trend. The first one is clearly a downward trend between 1972 and 1993, and the second one is an upward trend on the last 25 years (1994–2018). In addition, the interannual variability in the SD tends to be more marked since the early 90s.

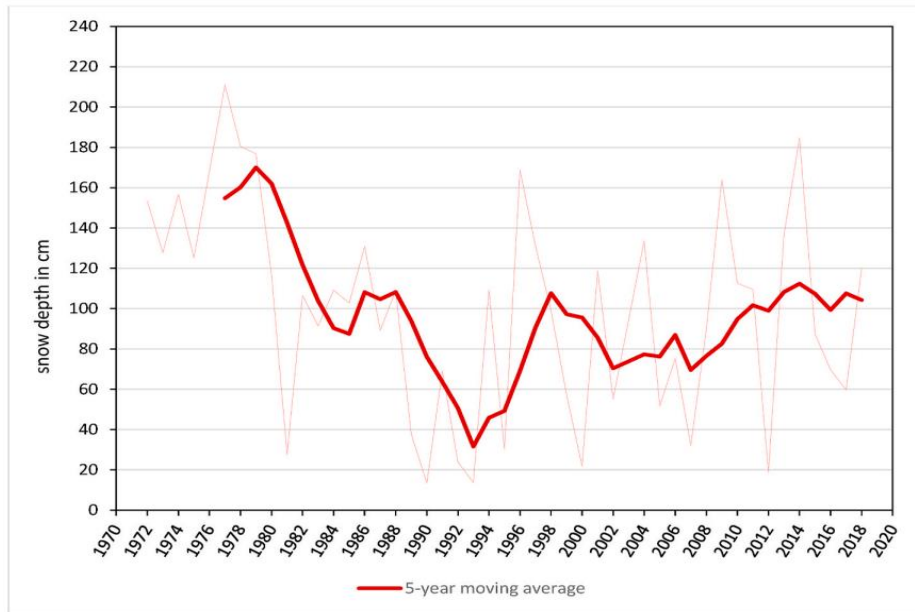


Fig. 7. Evolution of snow depth average in Isola 2000 weather station, between 1972 and 2018 from January to March. (Source : METEO-FRANCE).

3.4. Correlations between solid precipitation and atmospheric variables

Isola 2000 daily SP observations and the 28 combinations of EI-R variables have been crossed with a correlation test (Pearson’s coefficient) and shows seven covariations which suggest the existence of relationships : vertical velocity 700 hPa at 18 : 00 TU ($r = -0.35$) ; specific humidity 850 hPa at 18 : 00 TU ($r = 0.28$) ; sea level pressure at 18 : 00 TU ($r = -0.25$) ; air temperature 850 hPa at 18 : 00 TU ($r = -0.23$) ; geopotential height 700 hPa at 18 : 00 TU ($r = -0.31$) ; U-component 700 hPa at 18 : 00 TU ($r = 0.24$) ; V-component 700 hPa at 18 : 00 TU ($r = 0.28$).

As a reminder, in the 28 combinations of EI-R tested, the seven EI-R selected are those with the highest correlation coefficients. The SP being a difficult variable to model. Consequently, the r scores may seem low. Nevertheless, the EI-R selected are those coming from the data catalogue which maintain the strongest statistical link with the SP.

Table 4 shows the 1979–2018 medians of each of its variables (the direction of wind in degrees is calculated with the combination of U and V components), measured for each SP classes. For comparison purpose, the climatological mean 1979–2018 for JFM, is also shown. It is then possible to define the minimum and maximum values of atmospheric variables when it is snowing in this part of the Southern Alps. Consequently, in case of SP, sea level pressure decreases below 1013 hPa, against 1016 hPa for the climatological mean. Geopotential height 700 hPa, usually around 3020 m, deepens below 3000 m. Similarly, vertical velocity 700 hPa is generally around zero (-0.01 Pa/s), in case of SP it intensifies beyond -0.10 Pa/s. Specific humidity 850 hPa, usually around 3.4 g/kg of moist air, passes 3.8 g/kg of moist air, when a SP is recorded.

More precisely, when looking at the medians between the four classes of SP, it can be observed that the phenomena described above, intensify on passing from one class to another. For example, for D, sea level pressure reaches 1009 hPa, geopotential height 700 hPa drops to

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

2910 m, vertical velocity 700 hPa reaches -0.5 Pa/s, specific humidity 850 hPa increases to 4.5 g/kg of moist air, the direction of the flow is oriented more from the south, and the speed of the flow increases to 14.12 m/s.

Table 4. Medians of atmospheric variables extracted from the pixel ER-I above Isola 2000, between 1979 and 2018, for JFM and for the 4 classes of SP (ERA-INTERIM, ECMWF ; Météo-France).

Variables	Units	Climatological mean	Type of SP			
			A	B	C	D
Surface pressure	hPa	1016	1012	1010	1008	1099
Geopotential 700 hPa	m	3020	2973	2949	2931	2909
Vertical velocity 700 hPa	Pa s-1	-0.01	-0.11	-0.16	-0.41	-0.5
Temperature 850 hPa	° C	3,44	1.99	1.25	0.67	0.35
Specifi humidity 850 hPa	g/kg	3,43	3.84	4.01	4.16	4.51
Wind direction 700 hPa	°	243	228	219	194	186
Wind speed 700 hPa	m/s	7.2	7.6	9.7	11.9	14.1

3.5. Mapping atmospheric circulation condition in case of solid precipitation

3.5.1. Atmospheric condition in case of solid precipitation

Mapping of atmospheric variables correlated with SP corresponds to Figs. 8–13. They have been mapped at the scale of the Euro-Atlantic space. This choice is motivated for leave the study area as close as possible to the center of the space, while being slightly offset towards the east: the general circulation being oriented from west to east at this latitude, it is essential to consider reanalyzed atmospheric fields over the near Atlantic. Even, if they do not directly influence the SP, they are frequently located upstream of the atmospheric circulation that concerns it.

First, to occur, SP needs raw material assimilated to water vapor (contained in the air mass) and a low air temperature in the middle and lower layers of the atmosphere to form the snowflakes (Boniface, 2009 ; Bednorz 2013 ; Martin, 2011 ; Verfaillie et al., 2018 ; Tang et al., 2020). As it can be observed in Fig. 8, in case of classes A and B, Europe is dry with around 0.5–2 g/kg of moist air. In class C and D, humidity easily exceeds 3 g/kg of moist air. Thus, an important distinction arises as soon as the pass from class B to class C. It is then noted the importance of the humidity in the appearance of the intense events of SP (amount > 21 cm). Similarly, a moisture core concentrates on the Provence-Alpes-Côte-d’Azur region and the Gulf of Genoa, with values greater than 4.5 g/kg around Isola 2000, which would therefore explain the importance of SP for the highest classes. In addition, the average air temperature 850 hPa (cf. Fig. 9) indicates a colder air pocket (0 °C/ -2 °C) centered on Isola 2000 for the highest SP classes. This configuration is important because it allows the formation of snowflakes. Similarly, this pocket is surrounded by warmer air, which could also strengthen the convection mechanism of the air mass from the Mediterranean Sea by a confrontation between cold air and warm air, synonymous with thermal instability.

Sea level pressure (cf. Fig. 10), geopotential height 700 hPa (cf. Fig. 11), vertical velocity (cf. Fig. 12), direction and speed of the flow (cf. Fig. 13) are the four variables likely to express the movement and the updraft of air masses, so, in other words the atmospheric

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

circulation condition during SP. Consequently, sea level pressure draws a field with a large low-pressure area located on the North Atlantic, at the NW of the British coast. A NW-SE oriented trough from Brittany to the Mediterranean Sea comes off and strengthens by moving from the weakest to the strongest SP classes (cf. Fig. 10). This trough is flanked by high pressures located in the Azores and on the Black Sea. A cut-off centered on the Languedoc coast is formed for classes C and D, allowing (thanks to the cyclonic winding of the air masses) a flow of southern sector to settle, supplying the region with some water vapor from the Mediterranean Sea. Similarly, the orientation of the flow mechanically forces the masses of air loaded with water vapor to rise above the Alps (cf. Fig. 10 and cf. Fig. 8). The flow speed, also accelerates in the Mediterranean by moving from one class to another, certainly playing a role in the constant renewal of moist air over the station during the most important events (cf. Fig. 11). In addition, the deepening of geopotential height 700 hPa indicates that the centers of action described above are dynamics, which results in a phenomenon of deep updraft within the troposphere (cf. Fig. 12). This can be seen with the representation of the vertical velocity 700 hPa (in Pa/s), which shows a clear strengthening of negative updrafts (- 0.4 Pa/s) for SP classes C and D, with a core centered at Isola 2000 (cf. Fig. 13).

Finally, it is possible to identify two types of atmospheric circulation at work : a westerly cyclonic circulation, which produces classes A and B of SP ; a southern circulation with a depression oriented on Iceland and a trough on Western Europe, which causes classes C and D of SP.

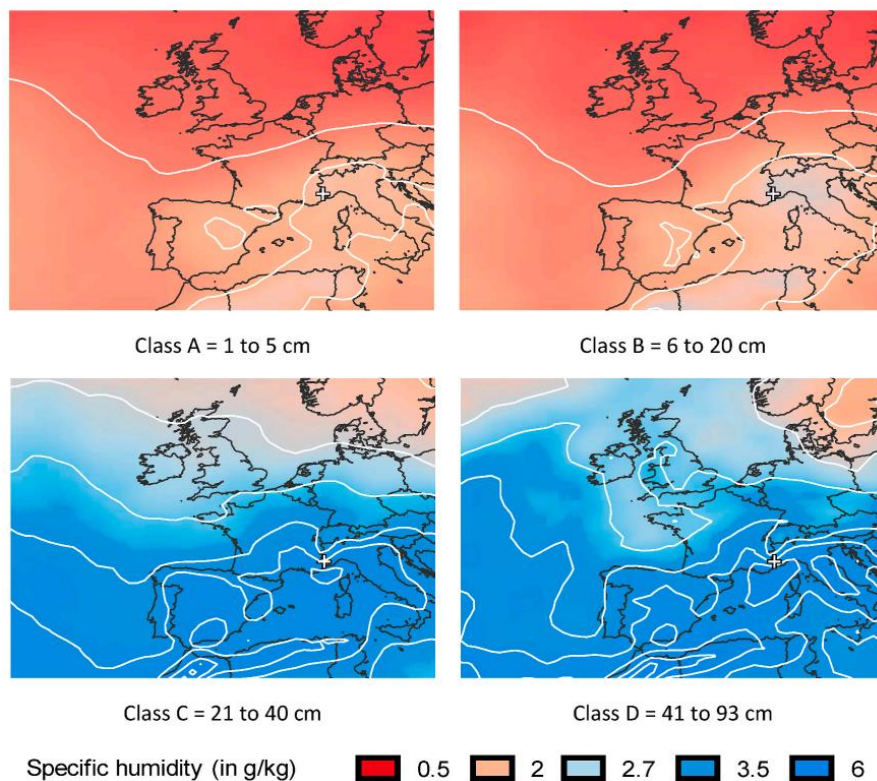


Fig. 8. Specific humidity (in g/kg), at 850 hPa for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 0.5 g/kg.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

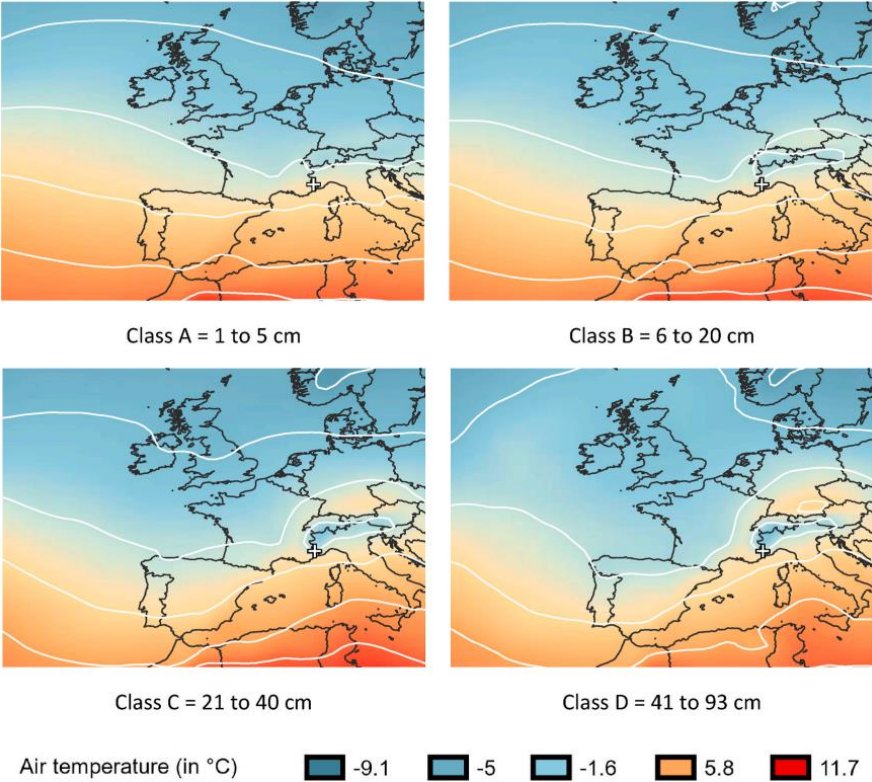


Fig. 9. Air temperature (in °C) at 850 hPa for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 3 °C.

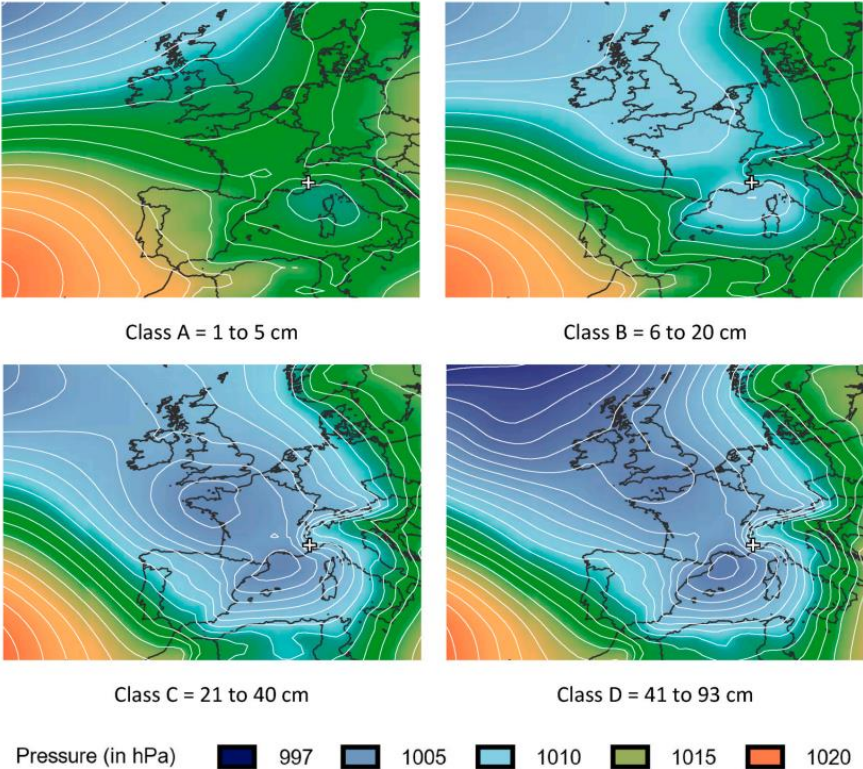


Fig. 10. Sea level pressure (in hPa) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 5 hPa.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

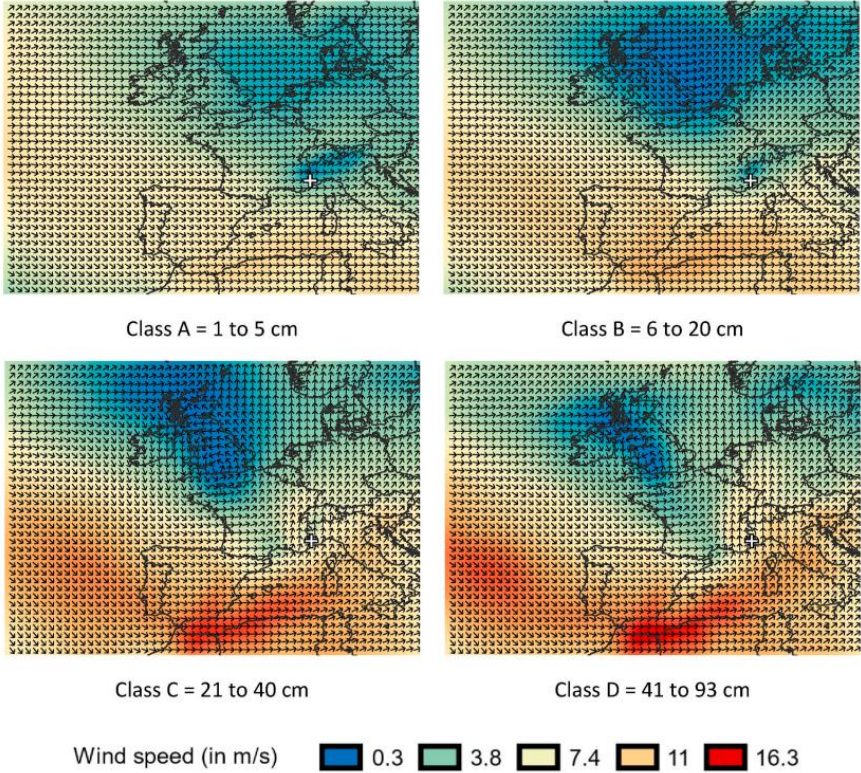


Fig. 11. Wind speed (in m/s) and direction at 700 hPa for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

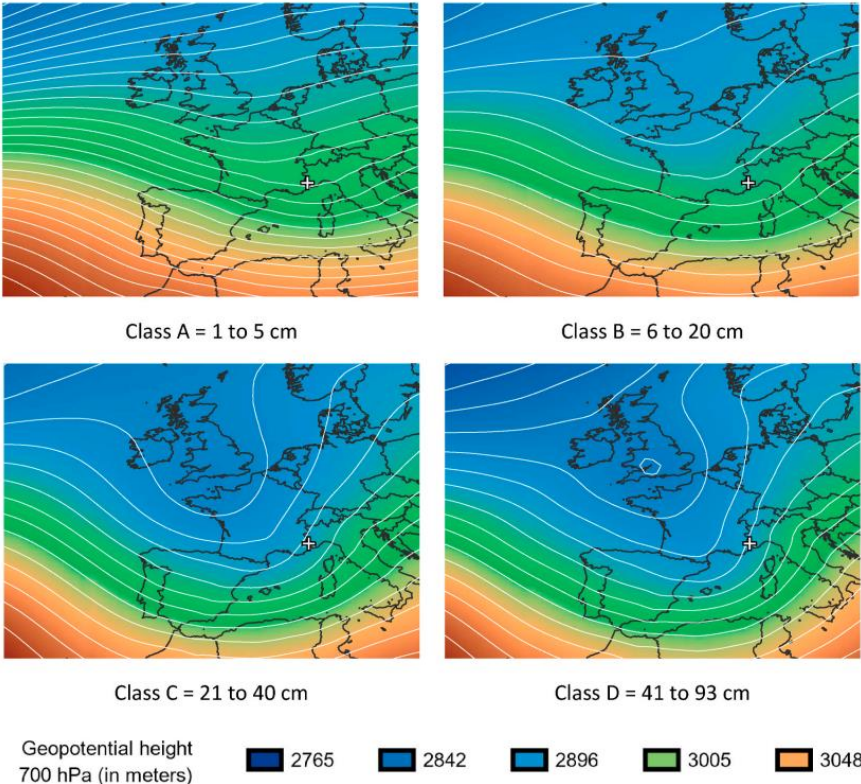


Fig. 12. Geopotential height 700 hPa (in meters) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isohypses) are separated by a gap of 30 m.

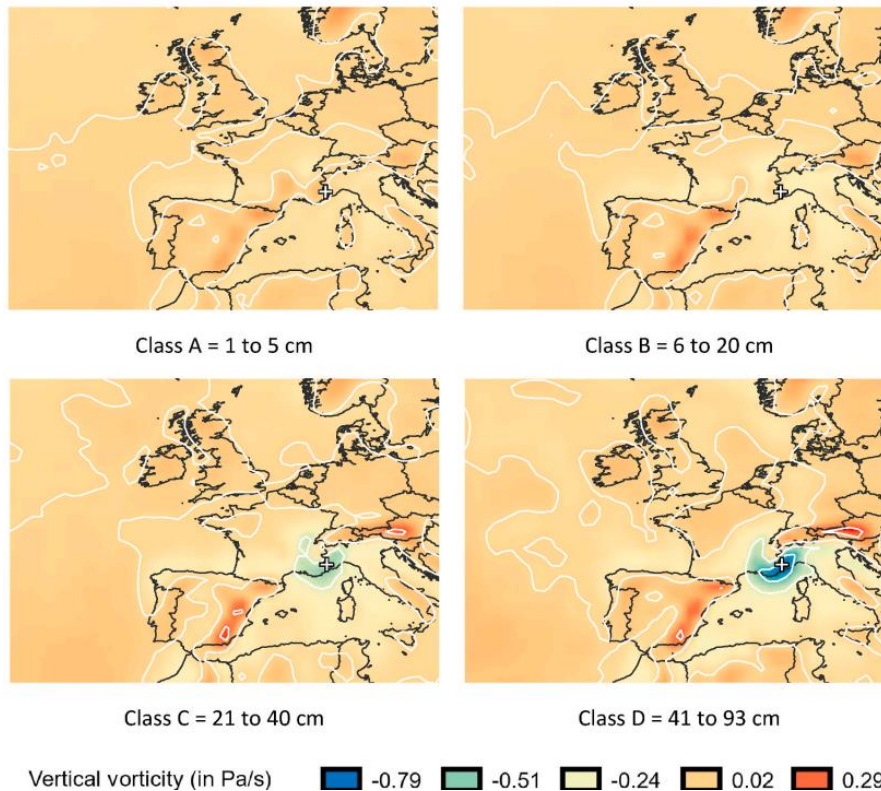


Fig. 13. Vertical vorticity at 700 hPa (in Pa/s) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 0.3 Pa/s.

3.5.2. Anomalies from the climatological mean 1979–2018

The anomalies from the climatological mean 1979–2018 (JFM) of specific humidity, air temperature, sea level pressure, geopotential height 700 hPa and vertical velocity, correspond to Figs. 14–18. The anomalies are computed as the difference between, the mean of the variable of each SP classes, and the mean of the same variable for the period 1979–2018 and the season JFM (called here the climatological mean). These composite maps show the specific synoptic conditions accompanying the SP events of each class, and help to realize the exceptional synoptic conditions of these meteorological events.

The anomalies of the specific humidity 700 hPa (cf. Fig. 14), show the importance of having a humid atmosphere for intense SP (C and D). Indeed, we note for C and D an excess of humidity of + 1.2 to + 1.8 g/kg in Isola 2000. For A and B, the atmosphere is dry, with even a humidity deficit of around - 1 to - 1.8 g/kg in the study area.

The anomalies of the air temperature at 850 hPa (cf. Fig. 15), present a significantly colder atmosphere than the climatological mean for all classes. For classes C and D, a very cold air core is observed on Isola 2000, with a negative anomaly of around - 4.3 °C. Also, the presence of warmer air ahead of this cold weather front, seems to favor thermal instability here. This configuration is less marked for B and missing for A.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

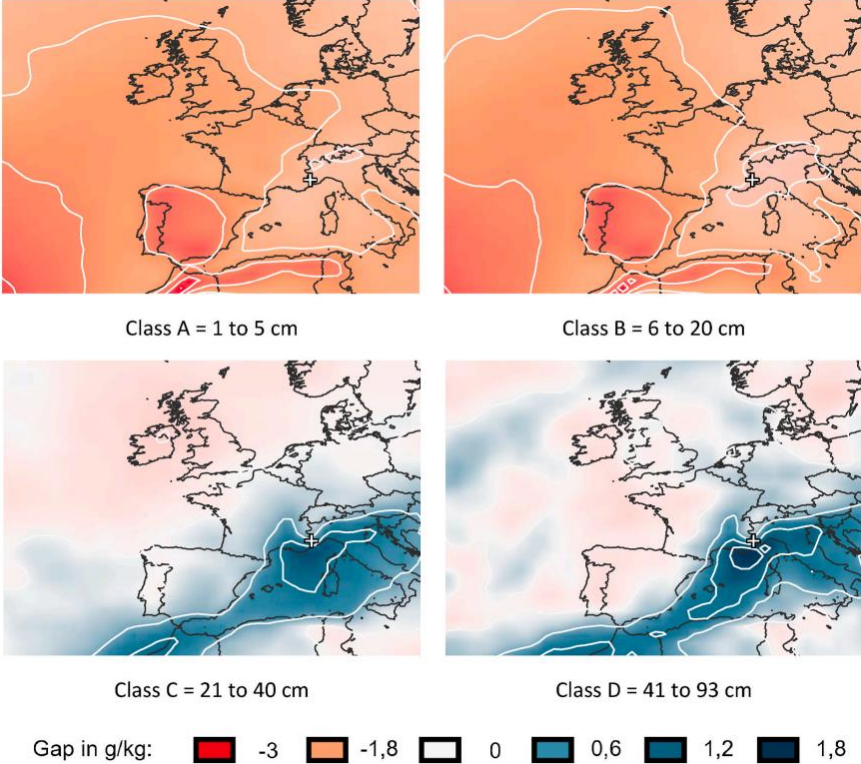


Fig. 14. Anomalies (reference period 1979–2018 for JFM) of the specific humidity (in g/kg), at 850 hPa for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 0.5 g/kg.

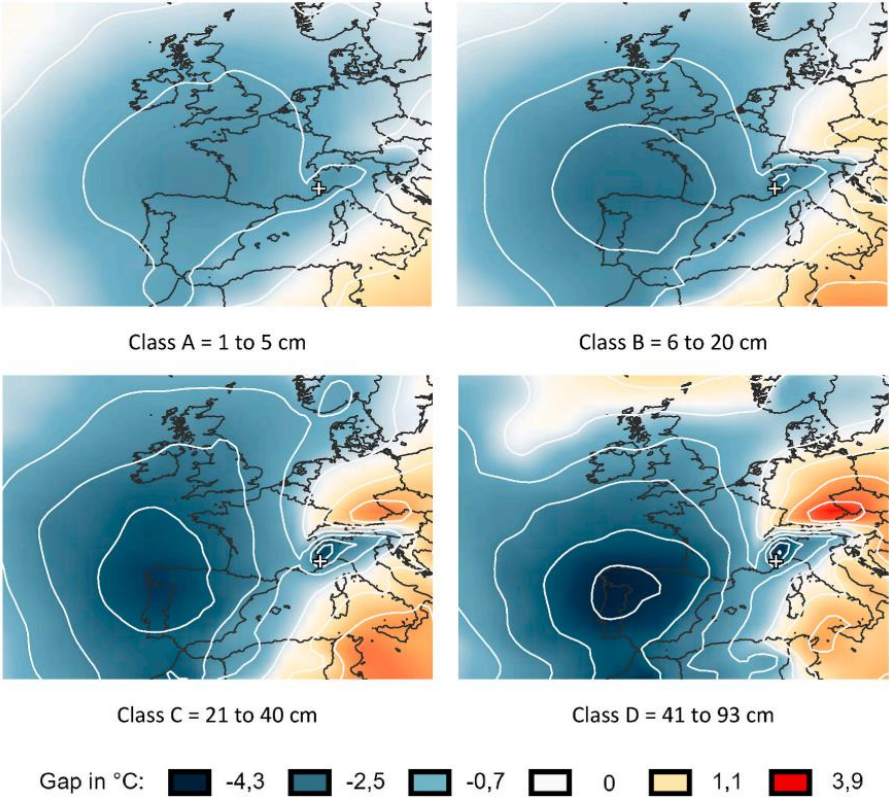


Fig. 15. Anomalies (reference period 1979–2018 for JFM) of the air temperature (in °C) at 850 hPa for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 1 °C.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

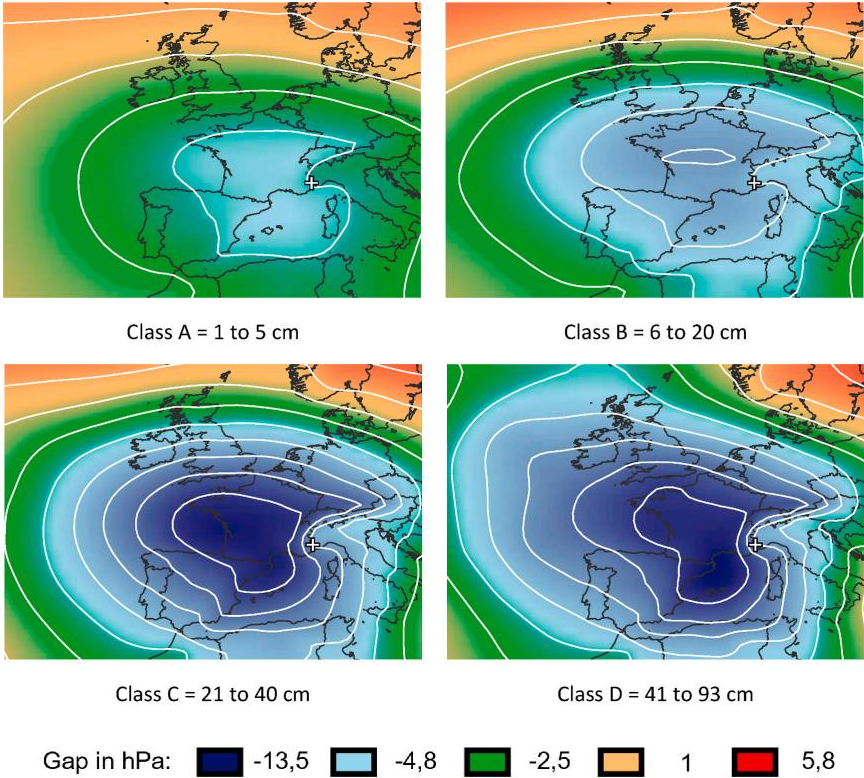


Fig. 16. Anomalies (reference period 1979–2018 for JFM) of the sea level pressure (in hPa) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 2 hPa.

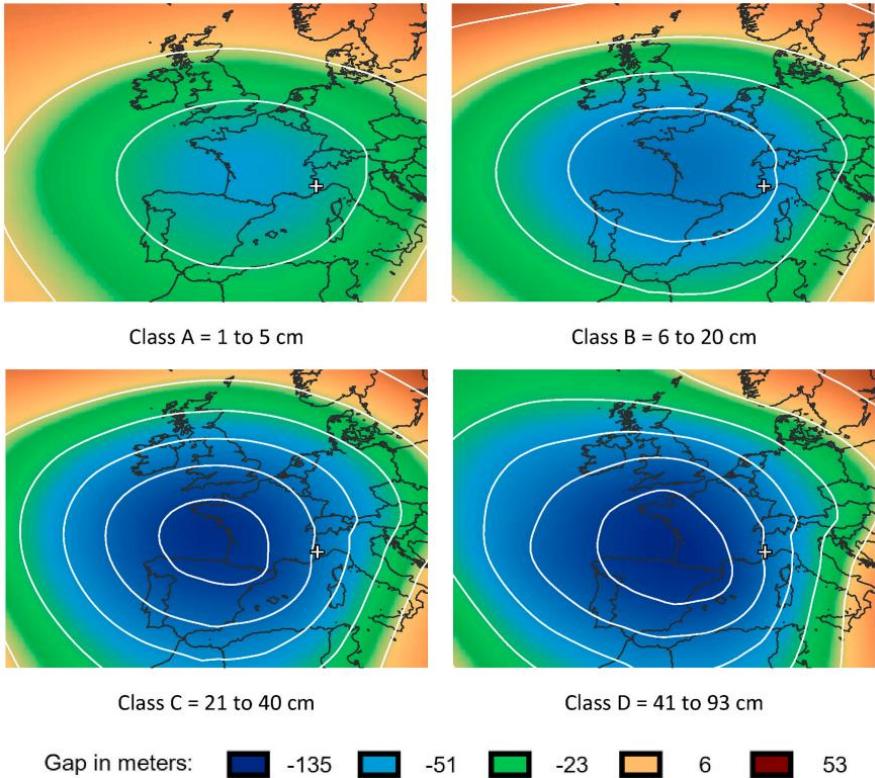


Fig. 17. Anomalies (reference period 1979–2018 for JFM) of the geopotential height 700 hPa (in meters) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isohypses) are separated by a gap of 30 m.

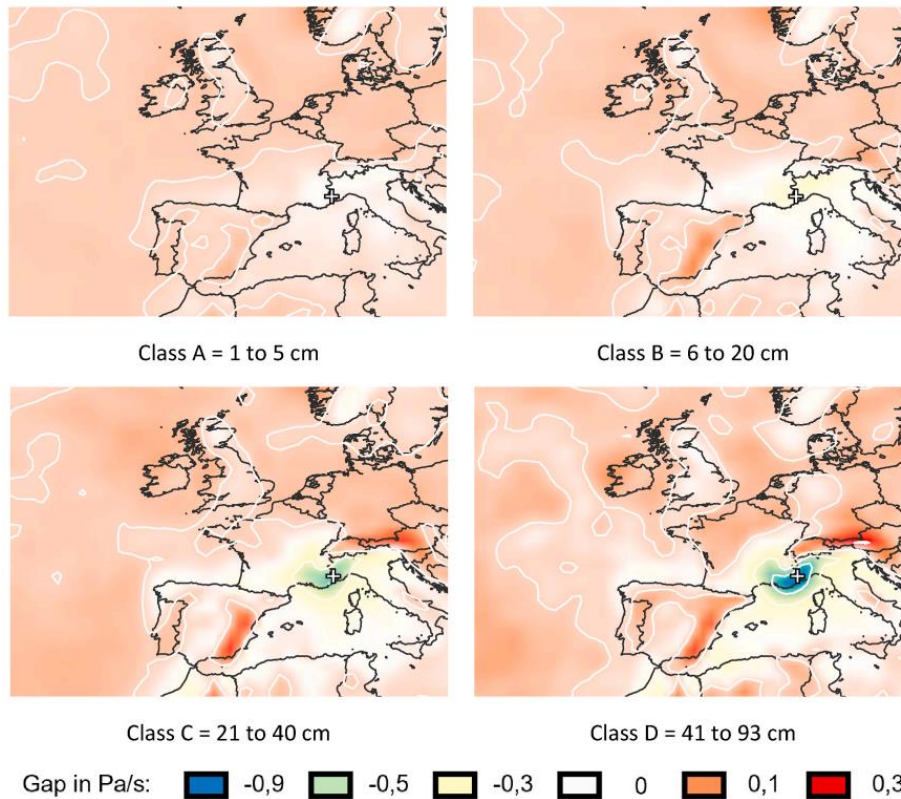


Fig. 18. Anomalies (reference period 1979–2018 for JFM) of the vertical vorticity at 700 hPa (in Pa/s) for class A, B, C and D. The white cross is the location of the Isola weather station (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020). The white lines (isolines) are separated by a gap of 0.3 Pa/s.

The anomalies of the sea level pressure (cf. Fig. 16) and the geopotential height 700 hPa (cf. Fig. 17) are quite similar. They point out for each class some pressures much lower than the climatological mean, especially slightly to the West of Isola 2000. This configuration could make it possible, by pressing the air to the West of Isola 2000, to lift the air more easily over the study region. The sea level pressure for C and D, presents pressures between -5 and -13 hPa below normal. The same logic is applied for the geopotential height 700 hPa, with values between -50 and -100 m. In the case of A and B, the anomalies are still negative, but they are weaker.

Finally, the anomalies of the vertical velocity 700 hPa (cf. Fig. 18), allows to observe an important difference in the vertical dynamics of the atmosphere for the events C and D, compared to the normal state. Indeed, the vertical velocity is higher, with values between -0.5 and -0.9 Pa/s for C and D. This dynamic character is almost absent in episodes B and even more in A.

4. Interpretations and discussion

Results showed a warming of air temperature at the Isola 2000 weather station since the mid 2000s. It would have been natural to observe at the same moment a decrease in the frequency of SP and consequently a reduction in SD. However, the opposite has been demonstrated by statistical analyses. The same result is also found in the work of Capozzi et al. (2022), which

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

is interested in the variability of winter SP in the Apennines (Italy) between 1884 and 2015. Indeed, it is shown the increase in the frequency of occurrence of SP over the past 20 years.

The question is why the rise in air temperature doesn't impact snow conditions at this altitude (1912 m) and in this part of the Alps ? It is possible to mention two hypotheses.

First answer would be that the capacity of the air mass to contain water vapor increases with the rise of the air temperature, as evoked by the Clausius-Clapeyron relation (Oliver and Brown, 1951 ; Lenderink et al., 2017). Thus, raw material is found in greater quantities, which leads to more precipitation. As explained here and showed in the study of Bednorz (2013), the SP requires an important quantity of humidity in the atmosphere to produce some important meteorological events. However, SP needs negative temperature to occur (as shown here and in the work of Bednorz), so air temperature rise would obviously produce the opposite effect at some point with global warming at work.

The second hypothesis is that atmospheric circulation favorable to SP is more frequent than in the past. This would mean that a change in the general atmospheric circulation would be taking place, either through the impact of climate change or through climate's natural variability. This hypothesis seems more probable. In effect, Capozzi et al. (2022), explained that the reverse trend of the Arctic Oscillation (AO) index and the prevalence of a neutral or negative Eastern Atlantic Western Russia (EAWR) pattern played an important role in the increase of the frequency of the SP in Apennines (Italy).

This assumption will be addressed in future work, by producing a classification of the general atmospheric circulation, by the combination of a Principal Component Analysis (PCA) and a Hierarchical Clustering Analyze (HCA) and the help of the last reanalysis (ERA5) and models outputs (Coupled Model Intercomparison Project 6 or CMIP6). This classification will be produced with the correlated variables, which create atmospheric conditions specific to solid precipitation. This is why this paper is very important, since it already makes it possible to provide the fundamental and essential bases to go longer. The objective will be to isolate specific circulation in case of SP, calculate its frequency in the past, and in the future. It would certainly be possible to obtain the probable evolution of the atmospheric circulation conducive to SP and consequently have a foresight of the future evolution of the type of event.

5. Conclusion

Results of the study revealed a climatic signal towards an increase in air temperature at the Isola 2000 weather station. For example, the annual minimal air temperature (T_m) close to $-4\text{ }^\circ\text{C}$ in 2005, reaches about $-1.5\text{ }^\circ\text{C}$ in 2018, a rise of almost $+2.5\text{ }^\circ$. This trend can be also observed with the maximum and mean air temperature. In addition, after decreasing and then stabilizing, the frequency of solid precipitation (SP) has been on the rise since the mid-2000s. The thickness of snow depth (SD) follows the same dynamics, which suggests that at the moment, the impact of global warming at Isola 2000 (located at 1912 m of altitude) on the snow conditions is negative.

Study also highlighted covariations between SP and seven atmospheric variables : vertical velocity 700 hPa ; specific humidity 850 hPa ; sea level pressure ; air temperature 850 hPa ; geopotential height 700 hPa ; U-component of wind 700 hPa ; V-component of wind 700 hPa. A reinforcement of each of these variables in the direction of the relations results to an

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

intensification of local SP. These variables are guided by the general atmospheric circulation. Consequently, the presence of a depression over Iceland, flanked by two anticyclones (one located over the Azores and the other over the Black Sea) forms a depressionary trough from Brittany to the South-East of France. For the most important classes of SP, a cut-off forms at the level of the Languedoc coast. This cutoff drives air masses to move from the sea (where they are enriched in water vapor) towards the Southern Alps. Subsequently, orographic forcing causes humid air masses to rise, then cool down and condensate, until abundant SP is produced (if the air atmosphere is cold enough in altitude). Consequently, it is possible to distinguish two types of atmospheric circulation condition which produce SP : cyclonic western circulations for classes A (fall 1–5 cm) and B (fall 6–20 cm) ; southern circulations with a depression centered on Iceland and a trough on Western Europe for classes C (fall 21–40 cm) and D (fall 41–93 cm).

In the idea to explain our statistical results which show an increase in frequency of SP and thickness of SD, which is counterintuitive with the rise of the air temperature, two hypotheses can be evoke. First of all, the probable enrichment of water vapor in the air mass (closely linked to the rise in temperature according to the Clapeyron theoretical relation), that would have caused an increase in SP, because raw material is found in greater quantities, which leads to more precipitation. Nevertheless, the average annual air temperature measured in Isola 2000 weather station for the months of January to March, has increased by almost 2.5 °C within 15 years. It is therefore dangerously close to the isotherm 0 °C, a critical temperature for SP (Brun and Touvier, 1987; Brzoska, 2006). That is why, although the conditions are certainly favorable for the time being, it could be seriously modified by global warming in the future.

Secondly, atmospheric circulations favorable to SP (cyclonic western and southern circulation) could be more frequent than in the past. An anthropogenic or natural change, in the frequency of these two identified regimes, could have a positive impact on the occurrence of SP. This point deserves to be studied in greater depth, with the perspective of a new methodology. Actually, a classification of the general atmospheric circulation, by a combination PCA/HCA, used on the SP correlated variables, should isolate specific circulation and calculate its frequency for the past and the future. This classification will be made by the support of the most recent reanalysis (ERA5) and climate models outputs (CMIP6). It should make it possible to provide a beginning of an answer concerning the future of the snow conditions.

1.7 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 1.

Le premier chapitre examine les effets du réchauffement climatique sur les précipitations solides et la couverture neigeuse, en se concentrant sur les Alpes du Sud. Une revue de la littérature met en lumière les travaux de chercheurs tels que Mudryk et Pulliainen, qui lient la diminution de la neige aux émissions anthropiques. Young souligne une réduction globale de la neige, particulièrement marquée en Asie et en Europe.

Les études régionales, notamment celles du CREA Mont-Blanc, montrent une diminution de la neige à des altitudes moyennes dans les Alpes françaises, avec des impacts significatifs sur les écosystèmes et les stations de ski. En utilisant les réanalyses ERA-INTERIM, ce chapitre identifie les variables atmosphériques corrélées aux chutes de neige et explore les configurations de circulation atmosphérique qui les influencent.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

L'article « Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the southern Alps: Case of the Isola 2000 weather station » inclus dans ce chapitre, analyse les tendances historiques des températures et des précipitations neigeuses à Isola 2000 depuis 1972. Les résultats montrent une augmentation saisonnière des températures et une forte variabilité des chutes de neige, avec une baisse initiale suivie d'une augmentation depuis les années 2000 pour les mois de janvier à mars. En outre, les circulations cycloniques occidentales et méridionales, particulièrement celles avec une dépression centrée sur l'Islande, sont identifiées comme favorisant les fortes chutes de neige. Ces analyses permettent de comprendre les impacts futurs du réchauffement climatique sur les régimes de précipitations solides et la couverture neigeuse dans cette région.

Dans le chapitre 2, nous approfondirons l'étude des circulations atmosphériques en nous concentrant sur la classification de Hess et Brezowsky. Cette classification, largement utilisée pour étudier les régimes de circulation atmosphérique en Europe, sera appliquée pour évaluer son efficacité à représenter les types de circulation propices aux précipitations solides dans les Alpes du Sud. En utilisant les résultats obtenus dans le chapitre 1, le chapitre 2 visera à identifier les limites et les opportunités offertes par cette classification dans le contexte de l'étude des régimes neigeux, en fournissant des bases pour les projections climatiques futures dans cette région.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUE.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE 1.

Barbier B., 1982 : *L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports)*. *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 485-486 pp. 121-124.

Barrier N., Tréguier A-N., Cassou C., Deshayes J., 2014 : *Influence des régimes de temps atmosphériques sur la circulation océanique de l'Atlantique Nord*. *La Météorologie, Météo et Climat*, 2014, 8 (87), pp.38-44. (10.4267/2042/54335). (hal-01156419).

Barry R.G., Chorley R.J., 2003 : *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge, London & New York, 421p.

Beaumet J., Ménégos M., Morin, S. et al. 2021 : *Twentieth century temperature and snow cover changes in the French Alps*. *Reg Environ Change* 21, 114. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01830-x>.

Bigot S., Rome S., Planchon O., Lebel T., 2007 : *Variations climatiques et circulation atmosphérique européenne dans le massif du Vercors (1921-2006)*. *Conférence : Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. Volume : 20.

Boé J., Terray L., 2008 : *Régimes de temps et désagrégation d'échelle*. *La Houille Blanche*, N°2 (Avril 2008), pp. 45-51.

Bonet R., Arnaud F., Bodin X., Bouche M., Boulangeat I., Philippe Bourdeau P., Martial Bouvier M., Laurent Cavalli L., Philippe Choler P., Anne Delestrade A., Cédric Dentant C., Dominique Dumas D., Laurent Fouinat L., Marie Gardent M., Sébastien Lavergne S., Emmanuel Naffrechoux E., Yann Nellier Y., Marie-Elodie Perga M-E., Clotilde Sagot C., Olivier Senn O. & Wilfried Thuiller W., 2016 : *Indicators of climate: Ecrins National Park participates in long-term monitoring to help determine the effects of climate change*. *Eco.mont* 8 : 1.

Boniface K., 2009 : *Quantification de la vapeur d'eau atmosphérique par GPS et apport à la prévision des événements cévenols*. *Océan, Atmosphère*. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.

Brun E., Touvier F., 1987 : *Etude expérimentale de la convection thermique dans la neige*. *J. Phys. Colloques*, Volume 48, Numéro C1.

Brzoska J-B., 2006 : *Métamorphoses de la neige*. Centre d'étude de la neige. Météo-France.

Carrega P., 2018 : *Le climat de Nice-Aéroport de 1946 à nos jours*. 31ème colloque international de l'Association internationale de Climatologie, Nice, France.

Carrega P. et Michelot N., 2021 : *Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes*. *Physio-Géo*, volume 16, p1-70 <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>.

Cassou C., 2002 : *Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique*. *La Météorologie* - n° 45 - mai 2004.

Cantat O., Savouret E., Bensaïd A., 2012 : *La régionalisation des types de temps en France mé-tropolitaine*. *Les climats régionaux : observation et modélisation de l'Association internationale de Climatologie*, 2012, Rennes, France. pp.165-170.

Chochon R., Martin N., Lebourg T., 2021 : *Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes : atmospheric mechanisms and resulting rainfall*. *SimHydro 2021 – Models for complex and global water issues-Practices and expectations*. 16-18 June 2021, Sophia-Antipolis France.

François, H. et al., 2023 : *Climate change exacerbates snow-water-energy challenges for European ski tourism*, *Nature Climate Change*, doi:10.1038/s41558-023-01759-5.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

Francois H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., 2016 : Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). *La Houille Blanche*, n° 4, 2016, p. 66-84.

Francon L., Corona C., Till-Bottraud I., Choler P., Carlson B-Z., Charrier G., Améglio T., Morin S., Eckert N., Roussel E., Lopez-Saez J, Stoffel M., 2020 : Assessing the effects of earlier snow melt-out on alpine shrub growth: The sooner the better?. *Ecological Indicators*, Volume 115.

GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161p.

Goncalves O., 2013 : Efficiency and productivity of French ski resorts. *Tourism Management*, Volume 36.

Groupe Régional d'Experts sur le Climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD)., 2018 : Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud, Cahier Mon-tagne, GeographR.

Joye J-F., 2019 : Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. Le point après l'annulation partielle du décret UTN. *Journal Spécial des Sociétés*.

Kysely J., Begueria S., Beranová R., Gaál L., López-Moreno J-I., 2012 : Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Global and Planetary Change*, Volumes 98–99.

Lenderink G., Barbero R., Loriaux J-M., Fowler H-J., 2017 : Super-Clausius–Clapeyron Scaling of Extreme Hourly Convective Precipitation and Its Relation to Large-Scale Atmospheric Conditions. *Journal of Climate*. Volume 30, Issue 15.

Malardel S., 2009 : Fondamentaux de météorologie – 2 ème édition. Cépaduès édition. 728 pages.

Martin N., Carrega P., 2011 : L'enneigement dans les Alpes du Sud en France : Évolution tempo-relle et relation avec la circulation atmosphérique. XXIVe colloque de l'Association internationale de Climatologie, Sep 2011, Rovereto, Italie. hal- 01132732.

Marty C., Schögl S., Bavay M., Lehning M., 2017 : How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, 11, 517–529.

Mounier J., 1982 : Carte climatique détaillée de la France. Feuille Nantes. E.R. 30 du CNRS, Gap, OPHRYS.

Nogueira M., 2020 : Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years : Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, Volume 583.

Norois., 2004 : Numéro spécial sur les types de temps, 148 p.

Nyikadzino B., Chitakira M., Muchuru S., 2020 : Rainfall and runoff trend analysis in the Limpopo river basin using the Mann Kendall statistic. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, Volume 117.

Peña J-C., Schulte L., 2019 : Simulated and reconstructed atmospheric variability and their relation with large Pre-industrial summer floods in the Hasli-Aare catchment (Swiss Alps) since 1300 CE. *Global and Planetary Change*, Volume 190.

Pédélaborde P., 1956 : La circulation générale de l'atmosphère. *L'information géographique*, volume 20, n°3.

Pettitt, A.N., 1979 : A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society : Series C (Applied Statistics)*, 28 (2), 126–135.

CHAPITRE 1 : RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE, PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET CONDITIONS DE CIRCULATIONS ATMOSPHÉRIQUE.

Piras M., Mascaro G., Deidda R., Vivoni E., 2016 : Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. Science of The Total Environment, Volume 543, Part B.

Planchon O., Cantat O., Quénot H., 2015 : Types de temps et types de circulation atmosphérique : essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). Actes du XXVIIIème colloque de l'AIC, Liège (Belgique, 1-4 juillet 2015), 381-386.

Pulliaainen J., 2024 : Snow loss pinned to human-induced emissions. Nature ; 625 (7994) : 246-247. Doi : 10.1038/d41586-023-03993-5. PMID : 38200303.

Rabatel A., Berthier E., Arnaud Y., Dedieu J.P., Dumont M., et al., 2017 : Télédétection satellitaire des surfaces enneigées et englacées. La Météorologie, Météo et Climat.

Spandre P., François H., Morin S., George-Marcelpoil E., 2015 : Dynamique de la neige de culture dans les Alpes françaises. Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine.

Tang Z., Wang X., Deng G., Wang X., Jiang Z., Sang G., 2020 : Spatiotemporal variation of snowline altitude at the end of melting season across High Mountain Asia, using MODIS snow cover product. Advances in Space Research, Volume 66, Issue 11.

Trzpit J.Paul., 1980 : La Méditerranée, un creuset d'humidité. In: Méditerranée, troisième série, tome 40. Recherches climatiques en régions méditerranéennes, sous la direction de A.Douguedroit. pp. 13-28.

United States Environmental Protection Agency., 2023 : Fifth EditiEPA : <https://www.epa.gov/climate-indicators/snow-ice>

Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y. and Morin S., 2018 : Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, The Cryosphere, 12, 1249-1271.

Werner P.C., Gerstengarbe F.-W., 2010 : Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky. PIK Report No. 119, 146 p.

Young, Stephen S., 2023. Global and Regional Snow Cover Decline : 2000–2022. Climate 11, no. 8 : 162. <https://doi.org/10.3390/cli11080162>.

Zhu J., Xie A., Qin X., Wang Y., Xu B., Wang Y., 2021 : An Assessment of ERA5 Reanalysis for Antarctic Near-Surface Air Temperature. Atmosphere. 12(2):217. <https://doi.org/10.3390/atmos12020217>.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

2.1 INTRODUCTION.

Ce chapitre explore la classification des circulations atmosphériques en relation avec les précipitations solides, en se concentrant spécifiquement sur les massifs montagneux du département des Alpes-Maritimes. La classification de Hess et Brezowsky, développée à l'origine pour l'étude des régimes de circulation en Europe centrale, sera au centre de cette analyse. Cette classification a été largement adoptée pour étudier les relations entre les types de circulation atmosphérique et les événements météorologiques extrêmes, y compris les précipitations solides.

Le chapitre commence par un état de l'art des principales classifications atmosphériques existantes, offrant un cadre théorique pour comprendre les approches utilisées dans l'étude des circulations atmosphériques. Par la suite, le réseau de mesure utilisé dans cette thèse sera présenté, permettant de contextualiser les données utilisées pour les analyses ultérieures. Ensuite, nous examinerons les tendances climatiques concernant l'évolution des précipitations neigeuses dans les Alpes du Sud, en intégrant un article dédié à la classification de Hess et Brezowsky. Cet article évalue l'applicabilité de cette classification dans le contexte spécifique des Alpes-Maritimes et propose les ajustements nécessaires pour une meilleure compréhension des mécanismes météorologiques locaux influençant les précipitations solides.

Ainsi, l'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer l'efficacité de la classification de Hess et Brezowsky pour représenter les types de circulation atmosphérique propices aux précipitations neigeuses dans les Alpes du Sud. En utilisant les données de réanalyse ERA-INTERIM et les observations locales, nous chercherons à déterminer si cette classification, traditionnellement appliquée à l'échelle européenne, peut être adaptée aux particularités climatiques des Alpes du Sud. Enfin, il sera mis en lumière les forces et les limites de la classification de Hess et Brezowsky lorsqu'elle est appliquée à l'étude des précipitations solides dans un contexte de changement climatique. Cette analyse contribuera à une meilleure compréhension des mécanismes atmosphériques à l'œuvre dans les Alpes du Sud et fournira des perspectives pour les études climatiques futures dans d'autres régions montagneuses similaires.

2.2 ÉTAT DE L'ART DES PRINCIPALES CLASSIFICATIONS EXISTANTES.

L'étude des circulations atmosphériques a conduit au développement de plusieurs classifications, chacune visant à identifier les types de circulation qui influencent les conditions météorologiques dans une région donnée. Parmi les classifications les plus reconnues, on trouve celles de Hess et Brezowsky, Lamb, Grosswetterlagen, Cost77, Vangengeim-Girs, et Jenkinson et Collison. Ces classifications ont été largement utilisées pour analyser les régimes climatiques en Europe, et elles jouent un rôle crucial dans la compréhension des processus atmosphériques à l'origine des événements météorologiques extrêmes, tels que les précipitations solides.

La classification de Hess et Brezowsky, développée en 1952, est l'une des plus utilisées en Europe centrale. Elle regroupe les circulations atmosphériques en 29 types différents, basés

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOSPHERIQUES ET DES PRECIPITATIONS SOLIDES.

sur la position et l'intensité des centres d'action, tels que les dépressions et les anticyclones (Hess & Brezowsky., 1952). Cette classification est particulièrement appréciée pour sa capacité à capturer les grandes tendances climatiques et à relier les types de circulation aux anomalies météorologiques régionales. Cependant, son application aux régions montagneuses comme les Alpes du Sud nécessite souvent des ajustements, en raison de la complexité des interactions entre la topographie et les flux atmosphériques.

La classification de Lamb, également connue sous le nom de "Lamb Weather Types" (LWT), est un autre système largement utilisé pour étudier les régimes de circulation en Europe. Cette classification est basée sur l'analyse de la direction et de l'intensité des vents dominants, ainsi que sur la position des systèmes de pression (Lamb, 1972). Bien qu'elle soit très utile pour analyser les conditions atmosphériques à l'échelle globale, son application à des échelles plus locales comme les Alpes du Sud, peut être limitée par la résolution des données disponibles et par la nécessité de tenir compte des effets locaux de la topographie.

La classification Grosswetterlagen, souvent utilisée en Allemagne et en Autriche, regroupe les régimes de circulation en 10 à 15 types principaux, basés sur des critères similaires à ceux de Hess et Brezowsky (Werner et al., 2000). Cette classification se distingue par son approche simplifiée, qui permet une interprétation rapide des régimes atmosphériques. Cependant, elle peut manquer de précision lorsqu'elle est appliquée à des régions présentant une topographie complexe, où les interactions entre les flux atmosphériques et le relief jouent un rôle déterminant dans la formation des précipitations solides.

La classification Cost77 est une méthode plus récente, développée dans le cadre du projet COST Action 733. Elle propose un cadre flexible pour la classification des circulations atmosphériques, en tenant compte des spécificités régionales et des particularités climatiques locales (COST Action 733, 2013). Cette classification est particulièrement utile dans des études à l'échelle régionale et permet des ajustements fins en fonction des objectifs de recherche et des données disponibles.

La classification de Vangengeim-Girs, utilisée principalement en Russie et en Europe de l'Est, regroupe les régimes atmosphériques en trois groupes principaux : zonal, méridional, et cyclonique (Vangengeim & Girs, 1974). Elle est largement utilisée pour analyser les régimes climatiques à long terme et pour étudier les interactions entre les circulations atmosphériques et les anomalies climatiques. Cependant, cette classification peut nécessiter des ajustements pour être appliquée efficacement aux régions montagneuses comme les Alpes du Sud, en raison de sa simplification des types de circulation.

La classification de Jenkinson et Collison, une version modifiée de la classification de Lamb, a été développée pour étendre l'application des types de circulation à un plus grand nombre de régions, y compris celles avec une topographie complexe (Jenkinson & Collison, 1977). Cette classification est basée sur l'analyse des gradients de pression et de vent, offrant une flexibilité accrue pour l'étude des régimes atmosphériques dans des régions comme les Alpes du Sud.

En résumé, ces classifications offrent des outils précieux pour l'analyse des circulations atmosphériques, mais leur application aux Alpes du Sud nécessite souvent des adaptations. Etant donné qu'il n'était pas envisageable pour une raison de temps de tester l'ensemble des classifications, le choix de Hess et Brezowsky s'imposait par la simplicité d'obtention des données et par le consensus scientifique autour de sa robustesse. L'objectif de ce chapitre est donc

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

d'évaluer l'efficacité de la classification de Hess et Brezowsky dans le contexte spécifique des Alpes-Maritimes et de proposer, si nécessaire, des ajustements pour mieux comprendre les mécanismes atmosphériques influençant les précipitations solides dans cette région.

2.3 PRÉSENTATION DU RÉSEAU D'OBSERVATION DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Pour analyser les précipitations solides dans les Alpes du Sud, il est crucial de disposer d'un réseau d'observation fiable et bien distribué. Ce réseau permet de recueillir des données précises sur la fréquence et l'intensité des précipitations neigeuses, ainsi que sur d'autres variables climatiques associées, telles que la température et l'humidité. La robustesse et la précision des données recueillies sont essentielles pour comprendre les tendances climatiques locales et pour valider les modèles de circulation atmosphérique appliqués à la région.

2.3.1 Description du réseau de mesure.

Le réseau de mesure utilisé dans cette étude comprend plusieurs stations météorologiques situées à différentes altitudes dans les Alpes-Maritimes. Ce réseau est composé de stations automatiques et manuelles, gérées par Météo-France. Parmi ces stations, la station météorologique d'Isola 2000 est la plus importante pour cette étude. Située à une altitude de 1912 mètres, elle joue un rôle central dans la collecte des données nécessaires pour analyser les précipitations solides. En effet, les données recueillies à cette station couvrent une longue période, ce qui permet une analyse approfondie des tendances climatiques à long terme.

Les autres stations du réseau sont réparties stratégiquement dans les Alpes-Maritimes, à différentes altitudes et expositions, afin de capturer la diversité des conditions climatiques dans la région. Ces stations se situent à des altitudes qui varient entre 1500 et 1900 mètres. Cette distribution permet de comparer les données et de comprendre comment l'altitude et l'exposition influencent les précipitations solides dans les différentes parties du massif.

Le réseau sélectionné pour cette thèse se compose de cinq stations météorologiques (Tableau 1) gérées par Météo-France (le service officiel de la météorologie et de la climatologie en France). Ces postes sont situés à Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino et Estenc. D'autres stations nivologiques sont également disponibles dans le département, mais elles ont été écartées en raison de trop nombreuses lacunes dans les relevés quotidiens. En effet, seules les stations avec un pourcentage de lacunes inférieur ou égal à 3 % par saison (décembre à avril inclus) sont conservées.

Station	Latitude	Longitude	Altitude en mètres
Isola 2000	44.18	7.15	1912
Valberg	44.09	6.92	1630
Auron	44.22	6.93	1910
Val Casterino	44.09	7.5	1554
Estenc	44.23	6.75	1850

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Les postes d'observation (Figures 4 et 5) couvrent un large éventail de conditions topographiques, ce qui permet d'obtenir une représentation diversifiée des événements de précipitations solides dans la région. Les mesures de neige sont réalisées quotidiennement et manuellement (chaque jour à 6 h 00 UTC), à l'aide de planches à neige, où la hauteur de la neige est relevée en centimètres avec une règle graduée.

Les procédures de contrôle de la qualité des données des cinq stations retenues ont été effectuées selon le protocole utilisé par Capozzi et al. (2022) pour garantir la fiabilité des séries temporelles. Par exemple, le test de Pettitt (1979) est utilisé pour vérifier l'homogénéité des données. Ce protocole est largement détaillé dans l'article en fin de chapitre. Enfin, la période commune aux observations des cinq postes s'étend de 1997 à 2019.

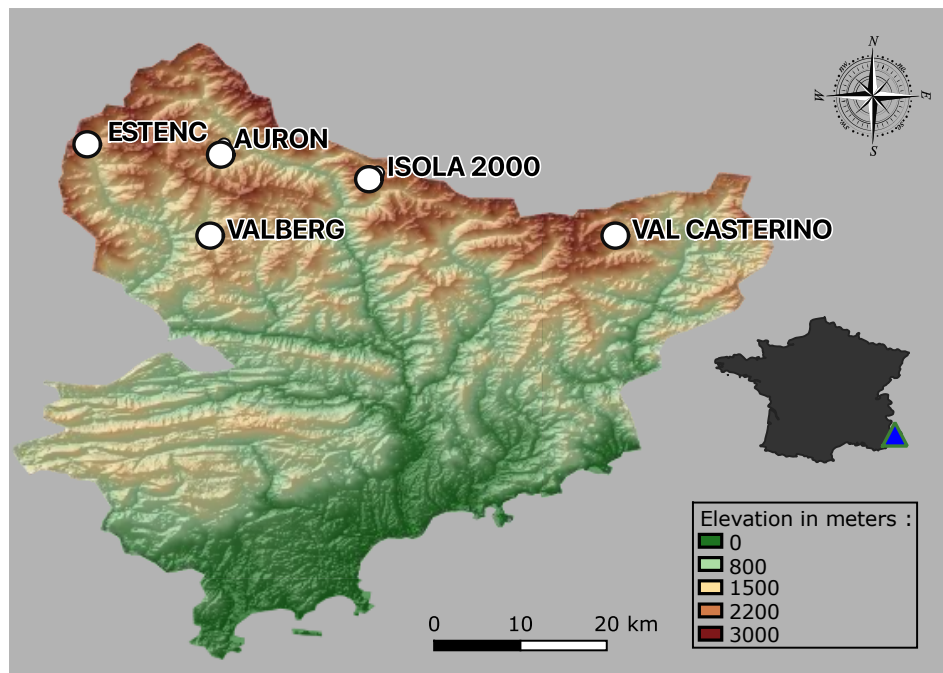


Figure 4: Localisation des cinq stations du réseau de mesure (MNT produit par l'IGN).



Figure 5 : Photo du poste de mesure d'Isola 2000 (Météo-France).

2.3.2 Classification des précipitations solides selon l'intensité des chutes.

Pour mieux comprendre les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, il est essentiel de les classer selon leur intensité. Cette classification permet d'identifier les événements météorologiques extrêmes et de mieux analyser les conditions atmosphériques qui les favorisent.

Les précipitations neigeuses du réseau sont classées en trois catégories en fonction de la quantité de neige tombée sur une période de 24 heures. Cette classification est réalisée à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP) suivie d'une classification ascendante hiérarchique (CAH), permettant de regrouper les jours pendant lesquels au moins une chute de neige est enregistrée, en fonction de leurs similarités en termes de quantité de neige tombée.

Le comportement général est assez comparable d'une station à l'autre. La Figure 6 représente le graphique des variables de l'ACP et montre la forte corrélation entre les cinq stations d'étude, avec cependant deux ensembles géographiques distincts. Les stations Est, situées à la bordure de la frontière italienne telles que Val Casterino et Isola 2000, et les stations ouest, comme Valberg, Auron et Estenc. Les corrélations entre les trois grandes stations de ski du département (Auron, Valberg et Isola) sont fortes, ce qui signifie que, de manière générale, lorsqu'il neige dans une station, les deux autres sont également concernées par l'événement météorologique.

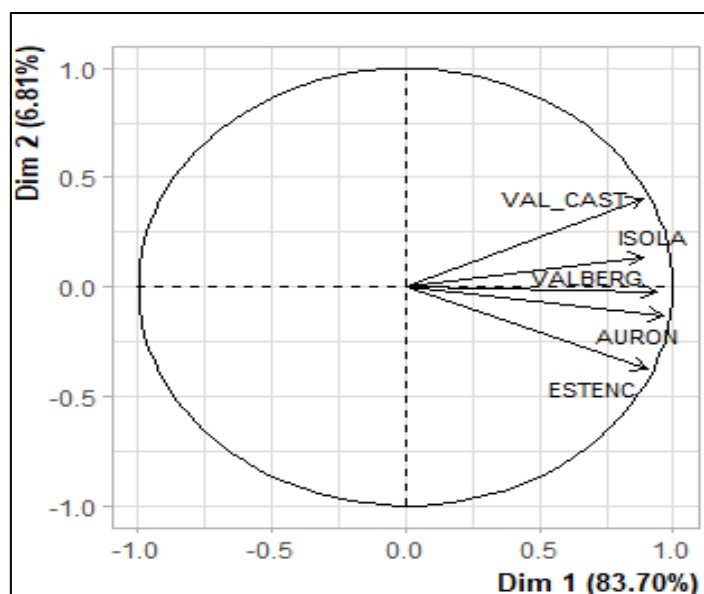


Figure 6 : Graphe des variables de l'ACP (Données : Météo-France).

Afin que l'étude soit représentative de l'ensemble des stations, seuls les jours comportant au minimum une chute de neige dans les cinq stations, avec une quantité supérieure à 1 cm, sont retenus pour la classification. Cela correspond à 243 jours pour la période 1990-2019 (DJFMA). Le résultat de la CAH (Tableau 2) fait apparaître trois classes de chutes de neige homogènes et significatives. Cette classification permet d'analyser les précipitations solides non seulement en termes de fréquence, mais aussi d'intensité. En identifiant les types de circulation atmosphérique associés à chaque catégorie, il est possible de mieux comprendre les

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

conditions qui conduisent à des chutes de neige importantes. La classe SP1 correspond à de faibles chutes de neige (environ 2.3 cm), la classe SP2 à des chutes modérées (environ 16.9 cm) et la classe SP3 à des fortes chutes de neige (environ 38 cm).

Classe	Val Casterino (cm)	Isola 2000 (cm)	Valberg (cm)	Estenc (cm)	Auron (cm)	Moyenne (cm)
SP1	2.2	3.2	1.6	2.7	2.1	2.3
SP2	14.6	16.6	15.6	19.8	17.8	16.9
SP3	38.1	37	34.4	39.3	41.3	38

En définitive, le réseau fournit une base solide pour des recherches météorologiques et climatologiques détaillées. En collectant des données précises et en garantissant leur fiabilité, il permet d'analyser les tendances des précipitations neigeuses et d'évaluer l'impact du changement climatique sur l'enneigement de la région. Ces informations sont essentielles non seulement pour la recherche scientifique, mais aussi pour les prévisions météorologiques et la gestion des ressources en neige.

2.4 TENDANCES CLIMATIQUES CONCERNANT L'ÉVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES SUR LE RÉSEAU DE MESURE.

L'analyse des tendances climatiques est essentielle pour comprendre l'évolution des précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, en particulier dans un contexte de réchauffement climatique. Cette section explore les tendances observées au sein du réseau de mesure, avec un accent particulier sur la fréquence, l'intensité, et la distribution saisonnière des précipitations neigeuses au cours des dernières décennies.

2.4.1 Analyse saisonnière (1985-2019).

L'étude des tendances climatiques concernant l'évolution des précipitations solides (Figure 7) révèle des dynamiques importantes sur une période de plusieurs décennies. Cette analyse s'est effectuée de 1985 à 2019, uniquement à la station d'Isola 2000 (1912 m), pour les mois de décembre à avril. En effet, celle-ci est la station de référence du département, puisqu'elle dispose de la plus longue série de données. Les sous-parties suivantes donnent donc un aperçu des principales tendances observées.

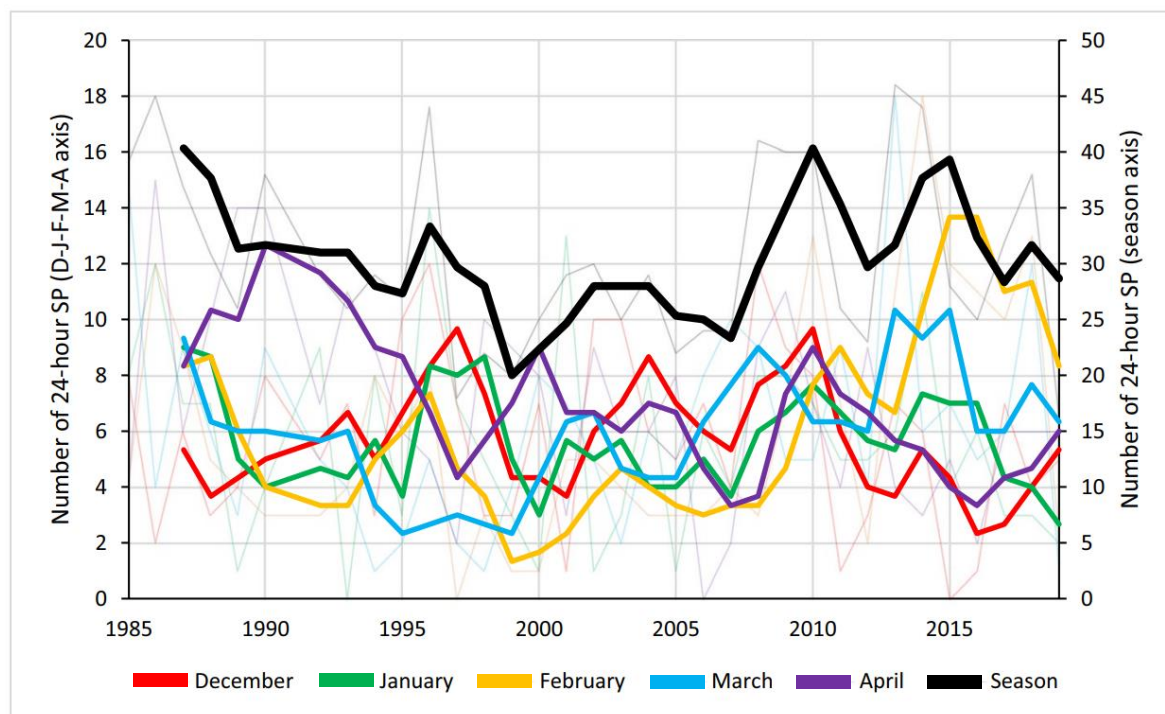


Figure 7 : Tendances d'évolutions des précipitations solides à Isola 2000 entre 1985 et 2019 pour les mois de décembre à janvier (Données : Météo-France). L'axe de gauche correspond au nombre de jours concernés par au minimum une chute pour décembre, janvier, février, mars et avril, tandis que l'axe de droite correspond au nombre pour tous les mois de la saison.

A. Diminution initiale (1985-1999) : Entre 1985 et 1999 (DJFMA), les données montrent une diminution significative du nombre de jours ayant connu au moins une précipitation solide à Isola 2000, passant d'environ 40 jours par saison à seulement 20.

B. Augmentation progressive (2000-2015) : De 2000 à 2015 (DJFMA), une tendance à la hausse est observée. Le nombre de journées avec au moins une chute de neige retourne à environ 40 par saison.

C. Nouvelle diminution (2016-2019) : Depuis 2016 (DJFMA), une nouvelle tendance à la baisse semble se dessiner, avec moins de 30 jours enregistrés en moyenne entre 2016 et 2019. Malheureusement, l'analyse n'a pas pu se poursuivre au-delà de 2019, l'épidémie de COVID ayant stoppé les relevés lors des saisons 2020 et 2021.

Cette dernière diminution est cohérente avec les projections climatiques pour les régions alpines, qui prévoient une hausse des températures et une augmentation des précipitations sous forme de pluie plutôt que de neige, surtout à des altitudes inférieures à 1500 mètres. En revanche, aux altitudes plus élevées, supérieures à 2000 mètres, les tendances sont moins uniformes. Bien que l'on observe une réduction des précipitations solides dans certaines stations, d'autres continuent de recevoir des quantités de neige relativement stables, notamment pendant les hivers les plus froids. Cela suggère que l'altitude joue un rôle crucial dans la modulation des effets du réchauffement climatique sur les précipitations solides, avec une zone de transition où les effets du changement climatique deviennent de plus en plus prononcés à mesure que l'on descend en altitude. L'analyse des anomalies climatiques au sein du réseau de mesure a également révélé une augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations solides. Des épisodes de neige extrême alternent désormais avec des périodes de faible enneigement, une

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

tendance qui complique la gestion des ressources en eau et l'organisation des activités touristiques dans la région. Ces anomalies sont souvent liées à des configurations spécifiques de circulation atmosphérique, telles que des dépressions cycloniques particulièrement actives ou des phases d'oscillations atmosphériques favorables aux précipitations solides. Existe-t-il un changement dans la fréquence des circulations favorables aux chutes de neige ? Le prochain chapitre essaiera d'y répondre.

En conclusion, les tendances climatiques observées sur le réseau de mesure confirment les inquiétudes concernant l'avenir des précipitations solides dans les Alpes-Maritimes. La diminution des précipitations neigeuses, combinée à une augmentation de la variabilité interannuelle, pourrait avoir des conséquences importantes pour les écosystèmes alpins, les ressources en eau, et l'économie régionale, en particulier pour le secteur du tourisme hivernal. Ces observations soulignent l'importance de poursuivre les recherches et d'améliorer les modèles de prévision climatique pour mieux anticiper les impacts futurs du changement climatique sur cette région montagneuse.

2.4.2 Analyse mensuelle (1985-2019).

L'analyse mensuelle des précipitations solides sur la période 1985-2019 révèle des variations significatives dans la distribution saisonnière de la neige au sein du réseau de mesure des Alpes-Maritimes. Cette analyse permet de mieux comprendre les tendances saisonnières et de mettre en évidence les mois les plus affectés par les changements climatiques.

L'analyse mensuelle montre des tendances spécifiques (Figure 8). Pour les mois de décembre, janvier et avril (début et fin de la saison des chutes de neige), une diminution significative des événements de précipitations solides est observée. Cette tendance pourrait être liée à un réchauffement des températures, entraînant une élévation de la limite pluie-neige. Cela signifie que certaines des précipitations qui auraient été sous forme de neige auparavant tombent désormais sous forme de pluie. Cette réduction est cohérente avec l'augmentation des températures observée au cours de la même période, particulièrement en décembre et en janvier, où la transition des précipitations de la neige à la pluie devient plus fréquente, surtout à des altitudes basses.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

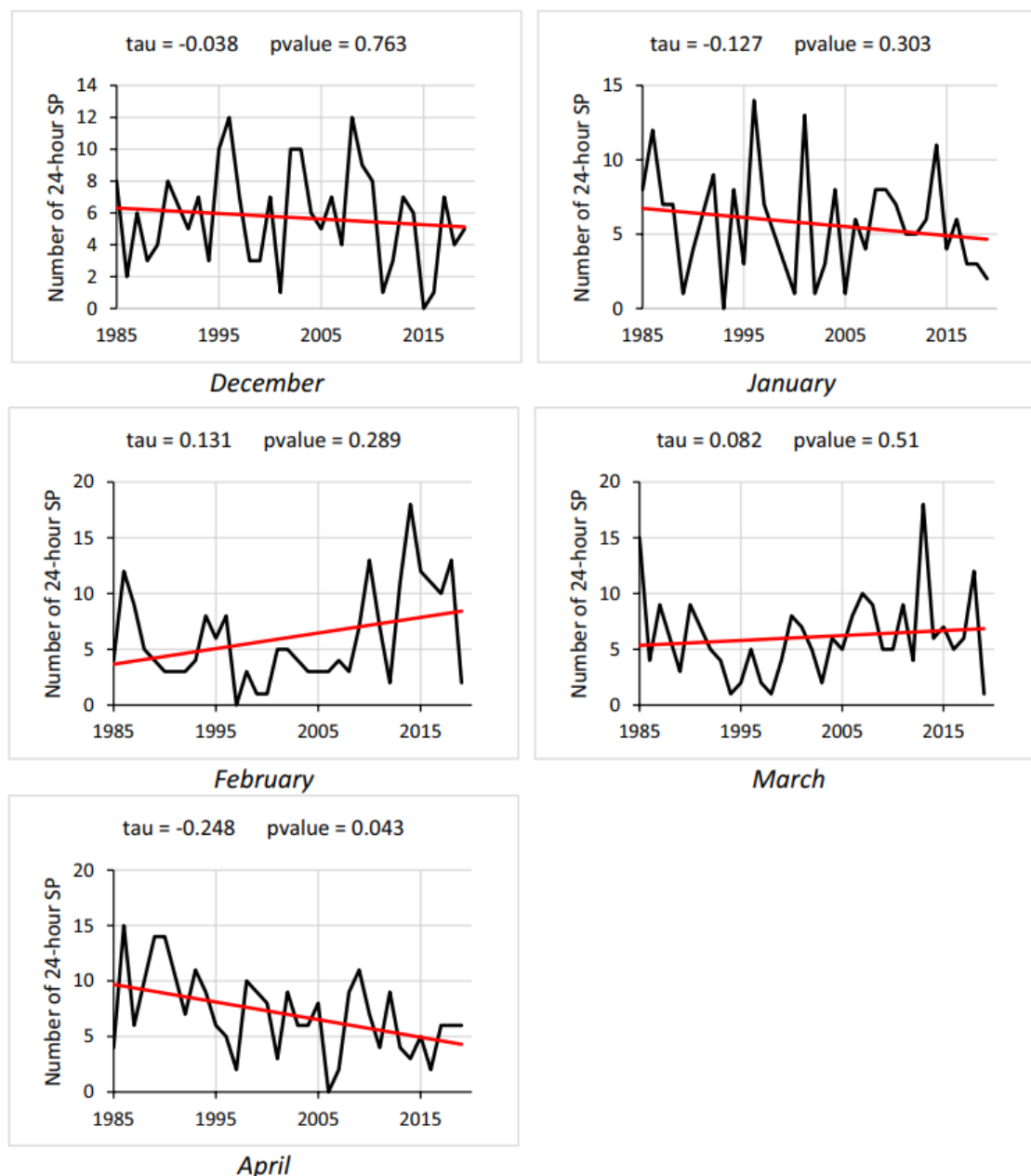


Figure 8 : Évolution (1985-2019) de l'occurrence mensuelle des précipitations solides sur 24 heures à la station météorologique d'Isola 2000 (Météo-France).

En février, une augmentation des précipitations solides est observée, suggérant que les conditions hivernales favorables aux chutes de neige persistent encore de manière significative pendant ce mois central de l'hiver. Cette augmentation contraste avec les tendances observées en décembre et janvier et pourrait indiquer que, malgré le réchauffement climatique, février reste un mois où les conditions sont encore propices à des chutes de neige abondantes.

En mars, la variabilité des précipitations solides d'une année à l'autre est plus marquée. Dans certaines années, les précipitations solides sont encore abondantes, tandis que dans d'autres, elles sont presque inexistantes. Cette variabilité est en partie due à la transition saisonnière, où les températures augmentent et les précipitations commencent à se faire plus rares. Les anomalies climatiques en mars sont souvent associées à des configurations spécifiques de

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

circulation atmosphérique, telles que des dépressions méditerranéennes, qui peuvent encore provoquer des épisodes de neige tardifs.

En avril, les précipitations solides deviennent rares et se limitent principalement aux altitudes les plus élevées. L'analyse montre une diminution marquée des évènements de précipitations neigeuses pendant ce mois, ce qui est en ligne avec l'augmentation des températures printanières. Les rares épisodes de neige en avril sont souvent liés à des descentes d'air froid en provenance du nord, mais leur fréquence semble diminuer au fil des années.

En résumé, l'analyse mensuelle des précipitations solides a mis en lumière des tendances significatives liées aux variations climatiques saisonnières dans les Alpes-Maritimes, soulignant l'importance des configurations atmosphériques dans la distribution des chutes de neige. Pour approfondir cette compréhension, l'article suivant examine en détail la relation entre ces précipitations solides et la classification de Hess et Brezowsky, en se concentrant sur le cas spécifique des Alpes-Maritimes.

2.5 ARTICLE 2 : « SOLID PRECIPITATION AND ITS RELATIONSHIP WITH THE HESS AND BREZOWSKY CLASSIFICATION: CASE IN THE FRENCH DEPARTMENT OF THE ALPES-MARITIMES ».

Cette section est dédiée à l'analyse de l'article intitulé « Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification : Case in the French department of the Alpes-Maritimes ». Cet article se concentre sur l'étude des interactions entre les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes et les types de circulation atmosphérique identifiés par la classification de Hess et Brezowsky.

La structure de cette section se décompose en plusieurs sous-parties, chacune abordant un aspect clé de l'article et de son intégration dans la thèse. Dans un premier temps, un résumé détaillé de l'article est présenté. Ce résumé long vise à fournir une vue d'ensemble complète des résultats obtenus, des méthodes utilisées, et des conclusions tirées. Ensuite, le contexte scientifique et les objectifs spécifiques de l'article sont explorés. Les objectifs de l'article, tant sur le plan théorique que pratique, sont clarifiés pour situer l'étude dans le cadre plus large des recherches sur les circulations atmosphériques et les précipitations solides. Après avoir présenté les résultats et les objectifs, la discussion des résultats obtenus dans l'article est abordée. Les forces de l'étude sont mises en avant, ainsi que ses limites. Cette discussion inclut une analyse critique de l'applicabilité de la classification de Hess et Brezowsky dans le contexte des Alpes-Maritimes, ainsi que des propositions d'amélioration pour les futures recherches. Par la suite, la manière dont l'article s'intègre dans l'ensemble de la thèse est discutée. Cette section montre comment les résultats de l'article contribuent à la compréhension globale des circulations atmosphériques et des précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, et comment ils enrichissent les autres travaux présentés dans la thèse. Le positionnement de l'article par rapport aux autres chapitres est également discuté. Enfin, la présentation complète de l'article lui-même est incluse. Le texte de l'article est ici reproduit tel qu'il a été rédigé pour publication.

2.5.1 *Résumé long.*

L'article se concentre sur les observations de précipitations solides et leur corrélation avec les types de circulation atmosphérique définis par la classification de Hess et Brezowsky, qui identifie cinq classes principales et 29 sous-classes, basées sur l'analyse des champs de pression dans la zone Euro-Atlantique (Bárdossy & Caspary, 1990). Les types de circulations ont été collectés à partir du catalogue quotidien, mis à jour mensuellement et publié par le Deutscher Wetterdienst (service officiel de météorologie allemand) depuis 1951.

Le réseau de mesure pour l'observation des précipitations neigeuses comprend cinq stations gérées par Météo-France et situées à différentes altitudes dans le nord du département : Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino et Estenc. Elles mesurent en centimètres les chutes de neige tombées sur une période de 24 heures, par des relevés manuels quotidiens réalisés à 6 h 00 UTC. Pour garantir la fiabilité des séries temporelles, des procédures de contrôle de la qualité des données sont appliquées et elles n'ont détecté aucune donnée aberrante ni aucune rupture d'homogénéité dans les séries d'observations.

Une méthode de classification est utilisée sur les précipitations solides du réseau afin de les diviser en plusieurs classes d'intensité de précipitations sur 24 heures. Cette méthode combine une ACP et une CAH. La période commune de mesure des postes s'étend de 1997 à 2019 pour DJFMA, soit un total de 243 jours pendant lesquels au moins une chute de neige de plus de 1 centimètre est enregistrée dans chaque station. Trois classes de précipitations neigeuses ont été identifiées par la combinaison ACP/CAH : faible (nommée SP1, chute d'environ 2,3 cm), moyenne (nommée SP2, chute d'environ 16,9 cm) et élevée (nommée SP3, chute d'environ 38 cm).

Pour une analyse statistique des tendances d'évolution des chutes de neige, la station d'Isola 2000 est utilisée comme référence. Les résultats suggèrent trois tendances principales : une diminution des chutes de neige de 1985 à 1999, une augmentation de 2000 à 2015, et une nouvelle diminution depuis 2016. En affinant l'analyse mois par mois, les données montrent une diminution des précipitations solides en décembre, janvier et avril, et une augmentation en février et mars, ce qui signifie un raccourcissement de la saison de neige.

En croisant la classification des précipitations neigeuses avec la classification des types de circulation de Hess et Brezowsky, il est observé que six sous-classes sont responsables de la majorité des chutes de neige : BM (dorsale anticyclonique sur l'Europe centrale), WS (circulation de sud-ouest anticyclonique), SWZ (circulation de sud-ouest cyclonique), TRM (talweg dépressionnaire sur l'Europe centrale), WZ (circulation cyclonique d'ouest) et TRW (talweg dépressionnaire sur l'Europe occidentale). La TRW se montre la plus significative pour les précipitations solides intenses (SP2 et SP3).

Cependant, ces résultats montrent également que cette classification de grande échelle n'est pas suffisamment discriminante pour établir un ou plusieurs types de circulation spécifiques aux chutes de neige du territoire d'étude et englobe des circulations qui, d'un point de vue synoptique, ne devraient pas produire de précipitations solides. En effet, cette classification est imprécise dans la description des différentes circulations pour le sud-est de la France (zone d'étude), car elle se concentre davantage sur l'Europe centrale. Elle semble également peu adaptée à la variable d'étude, qui nécessite davantage de variables atmosphériques en données d'entrée pour être correctement modélisée. Il serait donc pertinent de développer une autre

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

méthode de classification de la circulation atmosphérique, afin d'obtenir une analyse des tendances d'évolution plus précise.

2.5.2 Contexte et objectifs de l'article.

La classification de Hess et Brezowsky a été initialement développée par Peter Hess et Helmuth Brezowsky dans les années 1950, avec une première publication en 1951 sous le nom de "Grosswetterlagen". Depuis, cette classification a été régulièrement mise à jour et affinée pour s'adapter aux nouvelles données météorologiques et aux changements climatiques observés, notamment par le Deutscher Wetterdienst (service météorologique allemand). Elle reste une méthode largement utilisée pour analyser les schémas de circulation atmosphérique en Europe et au-delà.

La classification de Hess et Brezowsky permet de catégoriser les circulations atmosphériques à grande échelle, en se basant sur l'observation des schémas de circulation générale dans l'atmosphère et sur des paramètres tels que la pression atmosphérique au sol et en altitude dans la région Euro-Atlantique (Gerstengarbe et Werner, 2010). Développée dans le contexte de la météorologie synoptique et de la climatologie, elle visait à mieux comprendre les grands systèmes météorologiques influençant le temps sur de vastes régions géographiques et à différentes échelles de temps. Elle a été largement utilisée pour étudier les schémas de circulation atmosphérique dans divers contextes, notamment pour comprendre les variations climatiques régionales et prévoir le temps à long terme. Bien qu'elle ait été conçue il y a plusieurs décennies, la classification de Hess et Brezowsky reste pertinente et utilisée dans la recherche scientifique contemporaine pour étudier les relations entre la circulation atmosphérique et divers phénomènes météorologiques.

Ainsi, l'objectif principal de cet article est d'explorer les interactions neige-climat en utilisant une approche combinée des types de circulation atmosphérique produits par la classification de Hess et Brezowsky et les données d'observation des précipitations solides du réseau de mesure. L'article cherche à évaluer l'applicabilité de la classification, initialement conçue pour l'Allemagne et l'Europe centrale, dans le contexte spécifique du sud de la France et pour une variable météorologique telle que les précipitations.

De plus, l'article analyse l'évolution temporelle de la fréquence des chutes de neige dans les Alpes-Maritimes sur une période de 1985 à 2019 pour DJFMA, mettant en lumière les tendances et les variations saisonnières. Enfin, en examinant les relations entre les oscillations atmosphériques à grande échelle (AO - Oscillation Arctique et NAO - Oscillation Nord-Atlantique) et les précipitations neigeuses locales, l'article évalue l'impact des fluctuations climatiques naturelles sur le régime de neige dans la région d'étude.

2.5.3 Discussion et limites de l'article.

L'article se distingue significativement par rapport à d'autres travaux en apportant une analyse détaillée et spécifique des précipitations solides dans le département des Alpes-Maritimes. Contrairement à des études précédentes qui se concentrent généralement sur des régions plus vastes ou différentes, il met en lumière les particularités climatiques d'une zone géographique spécifique et relativement peu étudiée sous cet angle. L'application de la classification

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

de Hess et Brezowsky permet une comparaison directe avec d'autres recherches utilisant la même méthode dans différentes régions.

De plus, l'article se démarque par son analyse des tendances à long terme (1985-2019) et des variations mensuelles des chutes de neige, offrant une perspective temporelle fine. L'intégration à l'analyse des oscillations AO et NAO apporte une dimension supplémentaire en examinant comment elles influencent spécifiquement les précipitations neigeuses dans la zone d'étude, enrichissant ainsi le corpus existant de recherches climatiques.

Cependant, les travaux présentent certaines limites. La spécificité géographique peut restreindre la généralisation des résultats à d'autres régions montagneuses. De plus, la classification de Hess et Brezowsky semble présenter des limites de validité pour la région d'étude. Développée initialement pour décrire les types de circulations atmosphériques en Allemagne et en Europe centrale, son adaptation au sud de la France soulève des questions quant à sa capacité à capturer pleinement les circulations synoptiques influençant les chutes de neige dans cette zone. Les résultats suggèrent que cette classification n'est peut-être pas suffisamment discriminante pour la zone de recherche, ce qui souligne la nécessité d'une approche plus fine ou de modifications pour mieux saisir les mécanismes météorologiques locaux.

2.5.4 Positionnement de l'article dans la thèse.

L'article occupe une place centrale dans la thèse en explorant divers aspects liés à l'étude des chutes de neige dans la région des Alpes-Maritimes. Tout d'abord, il utilise le réseau de mesure définitif pour collecter des données précises, constituant ainsi une étape essentielle pour une analyse approfondie. Une attention particulière est portée à la qualité des données grâce à un processus de contrôle rigoureux, garantissant la fiabilité des résultats. Le travail se distingue également par la classification des précipitations solides en plusieurs classes d'intensité, offrant une compréhension plus nuancée des modèles de chutes de neige et des mécanismes physiques impliqués dans leur production.

De plus, l'étude de l'évolution des précipitations neigeuses sur une période étendue de cinq mois (DJFMA) de 1985 à 2019 représente une contribution significative par rapport à l'article précédent, qui s'était concentré sur une période plus courte, de trois mois au total (JFM). L'article explore également la variabilité naturelle du climat en examinant les oscillations NAO et AO, élargissant ainsi la portée de l'analyse pour inclure des facteurs climatiques à grande échelle.

Enfin, il discute de la difficulté d'établir une correspondance précise entre les chutes de neige et la classification de Hess et Brezowsky, soulignant l'importance de développer une classification spécifique à la variable et à la région d'étude pour une compréhension approfondie des phénomènes météorologiques locaux. En d'autres termes, il écarte l'idée d'utiliser une classification déjà établie, mettant en avant la nécessité d'une approche sur mesure. En conclusion à ce deuxième chapitre et pour permettre une appréciation complète du travail, l'article « Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification : Case in the French department of the Alpes-Maritimes » est présenté ici dans son intégralité.



Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification: case in the French department of the Alpes-Maritimes

Guillaume Guerin¹ · Nicolas Martin¹

Received: 9 November 2022 / Accepted: 26 March 2023 / Published online: 3 April 2023
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2023

Abstract : The study combined the observations of the 24-h solid precipitation (SP) measured by 5 weather stations located in the French department of the Alpes-Maritimes and the daily atmospheric circulation types (ACT), based on the classification of Hess and Brezowsky, and made available by the German Meteorological Service. The results show that the seasonal frequency (1985–2019 DJFMA) of the 24-h SP followed three trends at the weather station of Isola 2000 (1912 m above sea level) : from 1985 to 1999, they decreased significantly ; from 2000 to 2015, they increased ; since 2016, a decline seems to be in progress. The variations between the negative and positive phases of the North Atlantic Oscillation (NAO) index would partly explain the modifications in the occurrences of the SP. Moreover, it is noted a reduction in the number of the SP for the months of December, January, and April (significantly validated by the Mann–Kendall test only for April). This situation is quite worrying because it could show the impact of rising temperatures even at 1912 m above sea level, bringing more precipitation in liquid form at the beginning and end of the season. The south atmospheric circulations (SC) are those that produce the greatest number of SP for the period 1997–2019, and they generate a majority of the extreme events. Thus, the talweg on western Europe (TRW) is the subclass of ACTs that causes the largest number of events. However, behind these results, it is also noted that the classification of Hess and Brezowsky is not sufficiently discriminating to establish one or more types of circulations very specific to the SP ; to go further, it will be necessary to compute a synoptic classification composed of correlated variables with SP.

Keywords : Climate change ; Solid precipitation ; Hess and Brezowsky classification ; Atmospheric circulation ; Alpes-Maritimes.

Abbreviations : ACT : Atmospheric circulation type ; AO : Arctic Oscillation ; EAWR : East Atlantic/Western Russia ; E : East ; HCA : Hierarchical clustering analysis ; NAO : North Atlantic Oscillation ; N : North ; NE : Northeast ; NW : Northwest ; PCA : Principal component analysis ; SAC : South atmospheric circulation ; SP : Solid precipitation ; S : South ; SE : Southeast ; SW : Southwest ; UTC : Universal Time Coordinated ; W : West ; WSN : Weather Station Network ; X : Latitude ; Y : Longitude ; Z : Altitude. **Units :** °C : Degrees Celsius ; g/kg : Gram per kilogram ; hPa : Hectopascal ; m : Meters ; % : Percent.

Introduction.

The French department of the Alpes-Maritimes (extreme Southeast of France) has high mountain peaks, allowing it to have some solid precipitation (SP) each season between November and May, constituting a snow cover (Carrega 1982, 1989). It is an economic lung for the inhabitants settled on these mountainous areas, who take advantage of this seasonal resource, through winter tourism and the practice of winter sports (Bonnemains and Clivaz, 2019). Beyond the economic benefits, snow plays an important role in the water resources of the department, both for drinking water and for ecosystems (rivers), by storing water in winter and gently redistributing it in spring and summer (Magnier, 2013).

Southeast (SE) of France, like the entire planet, is experiencing a rapid climate change (6th IPCC report, 2021). The warming of the air temperature at the Alpine chain is well documented from various sources (point series, reanalysis, simulation results on the past, etc.) with different spatial and altitudinal resolutions and covering different periods (Corona et al., 2010 ; Böhm et al., 2010 ; Einhorn et al., 2015). This is reflected in an increase in the rain-snow line (about 300 m since the 1960s), an accelerated melting of the snow cover, and consequently a decrease in the snow depth (Clivaz et al., 2015). Moreover, a recent study, which presents an Alpine-scale analysis (evolution 1971–2019) of snow depth in more than 2000 weather stations in six countries (Austria, France, Germany, Italy, Slovenia, and Switzerland), has demonstrated a decrease in snow depth for most stations from November to May (Matiu et al., 2021).

Beyond the importance of the air temperature for the future of the snow cover, it must be understood that the precipitation (which supplies the snow cover) is a local meteorological event, which is the result of the displacement and enrichment of air masses with water vapor, occurring thousands of kilometers away, over a large geographical area and level of atmospheric pressure (Planchon et al., 2015). In this sense, the SP depends on the general atmospheric circulation, which redistributes at the planetary level, the energy surplus resulting from the intensification of the greenhouse effect (Shepherd 2014 ; Screen et al., 2018). In this way, the atmospheric circulation is described as the engine of past, present, and future weather (Pédela-borde 1956 ; Peña and Schulte 2019). Thus, if global warming impacts the atmospheric circulation, there should be some consequences on precipitation regimes, and by analogy on SP.

Some recent studies have focused on the relationship between the SP and the synoptic condition. Esteban et al. (2005) determined the synoptic situations responsible for heavy SP (at least 30 cm in 24 h) in Andorra in the Pyrenees. The authors used a combination of a principal component analysis (PCA) and a K-means clustering to obtain a synoptic classification of days with heavy SP. Capozzi et al. (2022) carried out similar work in the Italian Apennines (Montevergine Observatory, 1280 m altitude). Finally, Irannezhad et al. (2017) in Finland or even Merino et al. (2014) in Spain showed the synoptic origin in the mechanism of SP formation in their respective study area.

All these works used a subjective classification to determine atmospheric conditions specific to SP. This paper focuses on the interactions of climate and snow via a combined analysis method between the daily atmospheric circulation types (ACT) resulting from the classification of Hess and Brezowsky (1952) and the daily SP observations data of five weather stations located in the Alpes-Maritimes. The objective Grosswetterlagen catalog, adapted from the Hess–Brezowsky classification of circulation patterns is used. This catalog is regularly updated

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

by the Deutscher Wetterdienst (German weather service) and was developed for the weather in Germany and countries in Central Europe. Therefore, the originality of this study is to assess if the Hess and Brezowsky classification can be applied to the South of France, to better understand the large-scale mechanisms at work in the production of SP. Is it possible from the classification of Hess and Brezowsky to establish types of synoptic conditions specific to SP ? This methodology has already been used in the scientific literature to identify spatial variability in climate (Gerstengarbe and Werner, 2005), particularly in France (Planchon et al., 2009 ; Douvinet, 2009 ; David, 2020). At the same time, a study of the historical seasonal frequency of the SP was carried out. What type of evolution followed the SP in the SE of France ?

2 Data and methods.

2.1 Study area and the solid precipitation observations.

The Weather Stations Network (WSN) contains five stations : Isola 2000 ($Y = 44.18$, $X = 7.15$; $Z = 1912$ m), Valberg ($Y = 44.09$, $X = 6.92$; $Z = 1630$ m), Auron ($Y = 44.22$, $X = 6.93$; $Z = 1910$ m), Val Casterino ($Y = 44.09$, $X = 7.50$; $Z = 1554$ m), and Estenc ($Y = 44.23$, $X = 6.75$; $Z = 1850$ m). They are positioned on a NW/SE axis, in the north of the French department of the Alpes-Maritimes and have an altitudinal diversity (cf. Fig. 1). The WSN measures in centimeters the amount of the fresh SP fallen in 24 h ; this data will be named in this paper “24-h SP.” The data comes from the official service of meteorology and climatology in France (Météo-France) and are available online. According to the metadata, the measurements are done once a day at 6 : 00 UTC. The 24-h SP is counted from 6 : 00 UTC Day-D to 6 : 00 UTC Day-D+1. In other words, all the D-Day 24-h SP are measured the next morning at 6 : 00 UTC. The measurements are made manually from a snow table. It is a square wooden board on which is fixed a rod of 30 cm high. It is then a question of inserting a ruler graduated in centimeters to the board, to know the height of the 24-h SP.

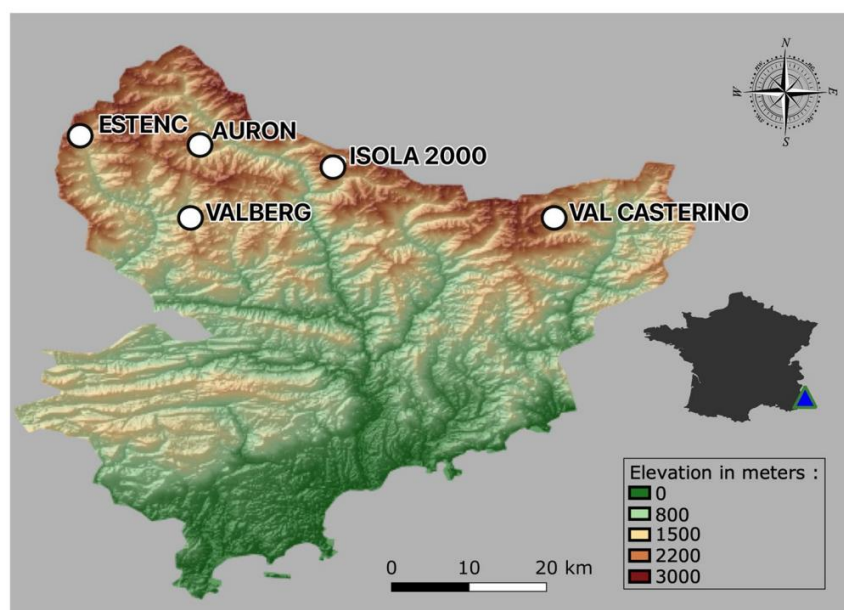


Fig. 1 : Location of the five weather stations of the WSN (DEM provided by the IGN).

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

2.1.1 Data quality control of the 24-h SP.

It is well-known that the consistency and reliability of a time series of observations can be compromised by several errors and artifacts, related to human errors in data collection, inaccuracies in digitization procedures and gaps in the data series (Capozzi et al., 2022). For this reason, it is essential to apply a quality control procedure to identify systematic and non-systematic errors (Ashcroft et al., 2018). However, in the meteorological and climatological fields, there is no unambiguous and universal quality control strategy, since, depending on the type and number of data, different methods can be applied. In the case of this work, the data verification methods use the work of Capozzi et al. (2022) as a reference.

The first control test aims to verify whether in all five series of observations (Estenc, Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino), outliers appear. The 24-h SP of the five stations are sorted in ascending order, and the values above the 95th percentile are slightly studied. If one of these values is abnormally higher in a station, without having a plausible explanation, it is then rejected. In the case of this report, no outlying values were detected.

The second control test aims to verify the homogeneity of the five series of observations to identify an artificial changes or tendencies that could affect the results of the analysis. Specifically, a break in the homogeneity of climate data can be attributed to several factors, including instrumentation error, changes in the environment adjacent to the instrument, and human mishandling (Capozzi et al., 2022). The test of Pettitt (Pettitt 1979) was applied to the five observations series, without any change point in the historical series being revealed. Indeed, all the p values obtained are greater than 0.05, meaning that no breakpoint has been detected. It is then concluded that the observation data are compliant and can be used in subsequent processing operations.

2.1.2 Classification of the 24-h SP.

In order to compare the ACT with the intensity of the 24-h SP, it is necessary to carry out a classification of the observations, to characterize the limits of each type (Martin 2008). The objective of a classification method is to obtain groups with minimized variance between individuals in the same group and maximum variance between different groups (Creusier and Biétry, 2014). One of the most widely used analyses by climatologists remains the combination of a principal component analysis (PCA), which simplifies the information in the dataset, and a hierarchical clustering analyses (HCA), which classifies statistical individuals into different groups (Chiadjeu et al., 2016). In this paper, this combination is used on the 24-h SP.

The common temporal extension of the 24-h SP coming from the WSN extends from 1997 to 2019, or 23 years, composed of a seasonal winter–spring set grouping 5 months : December (D), January (J), February (F), March (M), and April (A). The season of the SP extends from November to April (Matiu et al., 2021), but, due to missing data for November, the study season has been restricted to 5 months (DJFMA). This period (1997–2019 DJFMA) includes 3598 days. However, only days with a 24-h SP measured in all the five stations of the WSN are retained, reducing the period to 243 days. Thus, the first step is to perform a PCA over this matrix which includes 243 rows (days) and 5 columns (stations). Kaiser’s rule (1961) is then applied to keep only the components whose eigenvalues score is greater than 1. Finally,

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

the result of the PCA (coordinates of individuals) is used in the HCA, to distinguish several classes of intensity of 24-h SP.

2.1.3 Large-scale mechanism of the formation of the SP.

In some precedent works (Martin and Carrega 2011 ; Guerin and Martin 2022), the largescale mechanism of formation of the SP for the study area showed that this type of event requires a low geopotential height, allowing the lift of the air mass. The geopotential height 700 hPa values recorded above the WSN station during snow events was between 2900 and 3000 m. The level of specific humidity (considered as the raw material of SP) was between 1.8 to 2.4 g/kg at 700 hPa. Finally, a strong statistical link between the SP and the SW direction of the air masses has been demonstrated. It seems to help the orographic lift, because to the NE-SW orientation axis of the Alps massif in the department.

2.2 The atmospheric circulation classification of Hess and Brezowsky.

2.2.1 General description of the Hess and Brezowsky classification.

The analysis refers to the calendar of the ACT defined by the classification of Hess and Brezowsky. The data was collected from the daily catalog, which is updated monthly and published by the Deutscher Wetterdienst since 1951. The methodology to obtain the daily ACT is based on the analysis of the pressure field on the ground and in altitude, over the Euro-Atlantic area (Gerstengarbe and Werner, 2005). This makes it possible to group days that have a similar atmospheric circulation pattern ; in this study, they are named “ACT” for atmospheric circulation types. The classification identifies five main classes of ACT and 29 subclasses, which will be named “ACTs” (cf. Table 1).

Table 1 : Classification of Hess and Brezowsky into five main ACT classes and 29 ACT subclasses (German meteorological service).		
Main classes ACT	Subclasses ACTs	Abbreviations
West circulations (WC)	West anticyclonic circulation	WA
	West cyclonic circulation	WZ
	West southern circulation	WS
	West circulation « forming an angle »	WW
South circulations (SC)	Southwest anticyclonic circulation	SWA
	Southwest cyclonic circulation	SWZ
	Southern anticyclonic circulation	SA
	Southern cyclonic circulation	SZ
	Depression over the British Isles	TB
	Talweg on western Europe	TRW
	Southeast anticyclonic circulation	SEA
	Southeast cyclonic circulation	SEZ
Northwest and North circulations (NWNC)	Northwest anticyclonic circulation	NWA
	Northwest cyclonic circulation	NWZ
	North anticyclonic circulation	NA
	North anticyclonic	NZ

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

	Anticyclone on Iceland anticyclonic	HNA
	Anticyclone on Iceland cyclonic	HNZ
	Anticyclone over the British Isles	HB
	Talweg on central Europe	TRM
Northeast and easterly circulations (NEEC)	Northeast anticyclonic circulation	NEA
	Northeast cyclonic circulation	NEZ
	Anticyclone on the Fennoscandia anticyclonic	HFA
	Anticyclone on the Fennoscandia anticyclonic	HFZ
	Anticyclone on the Norwegian sea-Fennoscandia anticyclone	HNFA
	Anticyclone on the Norwegian sea-Fennoscandia cyclone	HNFZ
Centers action on central Europe (CAC)	Anticyclone on central Europe	HM
	Anticyclonic ridge over middle Europe	BM
	Depression over central Europe	TM

The frequency 1997–2019 (DJFMA) of each ACT is presented in Table 2. The NNWC are the most frequent (29.4%), followed closely by the WC (26.3%). In the third and fourth places are the SC (18.5%) and the CAC (17.9%). Finally, in the last position appears the NEEC (7.3%).

Table 2 : Frequencies of appearance of the ACT for DJFMA between 1997 and 2019 (Deutscher Wetterdienst).		
ACTs	Number of days	Percentage
Northwest and north circulations (NNWC)	1067	29.4
West circulations (WC)	954	26.3
South circulations (SC)	670	18.5
Center action on central Europe (CAC)	649	17.9
Northeast and east circulations (NEEC)	266	7.3
Undefined	24	0.7

2.2.2 Mean configurations of the ACT subclasses.

This section presents some of the ACTs, through maps of mean configurations (1997–2019 DJFMA) for three atmospheric variables : geopotential height 700 hPa, air temperature 850 hPa, and specific humidity 700 hPa. The choice was made to use these three variables to describe the ACTs, since previous work (Guerin and Martin, 2022) has shown their statistical relation with SP. These figures are computed with the ERA5 reanalyses, made available by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Reanalysis is at the interface between observation and modeling, due to the integration of many measured data, the reanalysis seems closer to the observed climatology than to the climatology of the model. Exploitable from 1950 to 2022, the ERA5 reanalysis has a horizontal resolution of 25 km and an hourly temporal time step (Hersbach et al., 2020).

In the case of the west circulations (WC), according to the values, it seems unlikely that WA can lead to the formation of SP. Indeed, it has high geopotential height values, around 3100 m (cf. Fig. 2). The flow is still oriented W but comes more from the south (Spain and Maghreb). The WSN is in this case, inside the subsidence of the Azores anticyclone. The air is

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

therefore dry (1.2 g/kg) (cf. Fig. 4) and warm (more than 4 °C) (cf. Fig. 3). The other classes of WC could cause in some cases some SP, but given the low specific humidity, the SP would be not very intense, except for WS, which gets 2.1 g/kg (cf. Fig. 4), although in this case the fast westerly flow does not really allow snowy weather to set in.

As it concerns the south circulations (SC), some of them are very interesting, since they meet many criteria that can lead to SP. Actually, the South origin of the air masses allows them to enrich themselves with water vapor when passing over the Mediterranean, and for the ACTs with SW flow direction, their orographic lift is facilitated in relation to the axis of the Alps. Moreover, the specific humidity is then relatively high and could possibly lead to intense SP. Thus, according to these elements, three SC would be particularly favorable to the SP : TRW, SZ, and TB (cf. Figs. 2, 3 and 4). Conversely, SWA, SWZ, and SA have some geopotential height values too high to let a snowy weather occur (cf. Fig. 2).

The northwest and north circulations (NWNC) generally have low specific humidity levels that do not allow an intense production of SP. The air temperature is quite low, since the air comes from the northern latitudes. On the other hand, due to their low geopotential height and temperature characteristics, TRM and HNZ could generate low-intensity 24-h SP (cf. Figs. 2 and 3). Conversely, NWA seems unfavorable to this type of weather event, since it shows a high geopotential height (3100 m) and a warm air temperature (4 °C) (cf. Figs. 2 and 3).

As it concerns northeast and easterly circulations (NEEC), most of them have low specific humidity levels, and the air temperature is cold for all subclasses. Also, the NE or E direction of the flow is not optimal for the occurrence of an SP on all the stations in the WSN. All these reasons suggest that these ACTs have configurations that are not favorable to the SP.

Finally, for the centers' action on central Europe (CAC), HM has a high geopotential height (3050 m to 3100 m) and a SW flow (cf. Table 3 ; cf. Fig. 2). This class shows the presence of an anticyclone centered on France, and the characteristics of HM do not seem to imply the production of an SP. The BM has geopotential height values between 3000 to 3050 m and a NW flow (cf. Fig. 2). It has an anticyclonic ridge that encompasses France and all of Eastern Europe. It seems improbable that it caused snowy weather. The TM has a geopotential height value close to 2900 m and a NE flow (cf. Fig. 2). The air temperature is cold, between 0 and -2 °C, and the specific humidity is about 1.5 g/kg (cf. Figs. 3 and 4). This class could lead to some SP, with a low level of intensity, because the flux orientation and the low specific humidity are not optimal to SP.

Ultimately, according to the knowledge on the SP formation mechanism, the maps, and the values obtained by the average configurations, some of the SC show favorable characteristics to produce this type of meteorological event. Table 3 summarize the mean values (1997–2019 DJFMA) per ACTs, for the three variables above the WSN.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

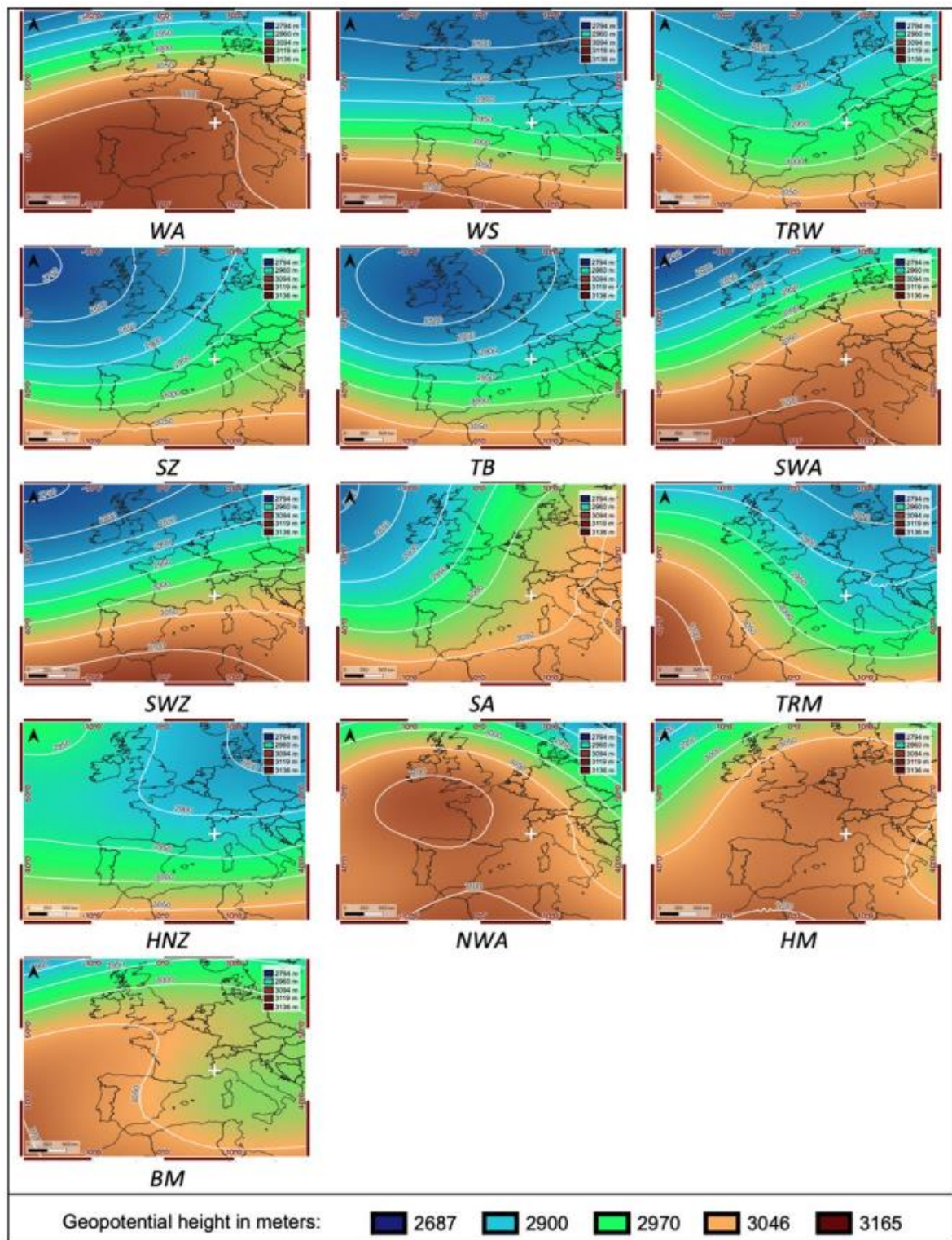
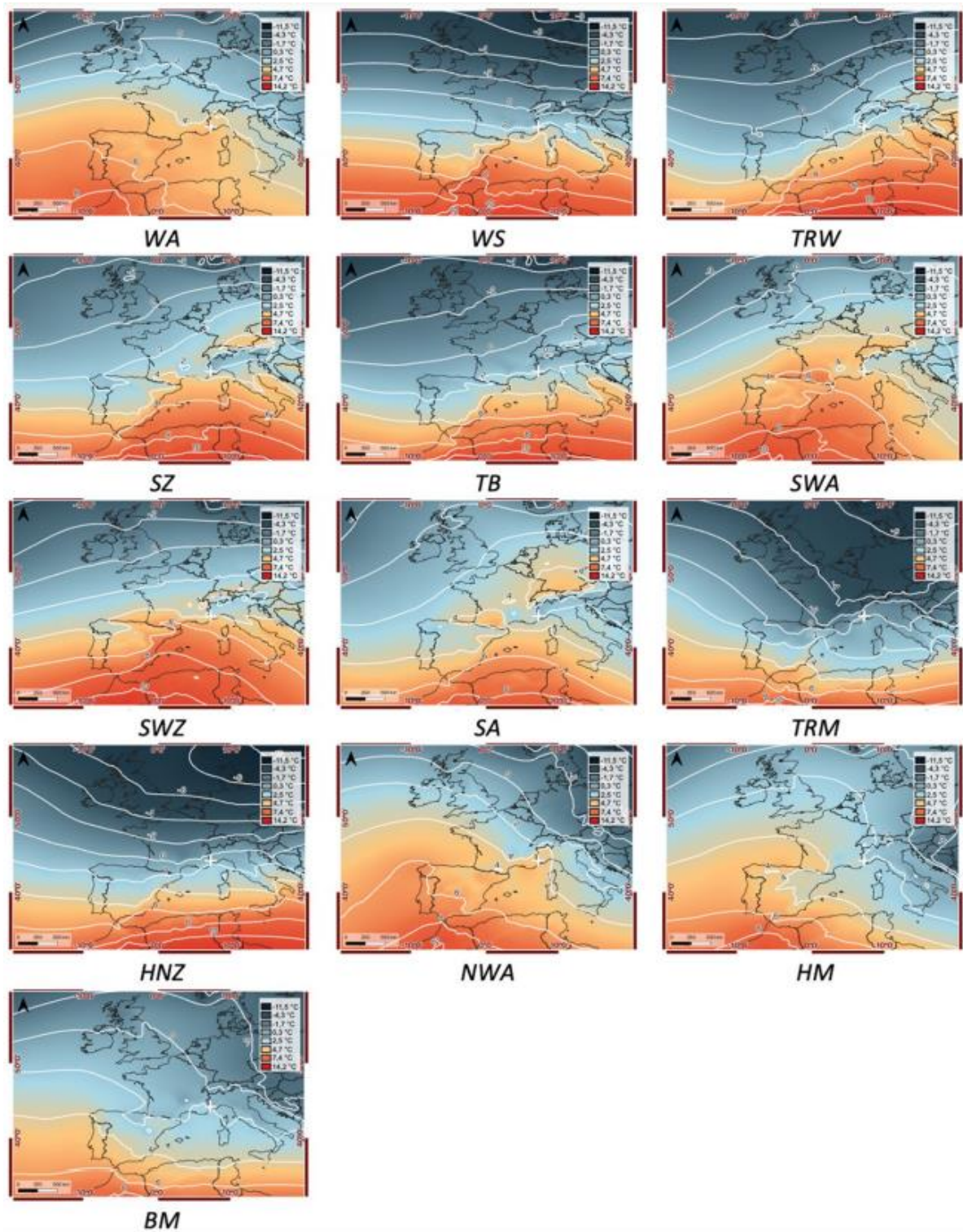


Fig. 2 : Mean configurations (1997–2019 DJFMA) of the geopotential height 700 hPa for the ACTs coming from the Hess and Brezowsky classification (Deutscher Wetterdienst, ERA5-ECMWF). The white cross corresponds to the location of the WSN.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.



Temperature in °C: -11.5 -1.7 2.5 4.7 7.3 14.2

Fig. 3 : Mean configurations (1997–2019 DJFMA) of the air temperature 850 hPa for the ACTs coming from the Hess and Brezowsky classification (Deutscher Wetterdienst, ERA5-ECMWF). The white cross corresponds to the location of the WSN.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

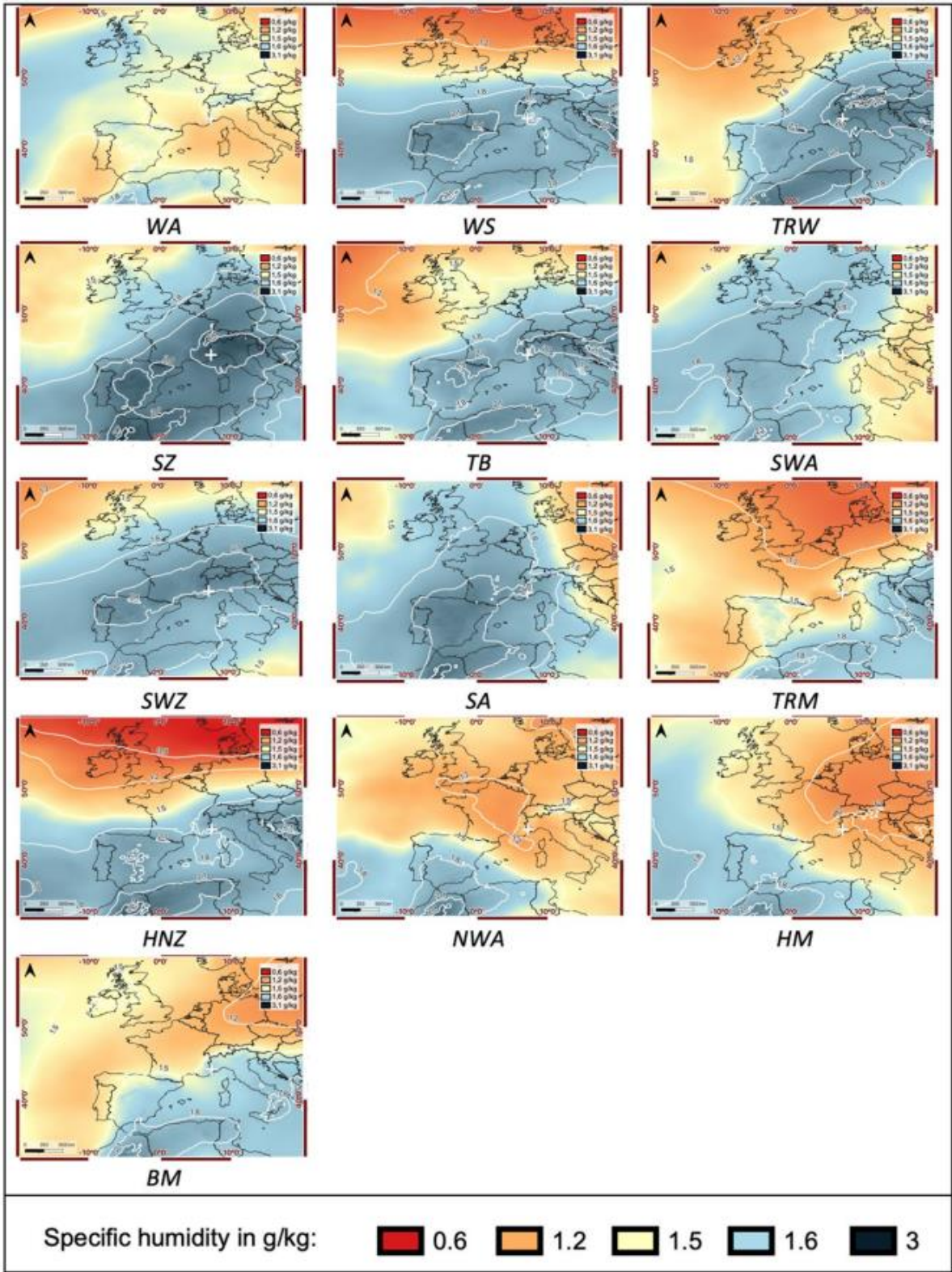


Fig. 4 : Mean configurations (1997–2019 DJFMA) of the specific humidity 799 hPa for the ACTs coming from the Hess and Brezowsky classification (Deutscher Wetterdienst, ERA5-ECMWF). The white cross corresponds to the location of the WSN.

Table 3 : Atmospheric variable values on the WSN for the 29 ACTs (ERA5, ECMWF).

ACTs	Geopotential height 700 hPa	Wind direction 700 hPa	Air temperature 850 hPa	Specific humidity 700 hPa
WS	2950 m	W	2 °C	2.1 g/kg
WZ	3000 m	NW	4 °C	1.5 g/kg
WA	3100 m	SW	4 °C	1.2 g/kg
WW	3000 m	NW	2 °C	1.8 g/kg
SWA	3050–3100 m	SW	4 °C	1.5 g/kg
SWZ	3050–3100 m	SW	4 °C	2.1 g/kg
SA	3050–3100 m	SW	2 °C	2.1 g/kg
SZ	2950–3000 m	SW	2 °C	2.4 g/kg
TB	2900–2950 m	SW	2 °C	2.1–2.4 g/kg
TRW	2950 m	SW	2 °C	2.1–2.4 g/kg
SEA	3000 m	SE	0 °C	1.8–2.1 g/kg
SEZ	2950 m	SE	2 °C	2.1 g/kg
NWA	3100 m	NW	4 °C	1.2 g/kg
NWZ	3000 m	NW	2 °C	1.2 g/kg
NA	3000 m	N	2 °C	1.2–1.5 g/kg
NZ	2950 m	NW	0 to –2 °C	1.2 g/kg
HNA	2950 m	NW	2 °C	1.8 g/kg
HNZ	2900–2950 m	NW	0 to –2 °C	1.8 g/kg
HB	3000–3050 m	N	2 °C	1.2 g/kg
TRM	2900–2950 m	NW	0 °C	1.5 g/kg
NEA	2950–3000 m	NE	0 °C	1.2–1.5 g/kg
NEZ	2900–2950 m	NE	0 °C	1.8 g/kg
HFA	3000 m	NE	0 °C	1.8 g/kg
HFZ	2950 m	NE	0 °C	1.8 g/kg
HNFA	3000 m	NE	0 °C	1.8–2.1 g/kg
HNFZ	2950 m	NE	0 °C	1.8 g/kg
HM	3050–3100 m	SW	2 °C	1.2–1.5 g/kg
BM	3000–3050 m	NW	2 °C	1.5–1.8 g/kg
TM	2900 m	NE	0 to –2 °C	1.5 g/kg

2.3 NAO and AO indices time variability.

In the interpretation of the results, it is essential to consider the natural and recurrent patterns of atmospheric circulation variability. There are two main natural oscillations, which impact the climate of the mid-latitudes of the northern hemisphere : the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Arctic Oscillation (AO).

2.3.1 North Atlantic Oscillation.

This subsection is based on the work of Hurrell et al. (2003), to give a description of NAO. The NAO is a natural climate variation that has significant impacts on the climate of the west of Europe, surrounding northern Africa and eastern North America. It has much greater effects in winter than in summer and partly determines the positioning and trajectory of low-pressure systems in the Northern Hemisphere. The variation of this phenomenon depends on the atmospheric pressure.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

There are two phases : NAO + and NAO -. The NAO + is linked to a large pressure difference between the Iceland depression and the Azores anticyclone. Then a strong westerly wind blows towards the east, bringing the mildness of the Atlantic Ocean to Central and Southern Europe, and the rain to Northern Europe. Temperatures are generally mild in winter due to the influx of ocean air, and arctic or Siberian air masses are pushed further north. The Mediterranean basin is drier than normal and the jet stream is more located towards the north, just like the trajectories of the depressions, which seem more intense in positive phase.

A NAO - is linked to a weak pressure difference between the Iceland depression and the Azores anticyclone. The pressure field is therefore more relaxed over the Atlantic. As the westerly wind is calm, the Siberian anticyclone brings cold and dry air over Europe. The disturbances are engulfing further south, bringing rains to the Mediterranean regions. During NAO -, the jet stream is more southerly than during NAO +, which is why North Africa is wetter than normal.

This oscillation can be quantified by an index (between - 5 and + 5), calculated by the difference in pressure between a meteorological station near the Azores anticyclone (Lisbon or Ponta or Delgada or Gibraltar, etc.) and a station near the Iceland depression (Reykjavik or Stykkisholmur or Akureyri, etc.), according to the formula of Rogers (1984). In this paper, the index (cf. Fig. 5) is calculated for each season (1951–2020 DJFMA) with the data provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). The alternation between NAO + (blue bar) and NAO - (red bar) is very irregular from season to season ; however, we notice two trends, between 1951 and 1980 ; the NAO - was dominant (20 NAO - against 10 NAO +) ; from 1981 to 2020, the NAO + phase was dominant (33 NAO + against 7 NAO -), with a period of 9 consecutive years (1986–1995) during which the index remained positive and exceptionally high.

2.3.2 Arctic Oscillation.

This subsection is based on the work of Thompson and Wallace (1998). The AO is a climatic variation, which has almost the same characteristics as the NAO. However, the action of the AO is more widespread, since it has an influence over the entire northern hemisphere (the pressures in the North Pacific are considered). There are also two phases : AO + and AO -.

When the AO is in the positive phase (AO +) the atmospheric pressure is lower than normal at the North Pole and higher than normal at mid-latitude (approximately 45° North). The jet stream is very dynamic and hardly deforms. This causes a strong westerly wind. As for the NAO, in winter, the temperatures are milder in Europe, and the weather is drier in the Mediterranean.

When the AO is in negative phase (AO -), there are high pressures over the polar region and low pressures at mid-latitudes (approximately 45° North). The jet stream is slower, it therefore undulates, and the zonal winds are weakened. The higher atmospheric pressure at the North Pole decreases the strength of the westerly wind. In winter, temperatures are therefore lower than normal in Europe, and the weather is more humid in the Mediterranean basin.

The AO is quantified by an index (between - 5 and + 5), calculated in relation to the pressure between the North Pole and the pressure of the middle latitudes (approximately 45°). Thus, when the pressure is lower than normal over the Arctic, the index is positive, and when

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

it is higher than normal, the index is negative. As for the NAO, the AO index (cf. Fig. 6) is calculated from the data provided by the NOAA and for the DJFMA season 1951–2020. The alternation between AO + and AO – is very irregular from season to season. However, it is noticed that between 1951 and 1987, the AO – regime was dominant (29 AO – against 8 AO +), and from 1981 to 2020, the AO + phase was dominant (19 AO + against 13 NAO –).

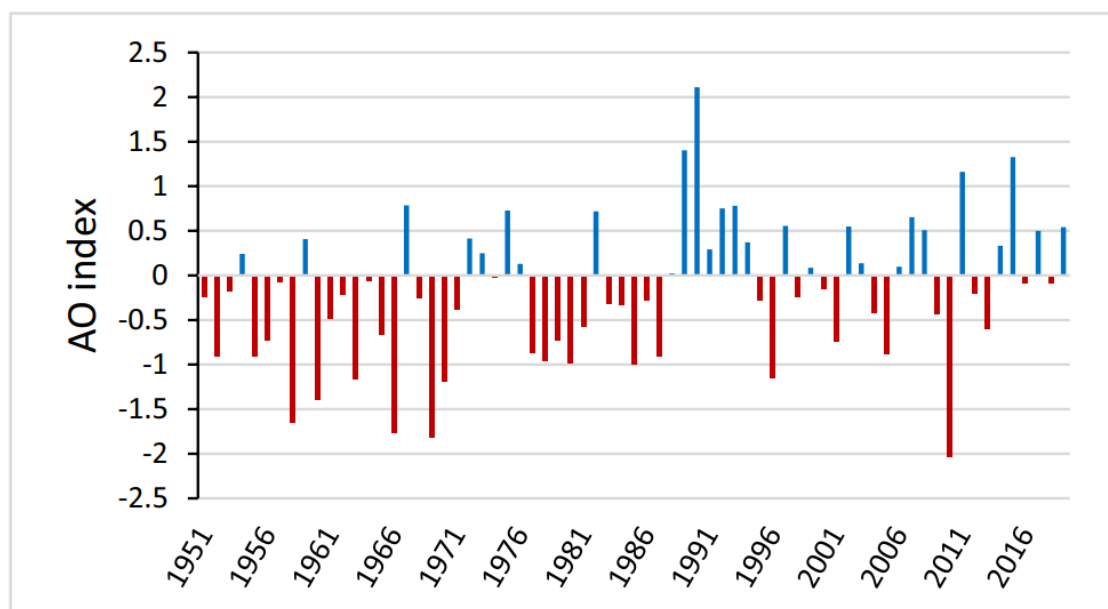


Fig. 6 : AO index 1951–2020 (NOAA, 2022). The seasonal mean AO index is constructed by averaging the monthly NAO index for December, January, February, March, and April.

3 Results.

3.1 Evolution of the occurrence of the solid precipitation.

3.1.1 Choice of the study station and temporal extension.

A trend line to be meaningful must have the longest time extension. In the case of the WSN (consisting of five weather stations), the maximum common temporal extension for the 24-h SP would only be 23 years (1997–2019). Thus, to extend this period, the choice was made to study only the evolution of the occurrence of the 24-h SP for Isola 2000, which has the oldest series (available from 1972) of usable data from the WSN. On the other hand, they are marked by missing values from 1972 to 1984, but, since 1985, the percentage of missing data are extremely low (below 3 %), except for the years 2020, 2021, and 2022 marked by the COVID epidemic, during which the readings were stopped (cf. Table 4). It is for all these reasons that the study of the frequency of solid precipitation is carried out from 1985 to 2019. A total of 5 months (DJFMA) is retained ; in fact, the month of November has been deleted, given the few measurement readings carried out.

Table 4 : Percentage of missing values per season (DJFMA) for the 24-h data coming from the Isola 2000 weather station (Météo-France).

Year	Missing values %	Year	Missing values %	Year	Missing values %	Year	Missing values %
1972	14	1985	0	1998	0	2011	1
1973	19	1986	0	1999	0	2012	0
1974	30	1987	0	2000	0	2013	3
1975	20	1988	0	2001	0	2014	0
1976	30	1989	1	2002	0	2015	0
1977	16	1990	0	2003	0	2016	0
1978	23	1991	1	2004	0	2017	0
1979	11	1992	0	2005	0	2018	0
1980	12	1993	0	2006	0	2019	0
1981	29	1994	0	2007	0	2020	39
1982	41	1995	0	2008	0	2021	38
1983	14	1996	0	2009	0	2022	20
1984	43	1997	0	2010	0		

3.1.2 Evolution of the occurrence of the 24-h SP at the Isola 2000 weather station.

The results presented below (cf. Fig. 7) relate the evolution of the 24-h SP at the Isola 2000 weather station. As mentioned previously, the data comes from the official service of meteorology and climatology in France (Météo-France). The black curve corresponds to the total number of 24-h SP per season (DJFMA). It is possible to observe three trends : from 1985 to 1999, the 24-h SP decreased significantly, going from 40 SP per year to 20 SP ; from 2000 to 2015, they gradually returned to the previous level (40 SP per year) ; since 2016, a decline seems to be in progress, until reaching less than 30 SP for 2019.

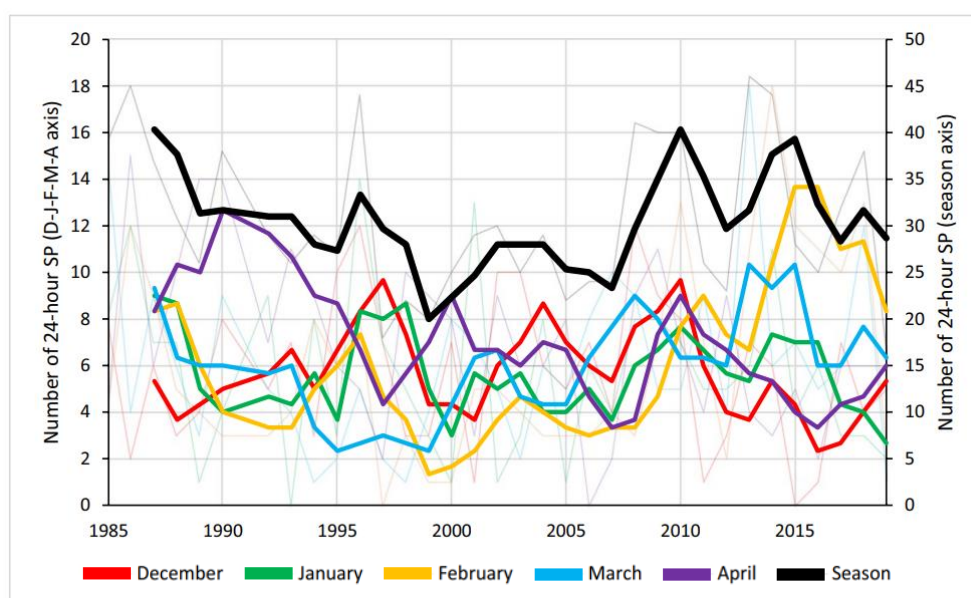


Fig. 7 : Evolution of the occurrence (1985–2019) of the 24-h SP at the Isola 2000 weather station (MétéoFrance). The left axis corresponds to the number of SP for December, January, February, March, and April, while the right axis corresponds to the total number of SP for all the months of the season.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Table 5 confirms the trends noted above. The number of 24-h SP per 5-year period gradually declines from 1985–1989 (178 SP) to 1999–1994 (131 SP). They increase from 2000–2004 (138 SP) to 2010–2014 (179 SP), before decreasing between 2015 and 2019 (139 SP). Finally, when the standard deviation from the mean (1985–2019) is calculated, it is noted that over the 35 years, only the periods 1985–1989 and 2010–2014 are positives with respectively + 22 and + 23 SP. The other periods are negatives.

Table 5 : Five-year evolution of the occurrence (1985–2019 DJFMA) of the number of the 24-h SP for all the months of the season at the Isola 2000 station (Météo-France).

	Five-year period						
	1985–1989	1990–1994	1995–1999	2000–2004	2005–2009	2010–2014	2015–2019
Number of 24-h SP (all months)	178	152	131	138	151	179	139
Deviation from the average (mean 1985–2019)	22	– 4	– 25	– 18	– 5	23	– 17

3.1.3 Evolution of the occurrence of the 24-h SP at the Isola 2000 per months.

Figure 8 shows the evolution (1985–2019) of the occurrence per months of the 24-h SP at the Isola 2000 weather station. The red line corresponds to the linear trend of the series, and the Mann–Kendall (MK) test is applied to each series, by calculating the score and the associated p value. The MK's test (Mann 1945 ; Kendall 1975 ; Gilbert 1987) is used here to determine with a nonparametric test, whether a trend is identifiable in the month series.

The number of the 24-h for December, January, and April seems to decrease, as shown with the trendlines. On another side, for February and March, the 24-h SP rather shows an upward trend. These results reflect a seasonal shortening of the occurrence of the 24-h SP and a reinforcement of falls in the middle of the season in the weather station of Isola 2000. However, when the MK's test is applied, only the downward trend in April is confirmed. The test statistic is $- 0.248$, and the corresponding two-sided p value is 0.043 . This p value is less than 0.05 ; it is possible to conclude with confidence that a trend is present in the data.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

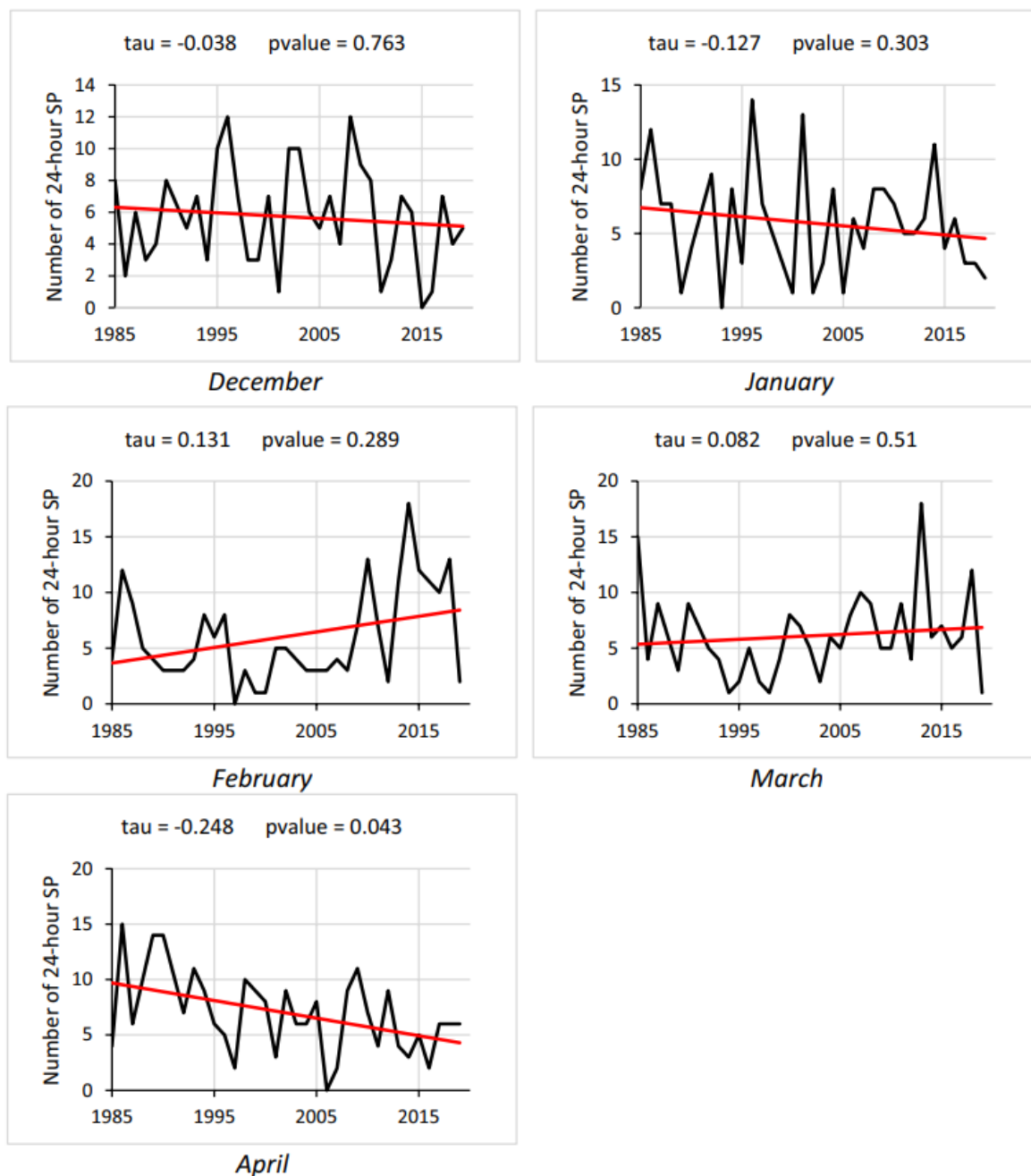


Fig. 8 : Evolution (1985–2019) of the occurrence per months of the 24-h SP at the Isola 2000 weather station (Météo-France).

3.2 Result of the classification of the solid precipitation.

As mentioned earlier, a combination of a PCA and an HCA is conducted over the 243 days when a 24-h SP is present in the five stations of the WSN, to obtain a classification of the observations of the 5 weather stations. The first four dimensions of the PCA were retained ; they express 98% of the total inertia (cf. Fig. 9). The results of the PCA (the first four dimensions) are used to make an HCA, which shows three homogeneous and significant classes of SP, as illustrated in Fig. 10.

In Table 6, it is possible to know the mean of the amount of SP fell in 24 h for each class. Class 1 (SP1) is composed of SP sharing low values for all stations, with a mean of 2.3 cm

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

which fell in 24 h. Class 2 (SP2) has a mean value around 16.9 cm, and class 3 (SP3) corresponds to high values, with 38 cm. Finally, the frequency (1997–2019 DJFMA) of the classes of SP is shown in Table 7 ; SP1 get the highest occurrence with 53% (129 days), followed by SP2 with 33% (79 days) and SP3 with 14% (35 days).

In the next part, this discretization into three types of SP will be crossed with the Hess and Brezowsky classification, to know the role of each synoptic configuration.

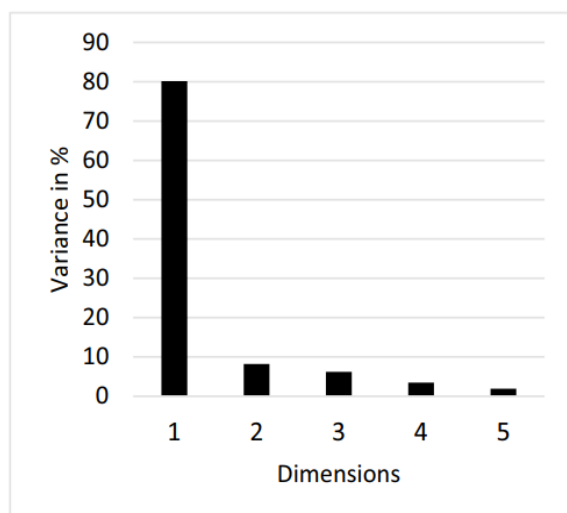


Fig. 9 : Decomposition of the total inertia of the PCA.

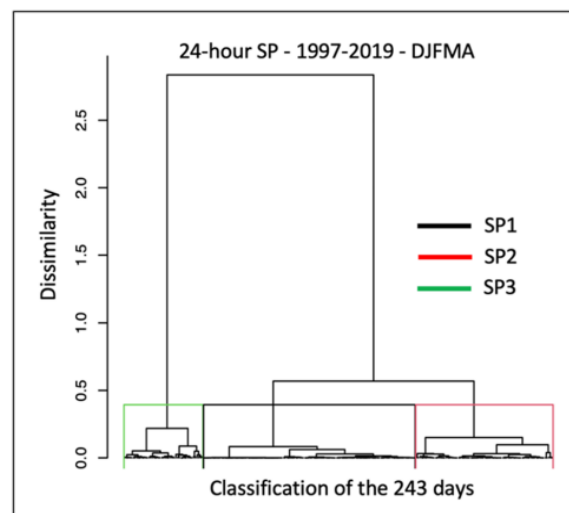


Fig. 10 : Tree of the classification (HCA) of the SP. This HCA classifies the 243 days with a SP in the five stations of the WSN.

Table 6 : Mean amount of SP in cm per classes.							Table 7 : Frequencies 1997–2019 of the appearance of the classes of SP (Météo-France).			
Classes	Val Casterino	Isola 2000	Valberg	Estenc	Auron	Mean	Classes	Number of days	Percentage	Mean amount fell
SP1	2.2	3.2	1.6	2.7	2.1	2.3	SP1	129	53%	2.3 cm
SP2	14.6	16.6	15.6	19.8	17.8	16.9	SP2	79	33%	16.9 cm
SP3	38.1	37	34.4	39.3	41.3	38	SP3	35	14%	38 cm

3.3 The Hess and Brezowsky and the solid precipitation classifications.

Within this part, the SP classification will be statistically crossed with the ACT, with the aim of identifying synoptic configurations favorable to the SP.

3.3.1 Combination between the main ACT and the three classes of SP.

Figure 11 corresponds to the number of 24-h SP associated with each ACT. The period (1997–2019) and the season (DJFMA) are common to both datasets ; it is therefore a question of crossing the days common to the two classifications. Thereby, the NEEC is at the origin of 26 SP, including 2 SP3 and 7 SP2. The CAC caused 23 SP, including 1 SP3 and 9 SP2. The WC has trained 47 SP, including 4 SP3 class and 21 SP2. The NWNC is behind 50 SP, including 14 SP2 and 4 SP3. Finally, SC elicited 95 SP, including 23 SP3 and 28 SP2. Thus, it is found that SC is the ACT that produces the most SP on the WSN with 95 SP recorded out of 243 in

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

total, or 40%. In addition, as shown in Fig. 12, it causes a significant portion of SP2 (35%) but especially SP3 (68%).

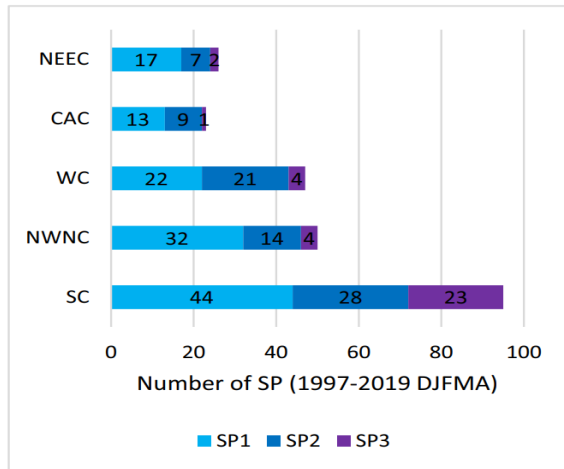


Fig. 11 : Occurrence between the classes of SP and the ACT (Météo-France ; Deutscher Wetterdienst).

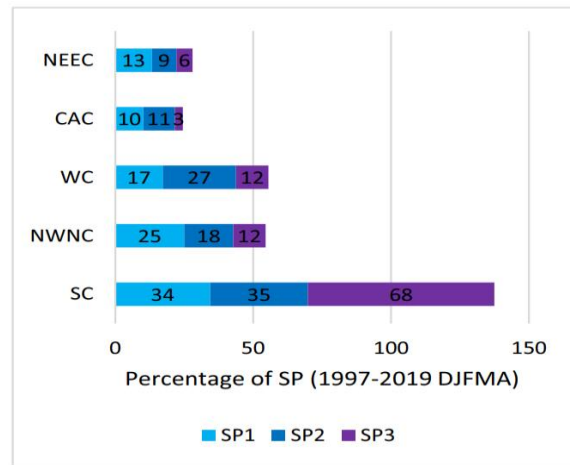


Fig. 12 : Percentage between the classes of SP and the ACT (Météo-France ; Deutscher Wetterdienst).

3.3.2 Combination between the subclasses of ACTs and the classes of SP.

Figure 13 shows the combination between the classes of SP and the 29 subclasses of ACTs. It is noted that 6 ACTs have a total of more than 15 SP over the period 1997–2019 : BM (9 SP1, 6 SP2, and 1 SP3) ; WS (8 SP1, 7 SP2, 2 SP3) ; SWZ (12 SP1, 7 SP2) ; TRM (15 SP1, 2 SP2, 3 SP3) ; WZ (13 SP1, 7 SP2, 2 SP3) ; and TRW (7 SP1, 6 SP2, 10 SP3). Thus, TRW is the ACTs that causes the largest amounts of snow on the WSN, but through these results, it is also noted that the classification of Hess and Brezowsky is not sufficiently discriminating to establish one or more types of circulations very specific to the SP, since 26 ATCs (out of a total of 29) produced at least one 24-h SP. Also, it is noted that some ACTs with atmospheric characteristics contrary to the occurrence of an episode of SP still register it. For example, the WA has very high geopotential (3100 m) and temperature (4 °C) values, as well as very low specific humidity levels (below 1.5 g/kg) ; however, it records 1 SP1.

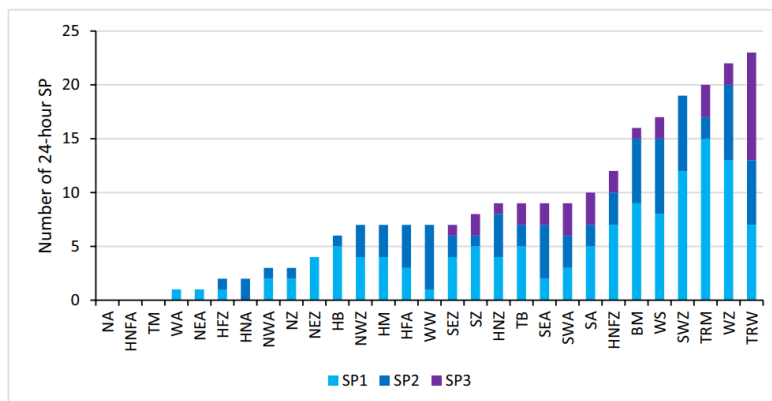


Fig. 13 : Occurrence (1997–2019 DJFMA) between the classes of SP and the 29 ACTs (Météo-France ; Deutscher Wetterdienst).

3.3.3 Evolution of the six subclasses of ACT.

The evolution (1951–2019 DJFMA) of the occurrence of the six ACTs subclasses (BM, WS, SWZ, TRM, WZ, TRW), which led to at least 15 SP, is calculated (cf. Fig. 14). This involves counting the number of days per season when one of these ACTs appeared. The idea is to observe whether a negative or positive trend in the large-scale atmospheric conditions favorable to SP exists. The occurrence of BM and TRM show an increasing trend (significantly tested with the MK' test). The TRW also seems to be on the rise, but the application of the MK' test does not validate this hypothesis (p value of 0.21, above the threshold of 0.05). Finally, the evolutions of the WS, SWZ, and WZ remain stable over time. Although the significance of the results is not validated for the six ACTS, a background trend shows that the atmospheric conditions leading to SP were generally on the rise between 1951 and 2019 (DJFMA).

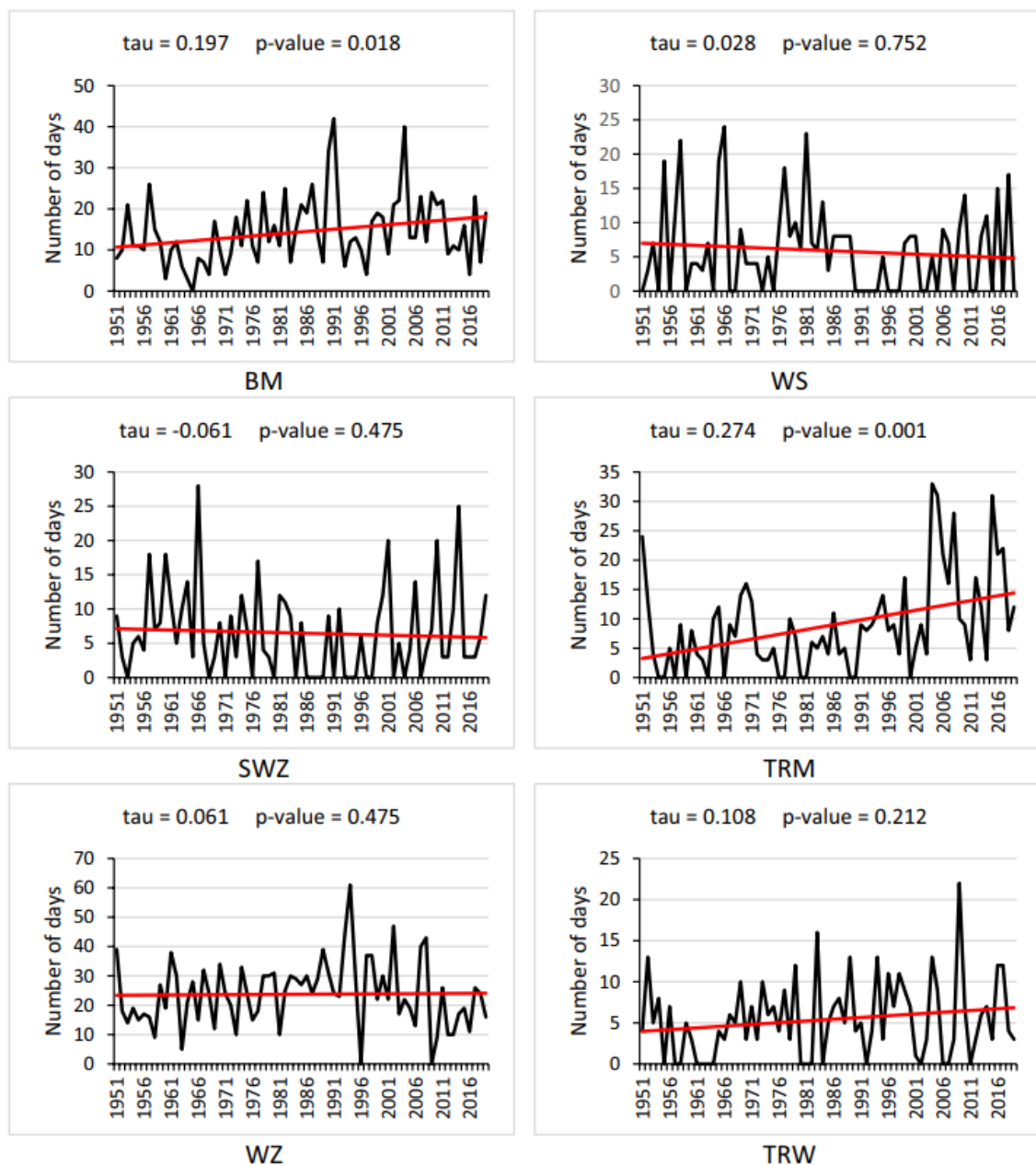


Fig. 14 : Occurrence (1951–2019-DJFMA) of the 6 ACTs (Météo-France ; Deutscher Wetterdienst).

4 Discussion and interpretation.

4.1 Seasonal evolution of the occurrence of the 24-h SP.

The seasonal (1985–2019 DJFMA) occurrence of the 24-h SP at the weather station of Isola 2000 has three trends : from 1985 to 1999, the 24-h SP decreased significantly, going from 40 SP per year to 20 SP ; from 2000 to 2015, they gradually returned to the previous level (40 SP per year) ; and since 2016, a decline seems to be in progress, until reaching less than 30 SP for 2019. Capozzi et al. (2022), which is interested in the variability of winter SP in the Apennines (Italy) between 1884 and 2015, found a similar result with an increase in the frequency of occurrence of the SP from 2000 to 2015. The author explained that the reverse trend of the Arctic Oscillation (AO) index and the prevalence of a neutral or negative Eastern Atlantic Western Russia (EAWR) pattern played an important role in the increase of the frequency of the SP in Apennines. Irannezhad et al. (2017) found a similar result in the SP variability in Finland, result of the influence of the AO.

In the case of the SP at Isola 2000, the role of the AO seems less marked than that of the NAO, since the up and down period of the 24-h SP coincides quite clearly with the variation of the NAO index (cf. Fig. 5). Indeed, between 1985 and 1999 (period of decline in 24-h SP), the NAO index is greater than 0.5 for 5 years and even exceeds the value of 1 for 3 years (1990, 1993, and 1994), and NAO – is present for only 2 years (1985 and 1996). Over the period 2000–2015 (period of increase of the 24-h SP), the index remains quite well below 0.5, and it is negative for 4 years (2001, 2005, 2009, and 2010). Finally, over the 2016–2019 period (drop in 24-h SP), the NAO index regularly rises above 0.5, and this period shows no negative years. A relationship between the 24-h SP and the NAO index seems to exist. This is partly explained by the fact that when the NAO index is in a positive phase (phase during which the occurrence of SP decreases), the Mediterranean basin is drier than normal. On the contrary, a low NAO index has a pressure field more relaxed over the Atlantic. The disturbances are engulfing further south, bringing rains to the Mediterranean regions. This context allows synoptic configurations favorable to the SP to form, in particular the TRW and the associated trough, which goes more easily towards southern Europe.

4.2 Evolution per month of the occurrence of the 24-h SP.

It is noted a reduction in the number of the SP for the months of December, January, and April since the early 2010s. These two months correspond, respectively, to the beginning and the end of the SP season, when temperatures are most likely to exceed the limit of the 0 °C isotherm. It suggests that there could be a negative impact of global warming, with an increase in the rain-snow limit at the start and end of the season, which would lead for example, to more liquid precipitations than SP. The level of confidence regarding a drop in SP for April is high ; however, for December and January, the significance test did not allow the trend to be validated.

4.3 ACTs involved in the 24-h SP and limits of the Hess and Brezowsky classification.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

The classification of Hess and Brezowsky made it possible to establish the main types of circulations at the origin of the SP in the WSN. It is found that SC is the ACT that produces the most SP, with 95 SP recorded out of 243 in total, or 40%. In addition, it causes a significant portion of SP2 (35%) but especially SP3 (68%). The TRW stands out from the other ACTs, by having the highest number of 24-h SP in total (23) and the most SP3 (10). The maps of the mean (1997–2019 DJFMA) configuration of the TRW show that it has a low value of geopotential height 700 hPa, close to 2950 m and a SW flow. The temperature at 850 hPa is cold (mean of the class about 2 °C), and the specific humidity at 700 hPa is high, between 2.1 and 2.4 g/kg. Actually, the presence of a depression over Iceland, flanked by two anticyclones (one located over the Azores and the other over the Black Sea), forms a depressionary talweg from Brittany to the SE of France. This placement of the centers of action drives the air masses to move from the sea (where they are enriched in water vapor) towards the Southern Alps. Subsequently, orographic lifting causes humid air masses to rise and then cool down and condensate, until abundant SP is produced (if the air atmosphere is cold enough in altitude).

In addition, five other ACTs produced more than 20 SP over the period 1997–2019 (DJFMA) : BM, WS, SWZ, TRM, and WZ. These results must be qualified. Indeed, the Hess and Brezowsky classification is not sufficiently discriminating to establish one or more types of circulations very specific to the SP in this part of Europe, since of the 29 ACTs, 26 produced at least one 24-h SP. This represents too many synoptic situations capable of causing a SP. Also, this classification associates ACTs which should not produce SP from the point of view of the atmospheric characteristics. For example, WA, SA, SWZ, SWA, SA, NWA, and HM have high average geopotential 700 hPa values (3050–3100 m), which is contrary to the possibility of producing a SP event. This shows the limits of the classification, which is not specific enough to the SP in the choice of the atmospheric variables used to compute it (pressure field over the Atlantic).

This assumption will be addressed in future work, by producing a classification of the general atmospheric circulation, by the combination of a PCA and a HCA and the help of the last reanalysis (ERA5). This classification will be produced, using atmospheric variables correlated to SP, and extraction points throughout the Euro-Atlantic area (and also in the Mediterranean basin).

5 Conclusion.

The study is conducted on the combination of the 24-h solid precipitation (SP) coming from 5 weather stations located in the French department of the Alpes-Maritimes (South of France) and the daily atmospheric circulation types (ACT), based on the classification of Hess and Brezowsky and made available by the German Meteorological Service.

The evolution (1985–2019 DJFMA) of the occurrence of the 24-h SP follow three trends. In fact, from 1985 to 1999, the 24-h SP decreased significantly, going from 40 SP per season to 20 SP, and then from 2000 to 2015, they gradually returned to the previous level (40 SP per season). Finally, since 2016, a decline seems to be in progress, until reaching less than 30 SP for 2019. The NAO seems to play an important role in the frequency of occurrence of SP.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Moreover, it is noted a reduction in the number of the SP for the months of December, January, and April (significantly validated by the Mann–Kendall test only for April) for the weather station of Isola 2000, located at 1912 m of altitude. It suggests that there is a negative impact of global warming, with an increase in the rain-snow limit at the start and at the end of the season of the SP. This conclusion remains ultimately not favorable to ski resorts, which need at the very beginning of the season some significant falls, to be able to work the slopes, and maintain a correct level of snow cover throughout the season for the practice of winter sports.

The south circulations (SC) are the main type of ACT that produce the most SP events, with 95 SP on 243 SP, and especially a preponderance of the intense SP, with 35 % of SP2 (16.9 cm) and 68 % of SP3 (38 cm). Thus, TRW is the subclass of ACTs that causes the largest number of events, with a total of 23 SP and especially 10 SP3. In addition, five other ACTs produced more than 20 SP over the period 1997–2019 (DJFMA) : BM, WS, SWZ, MRT, and WZ. However, behind these results it is also noted that the classification of Hess and Brezowsky is not sufficiently discriminating to establish one or more types of circulations very specific to the SP.

2.6 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 2.

Ce chapitre explore la classification des circulations atmosphériques en relation avec les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes. Après une revue des principales classifications atmosphériques existantes, telles que celles de Lamb, Jenkinson et Collison, COST733 et Vangengeim-Girs, il présente le réseau de mesure des chutes de neige dans les Alpes-Maritimes, composé de cinq stations météorologiques situées à différentes altitudes.

Les résultats montrent une variabilité importante des précipitations neigeuses sur plusieurs décennies. Entre 1985 et 1999, une diminution significative des événements de précipitations solides a été observée, suivie d'une augmentation de 2000 à 2015, puis d'une nouvelle diminution depuis 2016. L'analyse mensuelle révèle une diminution en décembre, janvier et avril, et une légère augmentation en février et mars.

L'article inclus, « Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification : Case in the French department of the Alpes-Maritimes », analyse les chutes de neige en relation avec la classification de Hess et Brezowsky. Les résultats montrent que certains types de circulations atmosphériques favorisent l'apparition des précipitations neigeuses, notamment les circulations cycloniques de Sud (type TRW), responsables des événements les plus intenses. Cependant, cette classification s'avère insuffisamment discriminante pour établir des circulations atmosphériques très spécifiques aux chutes de neige du département, suggérant la nécessité d'une classification atmosphérique plus adaptée à cette région.

Fort de ces analyses, le chapitre 3 se penchera sur l'évolution des types de circulation atmosphérique propres aux précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, en examinant les tendances passées. L'accent sera mis sur l'identification des schémas de circulation spécifiques à cette région, avec une attention particulière portée aux impacts possibles du changement climatique sur ces régimes atmosphériques.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE 2.

Ashcroft, L., Coll, J.-R., Gilabert, A., Domonkos, P., Brunet, M., Aguilar, E., Castella, M., Sigro, J., Harris, I., Uden, P., Jones, P. (2018). A rescued dataset of sub-daily meteorological observations for Europe and the southern Mediterranean region, 1877–2012. *Earth Syst Sci Data*, 10, 1613–1635. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1613-2018>.

Bárdossy, A., & Caspary, H. J. (1990). Detection of climate change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881 to 1989. *Theoretical and Applied Climatology*, 42, 155–167. <https://doi.org/10.1007/BF00866871>.

Böhm, R., Jones, P.-D., Hiebl, J., Frank, D., Brunetti, M., Maugeri, M. (2010). The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007. *Clim Change*, 101, 41–67.

Bonnemains, A., & Clivaz, C. (2019). Adaptation aux changements climatiques des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises et suisses: quel rôle pour les pouvoirs publics? *Elya Editions, Actes du colloque AsTRES*, 227–234.

Capozzi, V., De Vivo, C., & Budillon, G. (2022). Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015. *The Cryosphere*, 16, 1741–1763. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>.

Carrega, P. (1982). Les séquences froides dans les Alpes Maritimes Franco-Italiennes: durée de retour et structure géographique. In *Géographes Aujourd'hui. Mélanges offerts en hommage à Jean MIEGE*, 239–254.

Carrega, P. (1989). L'évolution du manteau neigeux dans l'arrière-pays niçois. *Mélanges offerts au Professeur Gonnet, Nice*, 309–316.

Chiadjeu, O., Gratton, Y., St-Hilaire, A. (2016). Analyse multivariée des paramètres morphologiques des lacs de la province du Québec. *Rapport No R1684, INRS-ETE, Québec (QC): vi + 23 p.*

Clivaz, C., Gonseth, C., Matasci, C. (2015). *Tourisme d'hiver: Le défi climatique*. Lausanne, PPUR, Coll. *Le Savoir Suisse*.

Corona, C., Guiot, J., Edouard, J.-L., Chalié, F., Büntgen, U., Nola, P., Urbinati, C. (2010). Millennium-long summer temperature variations in the European Alps as reconstructed from tree rings. *Clim Past*, 6, 379–400. <https://doi.org/10.5194/cp-6-379-2010>.

COST Action 733 (2013). *The COST 733 Classification Software*. <https://www.cost.eu/actions/733/>

Creusier, J., Biétry, F. (2014). Analyse comparative des méthodes de classifications. L'exemple du bien-être au travail. *RIMHE : Revue Interdisciplinaire Management, Homme & Entreprise*, 2014/1 (n° 10, vol. 3), p. 105–123. <https://doi.org/10.3917/rimhe.010.0105>. URL: <https://www.cairn.info/revue-rimhe-2014-1-page-105.htm>.

David, M., Cantat, O., Planchon, O. (2020). Chaleur en Normandie, types de circulation atmosphérique et changement climatique (1970–2019). *XXXIII ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*.

Degirmendžić, J., & Kożuchowski, K. (2018). Circulation epochs based on the Vangengeim-Girs large scale patterns (1891–2010). *Acta Universitatis Lodzianis. Folia Geographica Physica*, 17. <https://doi.org/10.18778/1427-9711.17.01>.

Douvinet, J., Planchon, O., Cantat, O., Delahaye, D., Cador, J.-M. (2009). Variabilité spatio-temporelle et dynamique des pluies de forte intensité à l'origine des "crues rapides" dans le Bassin Parisien (France). *Climatologie*, 6, 47–72.

Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., Boudières, V., Richard, D., Vengeon, J.-M., Giraud, G., Schoeneich, P. (2015). Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes. *J Alp Res*. URL: <http://journals.openedition.org/rga/2829>. <https://doi.org/10.4000/rga.2829>.

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Esteban, P., Jones, P.-D., Martin-Vide, J., Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *Int J Climatol*, 25, 319-329. <https://doi.org/10.1002/joc.1103>.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C. (2005). *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881–2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*, 6, verbesserte und ergänzte Auflage.

Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C. (2010). *Katalog der Grosswetterlagen Europas (1881-2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky*. Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Gilbert, R.O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. Wiley, NY.

Guerin, G., Martin, N. (2022). Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps: case of the Isola 2000 weather station. *Polar Sci*. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2022.100922>.

Hess, P., Brezowsky, H. (1952). *Katalog der Grosswetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, 33.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottersen, G., Visbeck, M. (2003). An overview of the North Atlantic Oscillation. In *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*. <https://doi.org/10.1029/134GM01>.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021. The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfeld, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

Irannezhad, M., Ronkanen, A.-K., Kiani, S., Chen, D., Kløve, B. (2017). Long-term variability and trends in annual snowfall/total precipitation ratio in Finland and the role of atmospheric circulation patterns. *Cold Reg Sci Technol*, 143, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.008>.

Jenkinson, A. F., & Collison, F. P. (1977). An initial climatology of gales over the North Sea. *Synoptic Climatology Branch Memorandum*, 62.

Kaiser, H. F. (1961). A note on Guttman's lower bound for the number of common factors. *Br J Stat Psychol*, 14, 1–2.

Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods (4th ed.)*. Charles Griffin, London.

Lamb, H. H. (1972). *The British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns, 1861-1971*. *Geophysical Memoirs*, 116, 1-85.

Magnier, E. (2013). *Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne : impacts sur l'hydro-système. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse)*. Hydrologie. Université Paris-Sorbonne - Paris IV; Université de Lausanne. (tel-00922929).

Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 163–171.

Martin, N. (2008). *La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen: les Alpes-Maritimes*. Géographie. Université Nice Sophia Antipolis.

Martin, N., & Carrega, P. (2011). *L'enneigement dans les Alpes du sud en France : évolution temporelle et relation avec la circulation atmosphérique*.

Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C.-M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat, B.D., Chiognan, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., Beozzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., Notarnicola, C., Petitta, M., Scherrer, S.-C., Strasser, U., Winkler, M., Zebisch,

CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES CIRCULATIONS ATMOPSHÉRIQUES ET DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

M., Cicogna, A., Cremonini, R., Debernardi, A., Faletto, M., Gaddo, M., Giovannini, L., Mercalli, L., Soubeyrou, J.-M., Sušnik, A., Trenti, A., Urbani, S., Weilguni, V. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *Cryosphere*, 15, 1343–1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>.

Merino, A., Fernández, S., Hermida, L., López, L., Sánchez, J.-L., García-Ortega, E., Gascón, E. (2014). Snowfall in the Northwest Iberian Peninsula: synoptic circulation patterns and their influence on snow day trends. *Sci World J*, 14, 480275. <https://doi.org/10.1155/2014/480275>.

Peña, J.-C., & Schulte, L. (2019). Simulated and reconstructed atmospheric variability and their relation with large Pre-industrial summer floods in the Hasli-Aare catchment (Swiss Alps) since 1300 CE. *Glob Planet Chang*, 190.

Pédélaborde, P. (1956). La circulation générale de l'atmosphère. *L'information géographique*, 20(3).

Pettitt, A.-N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *J Roy Soc: Series C (Applied Statistics)*, 28, 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>.

Philipp, A., Beck, C., Esteban, P., Kreienkamp, E., Frank, K., et al. (2014). *COST733CLASS v1.2 User guide*.

Planchon, O., Cantat, O., Quénot, H. (2015). Types de temps et types de circulation atmosphérique : essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). *Actes du XXVIIIème colloque de l'AIC, Liège (Belgique, 1–4 juillet 2015)*, 381–386.

Planchon, O., Quénot, H., Dupont, N., Corgne, S. (2009). Application of the Hess-Brezowsky classification to the identification of weather patterns causing heavy winter rainfall in Brittany (France). *Nat Hazard*, 9, 1161–1173.

Rogers, J.C. (1984). The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Mon Weather Rev*, 112, 1999–2015.

Screen, J.A., Bracegirdle, T.J., Simmonds, I. (2018). Polar climate change as manifest in atmospheric circulation. *Curr Clim Change Rep*, 4, 383–395. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0111-4>.

Shepherd, T. (2014). Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geosci*, 7, 703–708. <https://doi.org/10.1038/ngeo2253>.

Thompson, D.-W.-J., Wallace, J.-M. (1998). The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 25(9), 0094–8276. <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.

Vangengeim, G. Y., & Girs, A. A. (1974). *Atmospheric circulation mechanisms in the Northern Hemisphere in the 20th century*. Hydrometeorological Publishing.

Werner, P. C., Gerstengarbe, F. W., Fraedrich, K., & Oesterle, H. (2000). Recent Climate Change in the North Atlantic/European Sector. *International Journal of Climatology*, 20(5), 463–471.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES (1950-2019, DJFMA) DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

3.1 INTRODUCTION.

Ce chapitre présente une analyse approfondie des tendances historiques des types de circulation atmosphérique influençant les précipitations solides dans les Alpes du Sud, et plus spécifiquement dans les Alpes-Maritimes, sur la période de 1950 à 2019, couvrant les mois de décembre à avril (DJFMA). L'objectif principal est de comprendre comment les schémas de circulation atmosphérique, identifiés comme étant propices aux chutes de neige, ont évolué au cours des dernières décennies.

Dans cette perspective, le chapitre se concentre sur l'évolution des différents types de circulation atmosphérique en s'appuyant sur les données ERA5, produites par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). Ces données, reconnues pour leur précision et leur importance dans les études climatiques, constituent la base de l'analyse. La première section décrit en détail ces données ERA5 et leur pertinence pour l'étude des circulations atmosphériques.

Ensuite, la méthode de production des types de circulation atmosphérique est présentée, intégrant des analyses statistiques avancées telles que l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces techniques sont appliquées aux données de réanalyse ERA5, qui seront croisées aux observations locales, permettant d'identifier les circulations favorables et défavorables aux précipitations neigeuses.

Le chapitre explore ensuite les tendances décennales, révélant des changements significatifs dans la fréquence des circulations influençant les chutes de neige. Ces tendances ont des implications majeures pour les activités économiques locales, en particulier celles liées au tourisme hivernal.

Enfin, le troisième article intitulé « How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region ? Use of the ERA5 reanalyses » est présenté. Avant cela, une discussion sur la position de l'article par rapport à d'autres travaux similaires et ses limites est abordée, ainsi qu'une explication de son rôle dans le cadre plus large de la thèse.

3.2 DESCRIPTION DES DONNÉES ERA5.

Les données ERA5, produites par l'ECMWF dans le cadre du service Copernicus sur le Changement Climatique (C3S), représentent la cinquième génération de réanalyses atmosphériques globales. Couvrant désormais la période de janvier 1950 à nos jours, ERA5 fournit des estimations horaires de nombreuses variables atmosphériques, terrestres et océaniques avec une résolution spatiale d'environ 31 km et 137 niveaux de pression atmosphérique, allant de la surface jusqu'à 80 km d'altitude (Hersbach et al., 2020). ERA5 est incontournable pour plusieurs raisons. Elle offre une couverture temporelle et spatiale détaillée et cohérente, intégrant des observations provenant de diverses sources, telles que les stations météorologiques in-situ et

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

les satellites, en utilisant des techniques avancées d'assimilation de données 4D-Var (Hersbach et al., 2020). Cette méthode permet de produire des séries temporelles constantes et homogènes, essentielles pour l'étude des tendances climatiques à long terme et pour la modélisation du climat.

ERA5 améliore considérablement la précision et la résolution par rapport aux réanalyses précédentes, comme ERA-INTERIM. Elle intègre des mises à jour régulières presque en temps réel, offrant des données disponibles jusqu'à cinq jours après leur enregistrement (Hersbach et al., 2020). De plus, ERA5 inclut des estimations des incertitudes pour toutes les variables atmosphériques, ce qui est crucial pour les études de sensibilité et les analyses de risques (Hersbach et al., 2020). Une des principales justifications de l'utilisation des données ERA5 par rapport à d'autres jeux de données réside dans leur capacité à fournir des estimations détaillées et cohérentes dans le temps et l'espace. Par exemple, les études comparatives ont montré qu'ERA5 présente des biais plus faibles et une meilleure concordance avec les observations locales que d'autres ensembles de réanalyses comme MERRA-2 ou JRA-55 (Hassler and Lauer., 2021). Cela est particulièrement important pour les analyses climatologiques et hydrologiques, où une haute résolution et une cohérence temporelle sont cruciales pour comprendre les tendances à long terme et les variabilités climatiques.

L'utilisation des données ERA5 dans cette étude repose sur leur capacité à capturer avec précision les configurations de circulation atmosphérique à grande échelle, ainsi que les effets locaux induits par la topographie complexe des Alpes du Sud. Les études utilisant ERA5 pour analyser les précipitations solides démontrent l'efficacité de ces données. Par exemple, une étude sur la couverture neigeuse en Turquie a utilisé ERA5 pour analyser les variations spatiales et temporelles de la neige, fournissant des insights essentiels sur les réponses climatiques locales (Varlas et al., 2022). De plus, des recherches en Grèce ont exploité les données ERA5 pour identifier les tendances décennales des précipitations depuis les années 1950, permettant de mieux comprendre les impacts du changement climatique sur la région (Varlas et al., 2022).

En résumé, les données ERA5 représentent une ressource inestimable pour cette étude, offrant une base solide pour l'analyse des types de circulation atmosphérique et leur relation avec les précipitations solides sur une période de près de sept décennies. L'utilisation des données ERA5 permet non seulement une meilleure compréhension des conditions actuelles et passées, mais elle ouvre également la voie à des projections climatiques plus précises. Ces projections sont essentielles pour anticiper les impacts futurs du changement climatique, en particulier dans les régions montagneuses où les précipitations solides jouent un rôle crucial dans les écosystèmes et les économies locales.

3.3 MÉTHODE DE PRODUCTION DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

La méthode de production des types de circulation atmosphérique, détaillée dans l'article en fin de chapitre, repose sur une combinaison d'analyses statistiques avancées et de données météorologiques fournies par le réseau de mesure de cinq postes gérés par Météo-France et les réanalyses ERA5. Cette approche vise à identifier les configurations atmosphériques spécifiques influençant les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, en capturant à la fois les caractéristiques locales et les schémas de circulation à grande échelle.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Le processus commence par la collecte des données, qui inclut des observations provenant de cinq stations météorologiques situées dans les Alpes-Maritimes et des réanalyses ERA5 fournies par l'ECMWF, couvrant la période de décembre à avril entre 1997 et 2019. Un pré-traitement des données est ensuite effectué pour garantir leur fiabilité, en utilisant les méthodes de Capozzi et al. (2022) pour vérifier les valeurs aberrantes et l'homogénéité des séries de données. Les variables atmosphériques sont extraites des réanalyses ERA5 à différents niveaux de pression (500 hPa, 700 hPa, et 850 hPa) à des intervalles horaires spécifiques (00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC).

Des tests de corrélation sont effectués pour déterminer les variables atmosphériques et les intervalles de temps les plus corrélés aux précipitations neigeuses. Pour chaque poste, un coefficient de corrélation est calculé, et les variables atmosphériques avec les meilleurs scores ainsi que l'intervalle de temps le plus corrélé sont retenus. Les variables atmosphériques sélectionnées sont ensuite extraites selon une maille définie. Pour capturer les systèmes météorologiques à grande échelle influençant les chutes de neige, la fenêtre d'extraction s'étend au-delà des coordonnées précises des stations météorologiques, couvrant plusieurs milliers de kilomètres autour des stations (zone Euro-Atlantique). Cette extension garantit que les interactions atmosphériques à grande échelle sont également prises en compte, ce qui est crucial pour une analyse complète. De plus, la maille d'extraction est resserrée autour des stations, apportant un poids supplémentaire à l'échelle locale, comme démontré dans l'étude de Martin (2008).

Une analyse en composantes principales (ACP) est ensuite réalisée sur les variables atmosphériques sélectionnées pour simplifier les données en réduisant leur dimensionnalité tout en conservant l'essentiel de l'information. Cette analyse identifie les principales composantes expliquant la variance des données, et la sélection des composantes principales est guidée par la règle de Kaiser, qui stipule que seules les composantes avec des valeurs propres supérieures à 1 sont retenues pour l'analyse (Kaiser and Henry, 1961).

Les résultats de l'ACP sont utilisés pour produire une classification ascendante hiérarchique (CAH), dont l'objectif est de classer les jours en groupes homogènes, permettant d'identifier des types de circulation distincts. Cette classification hiérarchique regroupe les jours présentant des caractéristiques atmosphériques similaires, et l'arbre de classification est découpé selon le dernier saut d'inertie identifié, comme évoqué dans les travaux de Chesneau (2016), afin d'obtenir des classes avec une forte hétérogénéité inter-classe et une forte homogénéité intra-classe.

Une vérification de l'efficacité de la classification est ensuite réalisée en croisant les types de circulation identifiés avec les observations de chutes de neige du réseau de mesure pour s'assurer que les jours classifiés correspondent effectivement aux jours avec des observations de précipitations neigeuses. Les configurations moyennes des variables atmosphériques pour chaque type de circulation identifié sont également analysées pour vérifier leur cohérence avec les schémas atmosphériques connus lors des épisodes de précipitations solides.

Enfin, une analyse des changements temporels est menée en réalisant une seconde classification étendue dans le temps, couvrant la période de 1950 à 2019, en suivant le même algorithme et les mêmes étapes de contrôle que la première classification (1997-2019). L'objectif est d'analyser les fréquences des types de circulation atmosphérique sur une période plus longue, afin de comprendre comment les changements dans les schémas de circulation atmosphérique affectent les chutes de neige et les conditions nivales dans les Alpes du Sud.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Ainsi, cette méthode rigoureuse et systématique, utilisant des techniques d'analyse statistique avancées et des données atmosphériques détaillées, permet d'identifier et de comprendre les schémas de circulation qui influencent les chutes de neige dans les Alpes du Sud, et plus spécifiquement dans le département des Alpes-Maritimes. Les types de circulation atmosphérique définis à partir des réanalyses ERA5 peuvent également servir de base pour des modèles de projection climatique, comme les modèles CMIP6, afin de prévoir les futurs schémas de précipitation sous différents scénarios socio-économiques. Les résultats obtenus peuvent ainsi aider à anticiper les périodes de sécheresse, à optimiser la gestion des ressources en eau et à adapter les pratiques touristiques hivernales aux nouvelles conditions climatiques.

3.4 TENDANCE DÉCENNALE (1950-2019) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

L'article présentée dans la prochaine section, analyse les tendances décennales des types de circulation atmosphérique sur une période allant de 1950 à 2019. Cette analyse est essentielle pour comprendre l'évolution des schémas atmosphériques qui influencent les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes, et elle révèle plusieurs observations clés.

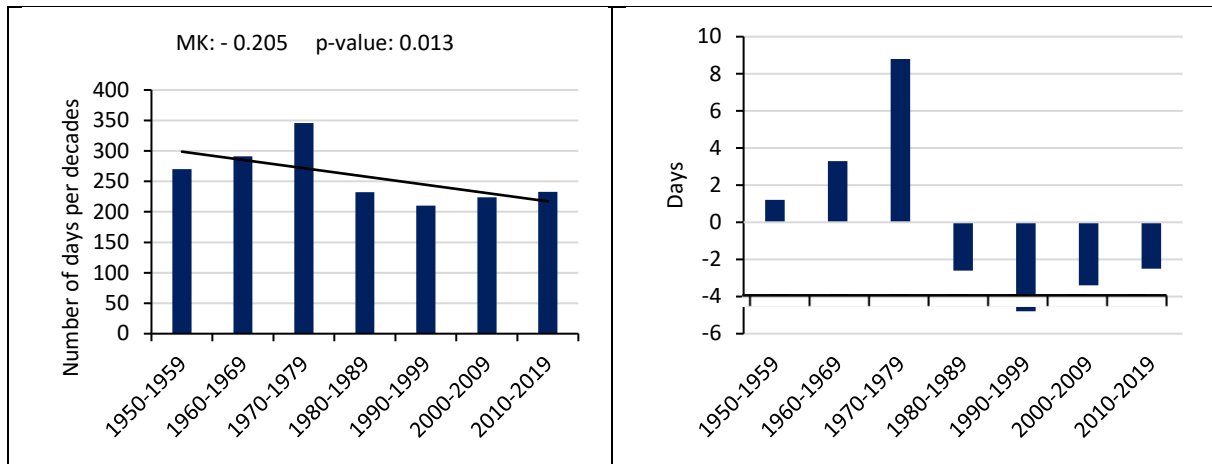
Une des principales conclusions de cette analyse est la diminution significative de la fréquence des circulations favorables aux précipitations solides, en particulier le type de circulation STW (South with a Trough on Western Europe). Ce type de circulation est particulièrement propice aux événements neigeux, étant présent dans 62 % des événements neigeux totaux et dans 100 % des événements de haute intensité, où les chutes de neige dépassent 38 cm (Figure 9). La baisse de la fréquence des jours caractérisés par ce type STW est un indicateur clé des changements climatiques influençant les conditions nivales dans la région.

Parallèlement, on observe une augmentation notable des circulations anticycloniques, notamment celles situées à l'ouest (WA) et au sud-ouest (SWA), comme l'illustre la figure 2. Ces types de circulation sont associés à des conditions sèches et ne sont jamais présents lors d'un événement de chute de neige. L'augmentation de leur fréquence au cours des dernières décennies indique une tendance vers des conditions climatiques plus sèches dans les Alpes du Sud, ce qui peut avoir des répercussions directes sur le manteau neigeux.

Les conséquences de ces changements sur le manteau neigeux sont significatives. La diminution des jours favorables aux précipitations neigeuses, couplée à l'augmentation des circulations sèches, pourrait entraîner une réduction de l'épaisseur et de la durée du manteau neigeux. Cela affecte directement la couverture neigeuse, avec des implications économiques et environnementales importantes, notamment pour le tourisme hivernal et la gestion des ressources en eau.

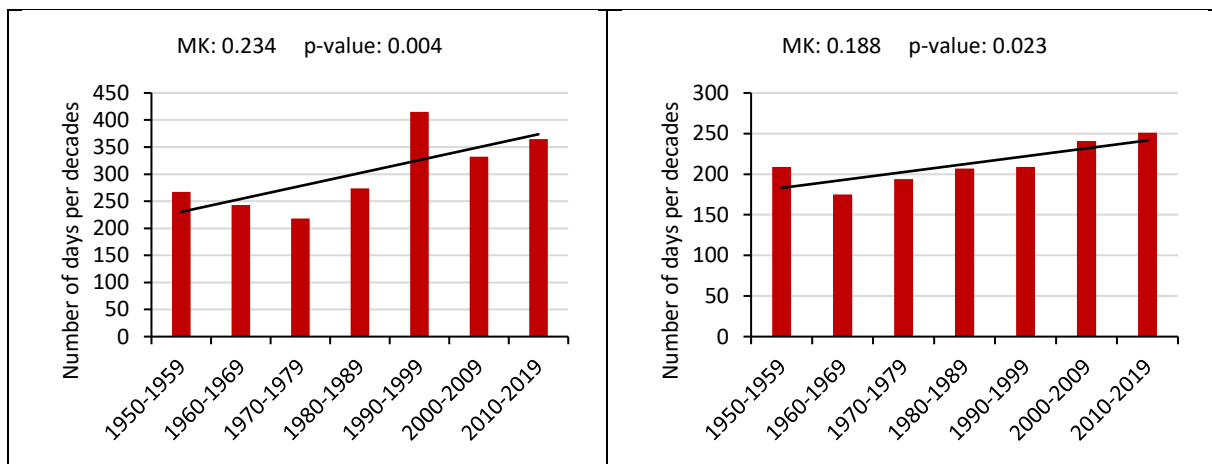
En résumé, l'analyse des tendances décennales des types de circulation atmosphérique de 1950 à 2019 révèle une diminution des types de circulation favorables aux chutes de neige et une augmentation des circulations anticycloniques sèches, très probablement en raison de l'expansion latitudinale de la cellule de Hadley (Studholme & Gulev, 2018). Ces changements ont des implications significatives pour les conditions nivales et soulignent la nécessité de développer des stratégies d'adaptation appropriées pour faire face aux impacts potentiels sur les écosystèmes alpins et les activités économiques locales.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.



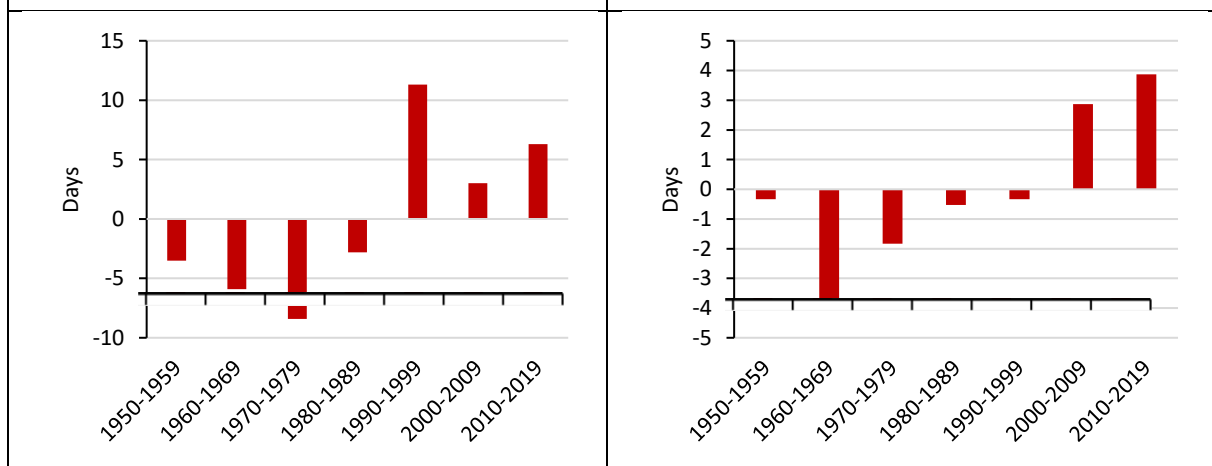
Anomalies = Moyenne de la totalité de la période – moyenne de la décennie

Figure 1 : Evolution multi-décennale de la classe STW (graphique de gauche) et graphique des anomalies (graphique de droite). Le graphique des anomalies correspond au nombre de jour moyen par an en plus ou en moins pour la décennie concernée par rapport à l'ensemble de la période.



WA

SWA



Anomalies = Moyenne de la totalité de la période – moyenne de la décennie

Anomalies = Moyenne de la totalité de la période – moyenne de la décennie

Figure 9 : Evolution multi-décennale des classes WA et SWA (graphiques de gauche) et graphiques des anomalies (graphiques de droite). Le graphique des anomalies correspond au nombre de jour moyen par an en plus ou en moins pour la décennie concernée par rapport à l'ensemble de la période.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Ces observations et conclusions sur les tendances décennales des types de circulation atmosphérique mettent en lumière l'importance de comprendre les schémas de circulation spécifiques aux précipitations solides et leurs évolutions dans le contexte du changement climatique. Afin d'approfondir cette analyse et d'explorer davantage les implications de ces changements pour les événements météorologiques dans les stations alpines de la région méditerranéenne, l'article suivant examine en détail l'impact potentiel de ces modifications, en s'appuyant sur les réanalyses ERA5.

3.5 ARTICLE 3 : « HOW CHANGES IN THE CIRCULATION PATTERNS SPECIFIC TO THE SOLID PRECIPITATIONS CAN AFFECT THESE METEOROLOGICAL EVENTS IN THE ALPINE STATIONS OF THE MEDITERRANEAN REGION ? USE OF THE ERA5 REANALYSES ».

Cette section est dédiée à l'analyse approfondie de l'article intitulé « How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region? Use of the ERA5 reanalyses ». Cet article explore les impacts potentiels des changements dans les schémas de circulation atmosphérique sur les précipitations solides dans les stations alpines de la région méditerranéenne, en s'appuyant sur les réanalyses ERA5 pour une compréhension détaillée et précise des phénomènes météorologiques en question.

La section commence par un résumé long (3.5.1), qui fournit une vue d'ensemble complète des principaux résultats et conclusions de l'article. Ensuite, le contexte et les objectifs de l'article (3.5.2) sont présentés. La discussion et les limites de l'article (3.5.3) sont ensuite abordées. Cette partie critique les résultats obtenus, en soulignant les forces de l'analyse ainsi que ses limites. Elle examine également les aspects méthodologiques qui pourraient influencer l'interprétation des résultats et propose des pistes pour des recherches futures. Cette discussion est essentielle pour comprendre la portée des conclusions de l'article et leur applicabilité dans d'autres contextes. Enfin, avant la présentation intégrale de l'article, la section se termine par un positionnement de l'article dans la thèse (3.5.4). Cette dernière sous-section discute de la manière dont cet article s'intègre dans l'ensemble de la thèse, en montrant comment il contribue à l'objectif global de la recherche. Le lien avec les autres chapitres de la thèse est clarifié, permettant de situer cet article comme une pièce clé dans la compréhension des impacts climatiques sur les précipitations solides dans les Alpes-Maritimes.

3.5.1 Résumé long.

Les changements climatiques contemporains influencent fortement les conditions météorologiques dans les régions montagneuses, affectant particulièrement les précipitations solides. Les stations alpines de la région méditerranéenne sont particulièrement vulnérables en raison de leur dépendance économique et environnementale aux conditions nivales (Barbier, 1982 ; Bokhorst et al., 2016 ; François et al., 2016 ; Croce et al., 2018 ; Joye, 2019 ; Zhang et al., 2019 ; Franco, 2021 ; Barry & Gan., 2022). Cette étude vise à produire une classification des types de circulation atmosphérique favorables aux précipitations neigeuses dans les Alpes du Sud (plus spécifiquement pour les massifs des Alpes-Maritimes), et à analyser leur évolution

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

sur plusieurs décennies (1950-2019, DJFMA). En utilisant les réanalyses ERA5, les auteurs cherchent à comprendre comment les changements dans les circulations peuvent affecter les chutes de neige et, par conséquent, les conditions nivales dans les montagnes européennes de latitude moyenne. Si cette classification de référence s'avère robuste, elle servira de base à une seconde classification, réalisée à partir des modèles de projection CMIP6 pour l'horizon 2100 et selon différents scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways).

La classification des circulations atmosphériques a été réalisée à l'aide d'une ACP et d'une CAH. L'ACP a simplifié les informations en réduisant la dimensionnalité des données, tandis que la CAH a classé les jours en groupes homogènes. Les données utilisées pour cette analyse proviennent des mesures de précipitations solides (chutes de neige tombées sur une période de 24 heures) de cinq stations météorologiques situées dans les Alpes-Maritimes, ainsi que des réanalyses ERA5 fournies par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (ECMWF). Le contrôle de la qualité des données a suivi le protocole de Capozzi et al. (2022), vérifiant les valeurs aberrantes et l'homogénéité des séries pour garantir leur fiabilité et cohérence.

La classification a abouti à l'identification de six types de circulation quotidiens, parmi lesquels un est particulièrement favorable aux chutes de neige, tandis que deux autres sont associés à des conditions sèches. La circulation cyclonique de sud avec une dépression à l'ouest de l'Europe et un talweg s'étendant des îles britanniques aux côtes languedociennes (nommée STW pour South with Trough on Western Europe) a été identifiée comme le principal type associé aux événements neigeux. Il est présent lors de 62 % des événements totaux de précipitation neigeuse du réseau de mesure et 100 % des événements de haute intensité (chutes supérieures à 38 cm). En revanche, les circulations anticycloniques d'ouest (WA) et de sud-ouest (SWA) sont associées à des conditions sèches et ne sont jamais présentes lors d'une chute de neige. Entre 1950 et 2019, une diminution significative de la fréquence des jours STW a été observée, tandis qu'une augmentation des circulations anticycloniques WA et SWA a été notée.

Les résultats de cette étude montrent que les changements dans les circulations atmosphériques ont un impact direct sur les précipitations solides dans les stations alpines de la région méditerranéenne. Ces changements sont potentiellement attribués à l'expansion latitudinale de la cellule de Hadley. La diminution de la fréquence des jours STW, favorables aux événements neigeux, et l'augmentation des circulations anticycloniques sèches pourraient entraîner une réduction significative de l'épaisseur et de la durée du manteau neigeux. Cela pourrait avoir des conséquences économiques majeures pour le tourisme hivernal, fortement dépendant des conditions de neige. De plus, la réduction du manteau neigeux pourrait affecter la gestion des ressources en eau dans la région, car la neige joue un rôle crucial en tant que réservoir tampon, libérant de l'eau progressivement lors de la fonte printanière. Une diminution du manteau neigeux pourrait ainsi aggraver les périodes de sécheresse, réduisant l'apport en eau douce pendant les mois critiques.

3.5.2 Contexte et objectifs de l'article.

L'article se situe dans le contexte des changements climatiques contemporains qui influencent fortement les conditions météorologiques et climatiques dans les régions montagneuses, notamment les Alpes du Sud dans la région méditerranéenne. Ces changements

affectent particulièrement les précipitations solides, essentielles pour les écosystèmes alpins et les économies locales, telles que le tourisme hivernal. Les stations alpines de la région méditerranéenne sont particulièrement vulnérables en raison de leur dépendance aux conditions nivales pour le maintien des activités économiques et la gestion des ressources en eau. Dans ce cadre, il est crucial de comprendre comment les circulations atmosphériques évoluent et influencent les chutes de neige, ce qui permettrait d'anticiper les impacts futurs du changement climatique sur ces régions. L'article a plusieurs objectifs principaux. Premièrement, il vise à produire une classification des circulations atmosphériques favorables aux précipitations solides dans les Alpes du Sud, en utilisant les réanalyses ERA5. Deuxièmement, il analyse l'évolution de ces types de circulation sur plusieurs décennies, de 1950 à 2019 (DJFMA), pour comprendre comment les changements dans ces schémas de circulation affectent les chutes de neige et, par conséquent, les conditions nivales dans les montagnes européennes de latitude moyenne. Troisièmement, si cette classification de référence s'avère robuste, elle servira de base pour une seconde classification à partir des modèles de projection CMIP6 pour l'horizon 2100, selon différents scénarios de trajectoires socioéconomiques partagées (SSP).

3.5.3 Discussion et limites de l'article.

L'article se positionne par rapport à d'autres travaux en apportant une contribution significative à l'étude des précipitations solides et des circulations atmosphériques dans la région étudiée en utilisant les données de réanalyse ERA5. Contrairement aux études antérieures, qui se concentraient souvent sur des régions plus vastes ou utilisaient des données de résolution moins fine, cette recherche utilise des techniques statistiques (ACP et CAH) pour identifier des types de circulations spécifiques et leur évolution sur plusieurs décennies.

Cependant, l'étude présente des limites. Elle repose sur les données de seulement cinq stations météorologiques, limitant ainsi la représentativité des résultats pour d'autres régions. De plus, bien que les données ERA5 offrent une haute résolution, elles peuvent encore manquer de détails pour capturer les microclimats locaux. Les modèles utilisés simplifient les interactions atmosphériques complexes, et la variabilité naturelle du climat peut influencer les résultats, rendant difficile la distinction entre les effets des variations naturelles et ceux des changements climatiques anthropiques.

3.5.4 Positionnement de l'article dans la thèse.

Dans le cadre de la thèse, cet article se positionne comme une contribution essentielle en exploitant les données ERA5, reconnues pour leur haute performance et leur précision, afin de rechercher les variables atmosphériques les plus corrélées aux précipitations solides. Grâce à l'utilisation de ces données de haute qualité, il a pu être développé un algorithme de classification efficace qui identifie les circulations atmosphériques favorables aux chutes de neige. Cet algorithme, en plus de servir de référence robuste, présente le potentiel d'être intégré dans les modèles de projection climatiques CMIP6 pour anticiper les futurs schémas de précipitation.

En outre, l'article analyse en profondeur la fréquence d'occurrence des types de circulations propices aux précipitations neigeuses, fournissant des informations précieuses sur les tendances passées et futures des chutes de neige dans les Alpes du Sud. Ce travail se positionne

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

ainsi à l'intersection de l'analyse climatique avancée et de la modélisation prédictive, offrant des outils et des perspectives novateurs pour comprendre et anticiper les impacts du changement climatique sur les régimes de neige.

En conclusion de cette analyse, l'article « How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region ? Use of the ERA5 reanalyses » est présenté dans son intégralité, offrant une vision détaillée des méthodologies employées et des résultats obtenus, ainsi qu'une perspective sur l'évolution future des régimes de neige dans les Alpes du Sud.



How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region? Use of the ERA5 reanalyses

Guillaume Guerin¹ · Nicolas Viaux¹

Received: 1 June 2023 / Accepted: 1 November 2023 / Published online: 24 November 2023
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag GmbH Austria, part of Springer Nature 2023

Abstract

A classification was achieved to obtain some daily atmospheric circulation types (days that have a similar atmospheric circulation pattern), capable of reproducing sequences specific to the solid precipitations' events that occur in the mountains of the Southern Alps (Mediterranean region). These atmospheric circulation types were statistically studied to get the evolution of the frequency of the synoptic conditions favorable and unfavorable to solid precipitations. The classification produced six atmospheric circulation types, including two synoptic snow classes and two dry classes. The south circulation with a trough on the Western of Europe (STW) is the major snow classes. STW reproduced 62 % of the total solid precipitations' events, 68 % of those with a medium intensity level and 100 % of those with the high intensity level, which shows the effectiveness of the approach. The total number of days of presence per decades of STW, decreased between 1950 and 2019. This decreasing frequency of occurrence also applies to the other synoptic class of snow, the depression over central Europe (DCE). Conversely, west anticyclonic (WA) and southwest anticyclonic (SWA) circulations, did not produce any solid precipitations events and indicated the opposite logic, with an increase in their occurrences. This could lead to a strong change in the climate of the South of France, with major impact on the thickness and duration of snow cover. A sharp decrease in snow cover would have heavy economic consequences, the water cycle would be modified, the management of water resources could then be severely called into question and more worryingly, it would increase the intensity of periods of drought. The most plausible explanation for this phenomenon would come from the spread of Hadley's cell, which would push the Azores anticyclone further north and leads to a higher frequency of occurrence of WA and SWA.

Keywords : Solid precipitation, Alpine stations, Circulation patterns, ERA5 reanalyses, Classification

Abbreviation : AV, Atmospheric Variables ; ACT, Atmospheric Circulation Types ; CMIP, Coupled Model Intercomparison Project ; GHG, Greenhouse Gas ; HCA, Hierarchical Clustering Analyze ; PCA, Principal Component Analyze ; SP, Solid Precipitation ; SSPs, Shared Socioeconomic Pathways ; WSN, Weather Station Network.

Units : °C, degrees Celsius ; g/kg, gram per kilogram ; hPa, hectopascal ; m, meters ; %, percent.

1. Introduction

Snow is an important part of the environmental system and generates economic attractiveness (Stoffel & Corona, 2018; Berard-Chenu et al., 2022). The duration, distribution, and spatial extent of the natural snow cover is essential for the hydrological cycle. It is also determinant for vegetation or agriculture, and vital for the communities settled in the mountains through the economy of the winter tourism (Barbier, 1982; Bokhorst et al., 2016; François et al., 2016; Croce et al., 2018; Joye, 2019; Zhang et al., 2019; Franco, 2021; Barry & Gan., 2022).

This paper is interested in the solid precipitations (SP) of the South of France, those of the Alpine stations located in the French department of the Alpes-Maritimes (Southern Alps). In this Mediterranean region, contemporary climate change threatens thickness and extent of the snow cover, with three significant issues. Firstly, from an economic point of view, snow generates through winter sports tourism, 20 million euros turnover per season and 15 000 jobs for the Alpes-Maritimes (Côte d'Azur tourism observatory statistical - study from 2010 to 2015). The natural snow cover, which results from SP, is one of the determinants of this economic activity, although, snow at ski resorts is now well managed with modern techniques of grooming and production (Morin et al., 2022). However, an important condition is to have enough precipitation to fill the retention lakes and subsequently supply the snow cannons, which in turn require sufficiently low temperatures to operate. The other essential condition is to have intense SP at the beginning of the season to manage the slopes, thanks to the damage (Hanzer et al., 2020). The second issue is the management of water resources in the valleys. A reduction of the natural snow cover and an acceleration in the snowmelt in spring, alter the flow of rivers and their seasonality (Lastrada et al., 2021). There are therefore some impacts not only on ecosystems, but also on water management for farmers, dam managers, hydroelectricity producers and potentially on drinking water (Marnezy, 2008). The third issue is an aggravation of the intensity of drought periods, since the natural snow cover acts as a buffer reservoir, by storing water in solid form during the winter and redistributing it in liquid form in the environmental system during the summer (Beniston, 2012). Moreover, periods of drought are increasingly marked in the region in the last years, for instance, the Alpes-Maritimes faced an exceptional situation in the summer 2022, leading to strong restrictions on the use of water for the inhabitants, but also to ecological disasters with several lakes and rivers dried up.

Evidence of contemporary climate change is clear, it affects all regions of the world by altering natural processes, modifying precipitation patterns, melting glaciers, rising sea levels, etc. The SP is a meteorological event formed when the atmosphere has a temperature below or close to 0 °C (Klein, 2018). The Southern Alps, like the rest of the planet, have experienced a rise in the air temperature, since pre-industrial times (part 1 of the 6th IPCC report, 2021). There should be a continuation of warming at work for the middle and end of the 21st century, for scenarios with low Greenhouse Gas (GHG) emissions and an accentuation of warming for scenarios with high GHG emissions, with a real impact on the rain-snow limit pushed back higher in altitude.

Climate change does not only impact the rain-snow limit, but it could also lead to a change in the atmospheric circulation, which in turn would conduct to changes in the occurrence of precipitation patterns (part 3 of the 6th IPCC report, 2021). In this sense, the atmospheric circulation, by redistributing at the planetary level the energy coming from the sun and the

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

energy surplus coming from the intensification of the greenhouse effect is described as the engine of the weather for the past, present, and future period (Pédelaborde, 1956; Peña & Schulte, 2019). Then, the SP is the result of the action of an Atmospheric Circulation Type (ACT), which acts on the local weather in synergy with the substratum, the topography, etc. (Planchon et al., 2015).

The main objective of this study is to compute a classification of the atmospheric circulation specific to SP, especially the intense SP. The classification method must be reproducible to other geographical areas and the originality lies in the use of several atmospheric variables in its composition, which has so far never been done. The secondary objective is to statistically analyze the occurrence of synoptic conditions specific to the SP, to observe how the nival conditions in mid-latitude European mountains evolved. This work deals with the relationships between large-scale atmospheric flow and local SP, in the context of contemporary climate change. This is an additional tool to the current climate information available, to guide decision-making processes. Indeed, it is recognized that the outputs of the projection models include biases in the representation of certain sensitive weather variables, such as precipitation, but are relatively robust on typical circulation variables (Boé & Terray, 2008, Barrier et al., 2014; Pathak et al., 2019; Lavers et al., 2021).

2. Data and methods

2.1 Study area and solid precipitation observations

The Weather Stations Network (WSN) contains five stations (cf. Table 1): Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino and Estenc.

Table 1: Stations contained in the WSN.

Station	Latitude	Longitude	Altitude in meters
Isola 2000	44.18	7.15	1912
Valberg	44.09	6.92	1630
Auron	44.22	6.93	1910
Val Casterino	44.09	7.5	1554
Estenc	44.23	6.75	1850

They are positioned on a NW/SE axis, in the North of the French department of the Alpes-Maritimes and have an altitudinal diversity (cf. Figure 1). The site enjoys a particular topographical context since it is at a geodesic distance of 40 km from the Mediterranean Sea. The Mediterranean can be likened to a reservoir of warm water since its temperature rarely drops below 12 °C even in winter. Thus, it participates in the enrichment of water vapor in air masses, causing significant total rainfall during Mediterranean episodes (Kysely et al., 2012; Piras et al., 2016; Chochon et al., 2021; Carrega et al., 2021).

These five stations were chosen because they are in the French department of the Alpes-Martimes, they have data series prior to the year 2000 and the daily readings have less than 3% gaps. They measure in centimeters the amount of the fresh SP fallen in 24 hours. This data will be named in this paper “24-hour SP” and comes from the official service of meteorology and

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

climatology in France: Météo-France. The measurements are done once a day at 6:00 UTC. The 24-hour SP is counted from 6:00 UTC Day-D to 6:00 UTC Day-D+1. In other words, all the D-Day 24-hour SP are measured the next morning at 6:00 UTC. The measurements are made manually from a snowy table. It is a square wooden board on which is fixed a rod of 30 cm high. It is then a question of inserting a ruler graduated in centimeters to the board, to know the height of the 24-hour SP.

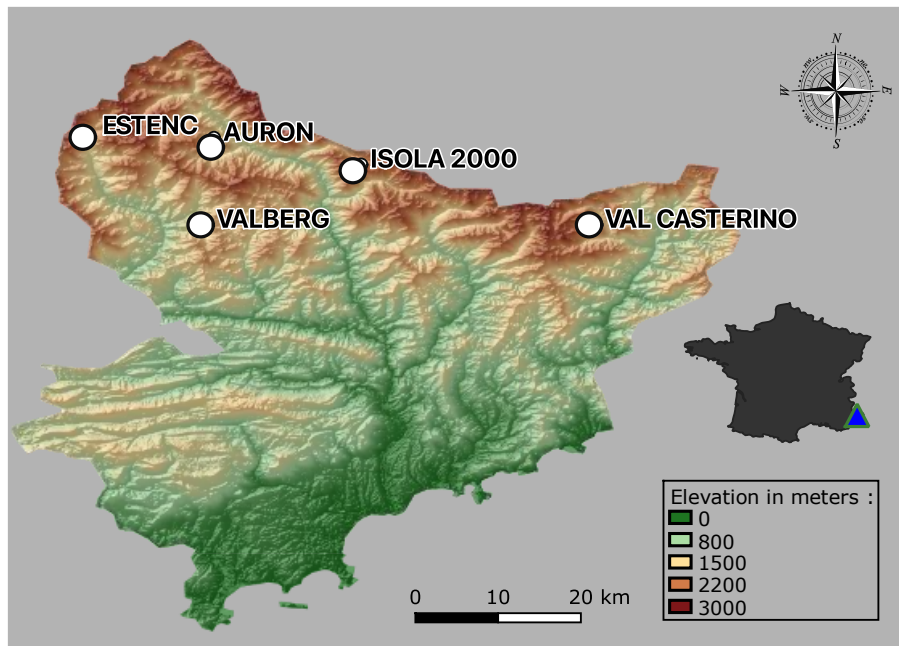


Figure 1: Location of the five weather stations of the WSN (DEM provided by the IGN).

2.1.1 Data quality control of the 24-hour solid precipitations

The consistency and reliability of a time series of observations can be compromised by several errors and artifacts, related to human errors in data collection, inaccuracies in digitization procedures and gaps in the data series (Capozzi et al., 2022). However, in the meteorological and climatological fields, there is no unambiguous and universal quality control strategy, since, depending on the type and number of data, different methods can be applied (Ashcroft et al., 2018). In the case of this work, the data verification methods use the work of Capozzi et al. (2022) as a reference. The first control is to verify whether in all five series of observations (Estenc, Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino) outliers appear. The 24-hour SP of the five stations are sorted in ascending order and the values above the 95th percentile are largely studied. If one of these values is abnormally higher in a station, compared to neighboring stations that are geographically close without having a plausible explanation, it is then rejected. In the case of this report, no outlying values were detected.

The second control aims to verify the homogeneity of the five series of observations to identify an artificial change or tendencies that could affect the results of the analysis. A break in the homogeneity of data can be attributed to several factors, including instrumentation error, changes in the environment adjacent to the instrument, and human mishandling (Capozzi et al., 2022). The test of Pettitt (Pettitt, 1979), then a comparison of SP trends between neighboring

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

stations was applied to the five-observation series and no break in homogeneity linked to an artefact was detected.

2.1.2 Intensity classes of the 24-hour solid precipitations

The determination of the intensity of the 24-hour SP is achieved through a classification, to characterize the limits of each type (Martin, 2008) and obtain groups with minimized variance between individuals in the same group, and maximum variance between different groups (Creusier et al., 2014). One of the most widely used analyses by climatologists remains the combination of a Principal Component Analysis (PCA), which simplifies the information in the dataset, and an Hierarchical Clustering Analyze (HCA), which classifies statistical individuals into different groups (Chiadjeu et al., 2016). This combination is used on the 24-hour SP.

The period used to carry out this classification extends from 1997 to 2019. It was not possible to use older data because the Estenc and Val Casterino stations do not provide data before 1997. In addition, it was decided to carry out the study over five months (December, January, February, March, April - DJFMA). The season of the SP in the South of France extends from November to April (Matiu et al., 2021), but, due to missing data for November, the study season has been restricted to five months (DJFMA). This period (1997-2019 DJFMA) includes 3 598 days. However, only days with a 24-hour SP measured in all the five stations of the WSN are retained, reducing the period to 243 days. Thus, the first step is to perform a PCA over this matrix which includes 243 rows (days) and 5 columns (stations). Kaiser's rule (1961) is then applied to keep only the components whose eigenvalues score is greater than 1. Finally, the result of the PCA (coordinates of Individuals) is used in the HCA, to distinguish several classes of intensity of 24-hour SP.

2.2 Atmospheric variables

2.2.1 Atmospheric circulation types

The Solid Precipitation (SP) is dependent on climatic conditions (Ye & Rawlins., 2013; Smith et al., 2020) and atmospheric Variables (AV) such as geopotential height, atmospheric air temperature, specific humidity, or others, influencing them (Viceto et al., 2017, Guerin & Martin., 2022). Some AV act on the formation process, others on the transport mechanisms (Martin & Carrega., 2011, Guerin & Martin., 2022). The variations of the AV follow cyclical rhythms and weather conditions are sometimes repetitive or persistent (Martin, 2008). This makes it possible to group days that have a similar atmospheric circulation pattern, without necessarily being successive, in this study they are named ACT, for Atmospheric Circulation Types. The ACT generate the type of weather (sunny, rainy, warm, cold etc.), or rather is located upstream, the same type of ACT does not always produce the same type of weather (Carrega, 2004). The main objective of this paper is to determine the ACT which causes intense SP in the study area, to do this it is necessary to use large scale climate data.

2.2.2 *The ERA5 reanalysis*

The AV that will be used for the classification and production of the ACT are taken from the ERA5's reanalysis provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). They are free and can be downloaded from the ECMWF's climate data store portal. They are at the interface between observation and modelling (Parker, 2016; Zuo et al., 2019; Nogueira, 2020) and due to the integration of measured data, the reanalysis seems closer to the observed climatology than to the climatology of the model (Poccard, 2000). Exploitable since 1950, the ERA5 reanalysis has a horizontal resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and an hourly temporal time step (Silber et al., 2019). They have been chosen because they have a high resolution for the WSN (the highest at the start of the work), produce a complete hourly data series for a wide choice of AV at different levels of pressure and have a geographical window large enough to visualize the depressions of high latitudes and the anticyclones of low latitudes. Also, the data assimilation method with the 4D-VAR technology, shows more robust trends in climate variables (Mahto et al., 2019).

2.2.3 *Selection of the atmospheric variables*

The AV, available online, provide an abundant source of data. The major obstacle is not to get lost in this plethora. Indeed, to build a classification, it is necessary to make a choice, depending on the intensity of the statistical relationships. The method of selection of the AV involves carrying out Bravais-Pearson correlation tests (r) between the 24-hour SP and 10 AV, consisting for the most part of three pressure levels, which gives a total of 72 combinations (cf. Table 2). The ERA5 can be downloaded hourly, while the measurements of the 24-hour SP from the weather station are taken at 6:00 UTC the next day. The choice of the hourly steps is therefore essential to increase the chances of not missing the synoptic conditions specific to the snow event. For the study, it was decided to test four-time steps: 6:00 UTC, 12:00 UTC, 18:00 UTC and 00:00 UTC.

Thus, for each reanalysis pixel including a WSN station, the values of the AV are extracted, then r tests are produced between the 72 combinations and the 24-hour observation data. Moreover, to verify that the ERA5 pixels correctly represent the physical environment around the station, correlations were also carried out on the other pixels neighboring the station. The period common to these two sets of variables includes 2380 days (1997-2019 DJFMA) which serve as the basis for this work. Following the calculation of r , two controls must be carried out. It must be checked that the two sets of data do not differ from a Gaussian function, and it is necessary to ensure that the value of r is outside the rates compatible with chance (Pédélaborde, 1956). It is interesting to rely on the work of the German meteorologist Baur (1928) to support the significance of the r tests. According to his work, if the data provides more than 620 values in each series, the r must exceed 0.122 in absolute value, to reveal a statistical relationship.

Table 2 : Atmospheric variables tested (ECMWF, ERA5).

Variables	Levels (hPa)	Time steps (Hour - UTC)	Combinations
Geopotential	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Specific humidity	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12
U-Component-Wind	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12
V-Component-Wind	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12
Air temperature	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12
Vertical velocity	500; 700; 850	00; 06; 12; 18	12
2 meters air temperature	2 meters	00; 06; 12; 18	4
Mean sea level pressure	sea level	00; 06; 12; 18	4
Surface pressure	surface	00; 06; 12; 18	4
Sea surface temperature	surface	00; 06; 12; 18	4

2.2.4 Window extraction of the atmospheric variables

Once the selection of the AV has been made, the data must be extracted. The AV are available at a latitudinal and longitudinal resolution of 0.25° . The extraction window used, extends from 30° south to 60° north of latitude and from 40° west to 30° east of longitude. This choice is motivated to leave the WSN as close as possible to the center of the space, while being slightly offset towards the east: the general circulation being oriented from west to east at this latitude, it is essential to consider reanalyzed atmospheric fields over the near Atlantic. Even, if the atmospheric fields over the near Atlantic do not directly influence the SP of the WSN, they are frequently located upstream of the atmospheric circulation that concerns it. A total of 1 785 extraction points make up the extraction window of the AV. A maximum resolution (0.25°) is kept in the center of the map (close to the Southeast of France), while a lower resolution is used elsewhere (1.25°). Many windows have been tested with different resolutions and figure 2 presents the window that provided the best result (smallest deviations in the patterns of circulation linked to the classification of AV fields, in comparison of the patterns linked to the SP classes). Each AV is extracted for the 1 785 grid points and for all days of DJFMA. All these days will be classified, according to the method described below.

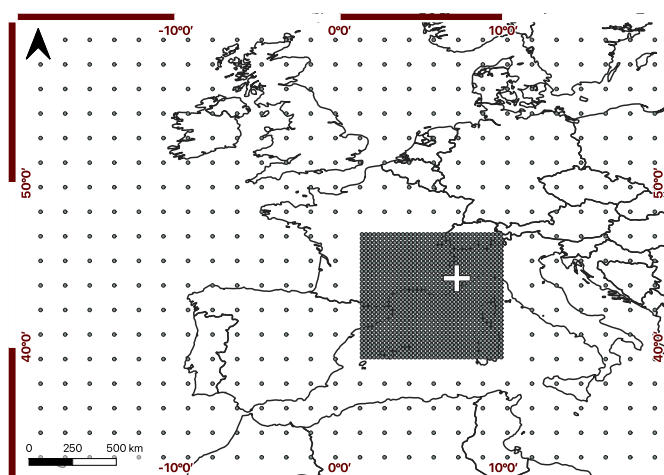


Figure 2: European window of 1 785 grid points used to extract the AV. The white cross corresponds to the location of the WSN. The values are extracted for each point and for each day (1950-2019 DJFMA), then will be subjected to a classification.

2.2.5 Method of classification of atmospheric variables fields

The next step is to produce a classification of the daily AV fields to obtain some ACT with a combination of a PCA and an HCA. The methodology adopted in this work used the work of Martin (2008) as a reference. The first step is always to perform a PCA on the data matrices where the variables are the 1 785 grid points of the European window, and the individuals are the days. Several PCA are conducted, one for each AV previously selected. In each case, the Principal Components (PC) are retained according to the Kaiser’s rule: retain PC whose eigenvalues are greater than 1. The Kaiser rule is the most used approach to selecting the number of components and an eigenvalue of 1 means that the PC contains the same amount of information as a single variable (Nunnally & Bernstein, 1994). This technique has shown the smallest deviations in the patterns of circulation linked to the classification of AV fields, in comparison to the patterns linked to the SP classes. Then, all the main components selected from each PCA are brought together in a new matrix subject to an HCA, with an algorithm of Ward. The HCA will then gather the individuals iteratively to produce a dendrogram, and the inter-group inertia is used to partition the classification. Finally, two classifications are made. A first from 1997 to 2019, which corresponds to the control classification. Then a second from 1950 to 2019, based on the same method as the first, but which will ensure statistical monitoring of ACT over a period of 70 years. Figure 3 below, summarizes the different steps of the method used.

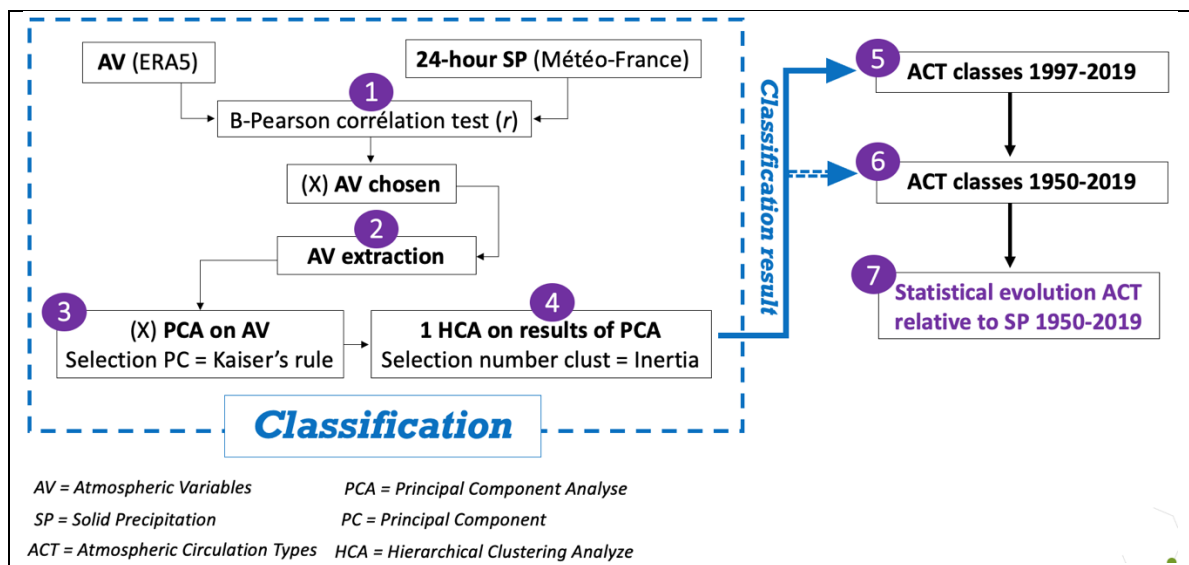


Figure 3: Summary of the main classification steps.

3. Results

3.1 Classification of the solid precipitations

A combination of a PCA and an HCA is conducted over the 243 days when a 24-hour SP is present in the five stations of the WSN, to obtain a classification of the SP observations. The objective is to discretize the 24-hours SP in intensity classes. The first four dimensions of the PCA were retained. They express 98 % of the total inertia (cf. Figure 4). The results of the

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

PCA (the first four dimensions) are used to make an HCA. The tree of the classification shows three homogeneous and significant classes of SP, as illustrated in figure 5.

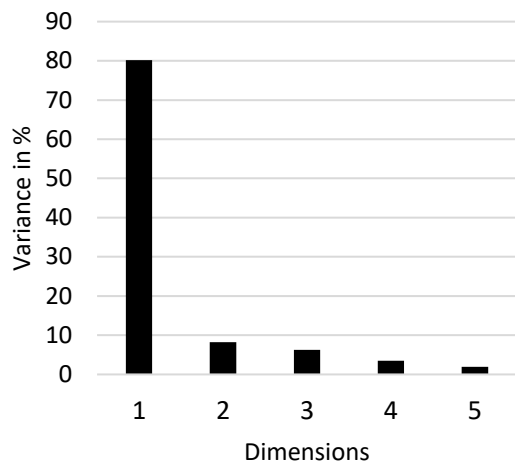


Figure 4: Decomposition of the total inertia of the PCA.

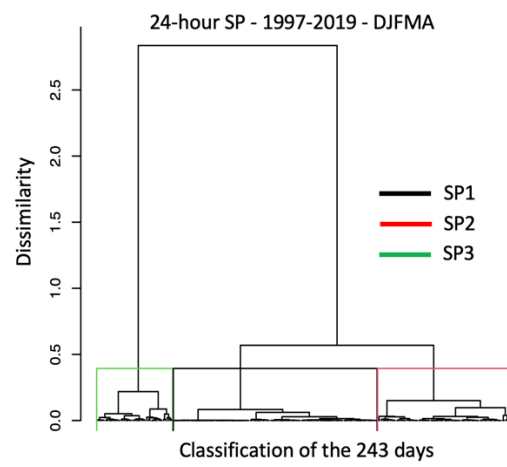


Figure 5: Tree of the classification (HCA) of the SP. This HCA classifies the 243 days with a SP in the five stations of the WSN.

The mean of the amount of SP fell in 24 hours and the occurrence for each class are presented in table 3. Class 1 (SP1) is composed of 24-hour SP sharing low values for all stations, with a mean of 2.3 cm fell in 24 hours and an occurrence of 129 days. Class 2 (SP2) has a mean value around 16.9 cm and an occurrence of 79 days, finally, class 3 (SP3) corresponds to high values, with 38 cm and an occurrence of 35 days.

Table 3: Mean amount in cm per classes of SP and occurrence (Météo-France).

Classes	Val Casterino	Isola 2000	Valberg	Es-tenc	Au-ron	Mean
SP1 (129 days)	2.2	3.2	1.6	2.7	2.1	2.3
SP2 (79 days)	14.6	16.6	15.6	19.8	17.8	16.9
SP3 (35 days)	38.1	37	34.4	39.3	41.3	38

3.2 Selection of the atmospheric variables fields

3.2.1 Tests of correlation

Table 4 represents the r between the AV and the 24-hour SP of the WSN from 1997 to 2019. The 18:00 UTC time step always obtained the highest r score, as the pixel closest to the station, and it has been found that all the statistical relations follow a Gaussian function. Thus, according to the work of Baur, an r value of 0.122 shows significant relations. Most of the covariations (except: Specific humidity 850 hPa; Air temperature 500 hPa; U-Component-Wind 500 and 700 hPa; V-Component-Wind 850 hPa; Vertical velocity 500 and 850 hPa; 2 m air temperature; Sea surface temperature) are above this threshold. However, the intensity of the relations is not homogeneous. A choice in the AV was made, according to the value of the

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

coefficient r (the most intense relations are preserved) and the absence of redundancy between V (for instance, the surface pressure is discarded since it is strongly correlated with the 700 hPa geopotential, whose relationship with the 24-hour SP is superior). In accordance with these criteria, five AV have been chosen:

- Vertical velocity 700 hPa (WSN $r = -0.29$). It is the engine that produces the precipitation mechanism. It can be associated with several phenomena: thermal instability, relief, low pressure system.
- Geopotential height 700 hPa (WSN $r = -0.29$). The geopotential makes it possible to guess the center of actions (low pressure or high pressure) and implicitly the lift or the subsidence of the air mass.
- Specific humidity 700 hPa (WSN $r = 0.31$). It is the water content of the air mass, therefore the raw material of precipitation.
- Air temperature 850 hPa (WSN $r = -0.23$). This physical quantity is directly linked to the production of precipitation in solid form. Indeed, sufficiently low temperatures (≤ 0 °C) are necessary to form the SP.
- V component of the wind 700 hPa (WSN $r = 0.39$). This is the meridional component of the wind. This variable is highly correlated with the 24-hour SP and shows the importance of the origin of the air mass in the mechanism of production.

Table 4 : Results of the correlation (r) tests.

AV	Levels	Time steps	ISOLA	AU- RON	VAL- BERG	ES- TENC	VAL- C.	WSN
Geopotential	500 hPa	18h UTC	-0,27	-0,24	-0,19	-0,28	-0,24	-0,24
Geopotential	700 hPa	18h UTC	-0,31	-0,27	-0,29	-0,33	-0,27	-0,29
Geopotential	850 hPa	18h UTC	-0,28	-0,26	-0,29	-0,34	-0,25	-0,28
Specific humidity	500 hPa	18h UTC	0,22	0,27	0,23	0,25	0,18	0,23
Specific humidity	700 hPa	18h UTC	0,30	0,31	0,35	0,32	0,26	0,31
Specific humidity	850 hPa	18h UTC	0,08	0,09	0,09	0,13	0,05	0,09
Air temperature	500 hPa	18h UTC	-0,11	-0,05	-0,08	-0,07	-0,10	-0,08
Air temperature	700 hPa	18h UTC	-0,17	-0,14	-0,15	-0,14	-0,15	-0,15
Air temperature	850 hPa	18h UTC	-0,25	-0,22	-0,22	-0,22	-0,23	-0,23
U-Component-Wind	500 hPa	18h UTC	0,02	0,12	0,09	0,15	0,02	0,08
U-Component-Wind	700 hPa	18h UTC	-0,08	-0,03	-0,02	0,03	-0,07	-0,03
U-Component-Wind	850 hPa	18h UTC	-0,26	-0,27	-0,25	-0,16	-0,19	-0,23
V-Component-Wind	500 hPa	18h UTC	0,37	0,37	0,36	0,36	0,35	0,36
V-Component-Wind	700 hPa	18h UTC	0,33	0,43	0,41	0,42	0,37	0,39
V-Component-Wind	850 hPa	18h UTC	-0,08	0,25	0,14	0,10	-0,08	0,07
Vertical velocity	500 hPa	18h UTC	-0,08	-0,11	-0,12	-0,13	-0,09	-0,11
Vertical velocity	700 hPa	18h UTC	-0,23	-0,28	-0,29	-0,32	-0,35	-0,29
Vertical velocity	850 hPa	18h UTC	-0,15	-0,02	-0,04	0,04	0,20	0,01
Surface pressure	Surface	18h UTC	-0,29	-0,27	-0,29	-0,34	-0,24	-0,29
M.S level pressure	Surface	18h UTC	-0,23	-0,20	-0,25	-0,32	-0,20	-0,24
2 m air temperature	Surface	18h UTC	-0,09	-0,07	-0,11	-0,01	-0,16	-0,09

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Sea temperature	Surface	18h UTC	-0,08	-0,02	-0,01	0,04	-0,07	-0,03
-----------------	---------	---------	-------	-------	-------	------	-------	-------

3.2.2 Mean configurations of the atmospheric variables per classes of solid precipitations

The role of each AV in the SP production mechanism is different. The geopotential height 700 hPa, the V component of the wind and the vertical velocity, are the reflection of the movement of an air mass. The behaviour of these AV are determined by the surface temperature and the pressure gradients which act on air mass transport. The specific humidity partly controls the intensity of the SP, since it is characterized as the raw material. Finally, the air temperature affects the state of the precipitation, which becomes solid if the atmosphere is equal to or below 0 °C.

The mean configurations per classes of SP of the geopotential height 700 hPa (cf. Figure 6), specific humidity 700 hPa (cf. Figure 7) and air temperature 850 hPa (cf. Figure 8) are presented, while those of the vertical velocity 700 hPa and the V component of the wind 700 hPa are respectively available in Fig.S1 and Fig.S2.

Figure 6 present a southwest cyclonic circulation, with a trough centered from Great Britain to the Mediterranean. This trough is accentuated when passing from one class to another. The specific humidity 700 hPa (cf. Figure 7), shows a North of Europe relatively dry, with around 1.2 to 1.5 g/kg of moist air. On the other hand, in the South of France, the perimeter of the Mediterranean basin is humid, with values oscillating between 1.8 and 2.4 g/kg of moist air, in the case of the most intense events (SP3). Finally, the air temperature 850 hPa, indicates 0 °C close to the WSN (cf. Figure 8). In the case of SP2 and SP3, this cold air is surrounded by warmer air, which could also strengthen the convection mechanism of the air mass from the Mediterranean Sea, by a confrontation between cold air and warm air, synonymous with thermal instability.

The mean configurations of the predictors per class of SP were presented. The next part is interested in the results of the classification of the AV fields. How well do these mean configurations per class of SP, match with the mean configurations of the ACT?

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

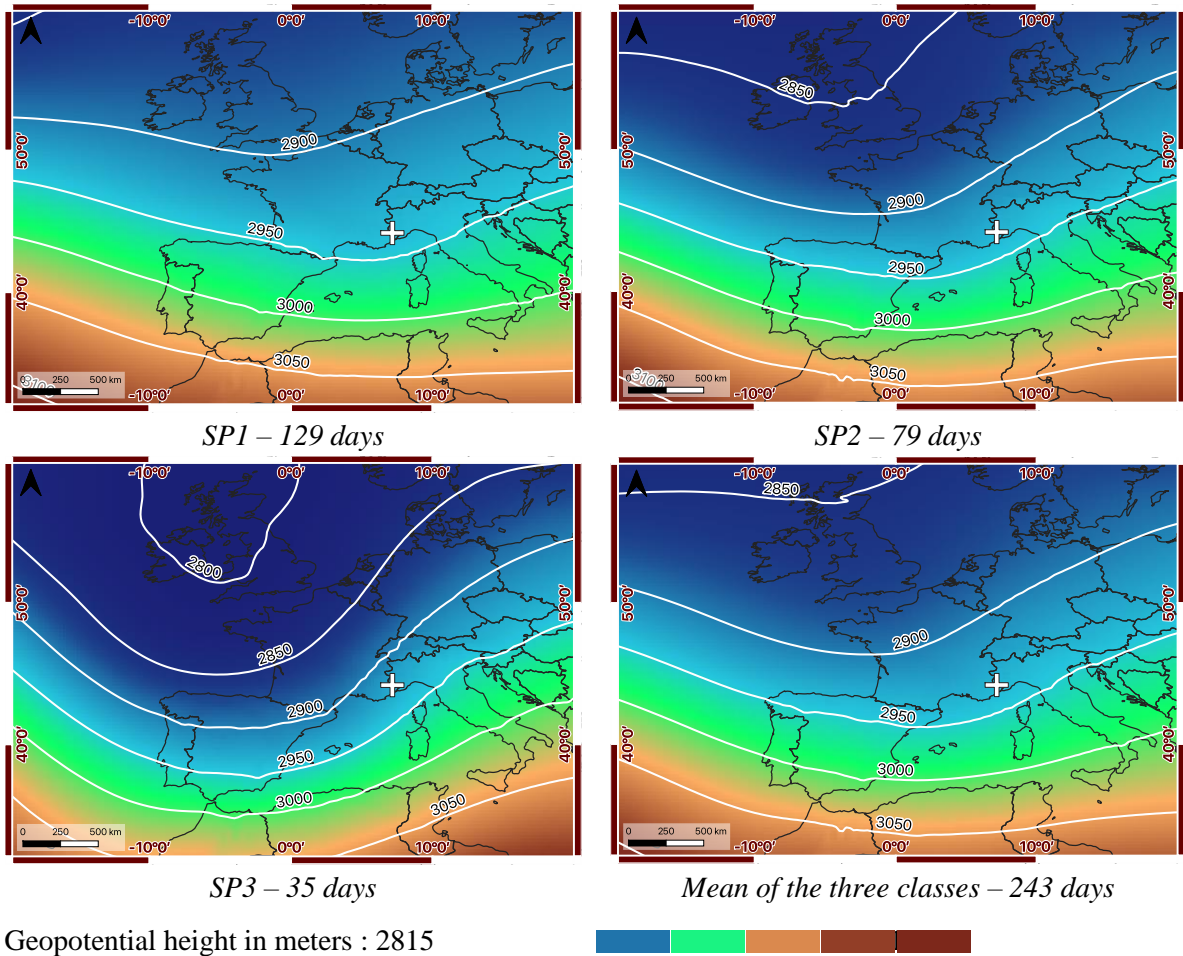
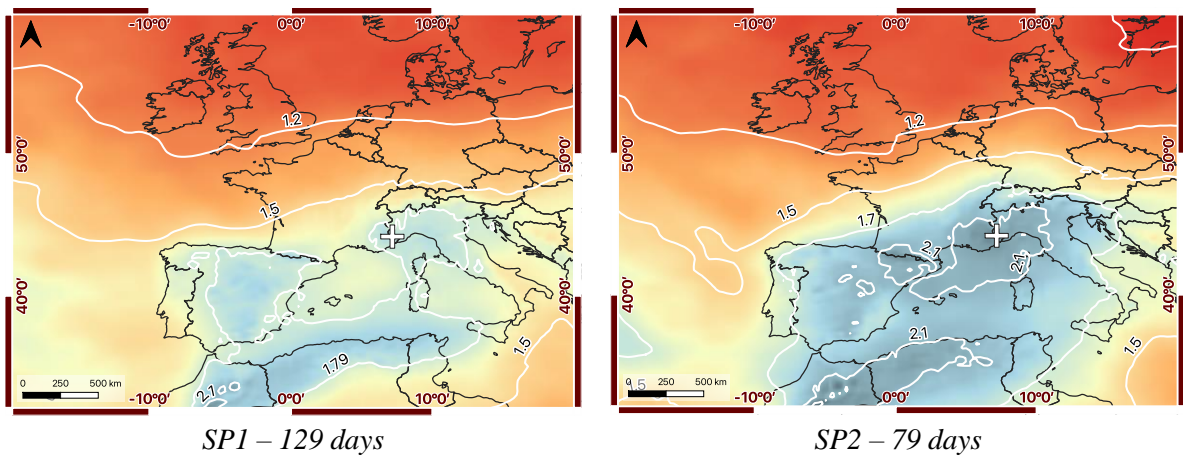
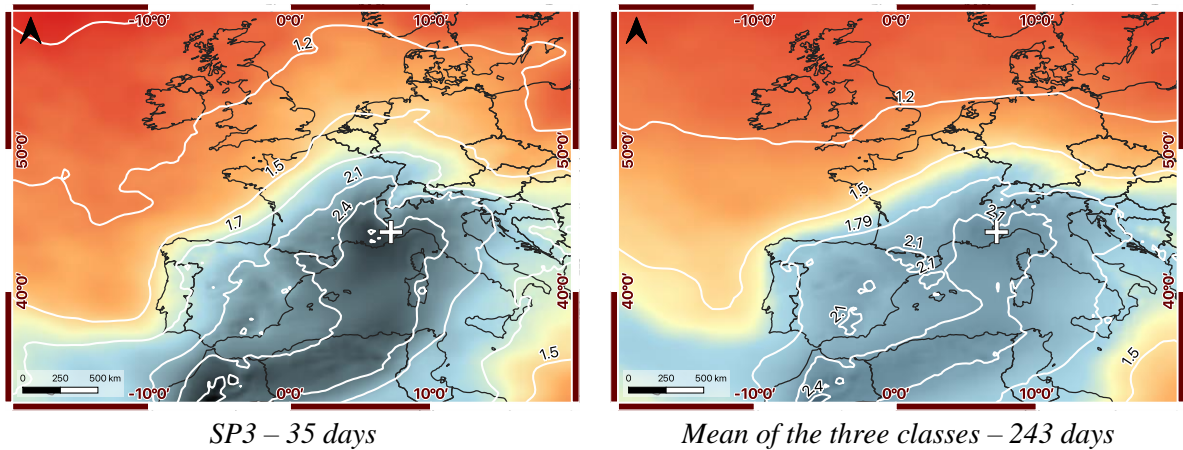


Figure 6: Mean configurations of the geopotential height 700 hPa for the three SP classes (ECMWF-ERA5). The white cross corresponds to the location of the WNS.



CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.



3.3 Classification of the atmospheric variables fields

This part concerns the result of the classification computed by PCA and HCA on the five AV fields provided by the ERA5 reanalysis and chosen according to the correlation tests (cf. Part 3.2.1). The main objective is to obtain ACT specific to the SP. As a reminder, two classifications were carried out, a first from 1997 to 2019 (DJFMA) which serves as a control classification, then a second from 1950 to 2019 (DJFMA), which makes it possible to analyze the evolution of atmospheric conditions specific to SP over a long period of time (70 years).

3.3.1 Principal Component Analyze on the atmospheric variables fields

The PCA covers 70 years (1950-2019 DJFMA) and has a total of 10 708 days. The five data matrix (1 785 grid points x 10 708 days for each AV) is subjected to a PCA. According to the rule of Kaiser 67 PC are retained (cf. Table 5) and form a new matrix of 67 columns and 10 708 rows. This matrix will be used in the HCA. It is usually preferable to keep a larger number of axes to cover at least 80 to 90 % of the variance (Martin & Saintignon, 1974). Thus, for the five variables this threshold is respected.

Table 5: Number of principal components selected (Kaiser's rule) in the PCA.

AV	Number of PC	% of the variance
Geopotential height 700 hPa	9	83
S. Humidity 700 hPa	16	91
Air temperature 850 hPa	12	84
V component of W. 700 hPa	11	89
Vertical velocity 700 hPa	19	92
Total	67	

3.3.2 Hierarchical Clustering Analyze on the atmospheric variables fields

Following the PCA a new table of data is obtained, and it contains the 67 selected components in columns and the 10 708 days (1950-2019 DJFMA) in rows. It is therefore a question of discretizing the 10 708 days into several classes of synoptic conditions, or in other words, it is a question of producing the ACT. Indeed, an HCA is carried out according to the method of Ward. The choice of the number of classes is established following the dendrogram (cf. Figure 9) and the jumps of inertia (cf. Figure 10), in total, six classes are retained. There is no single ideal level of cut of the hierarchical tree, because the different levels correspond to an increasingly detailed point of view of the grouping. Nevertheless, when the inertia jump on the axis from one grouping to another is strong, it is considered that the separation of the groups is all the better (Chesnezu, 2021). There is a final jump in inertia on the class number 6, which gives credibility to the chosen grouping.

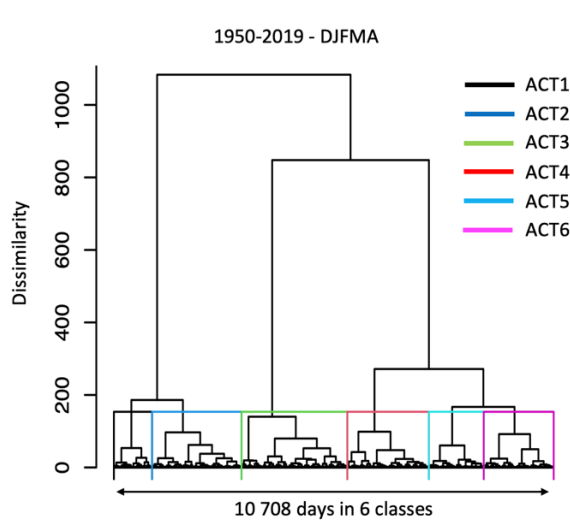


Figure 9: Classification tree of the HCA for the five AV coming from the ERA5 reanalysis.

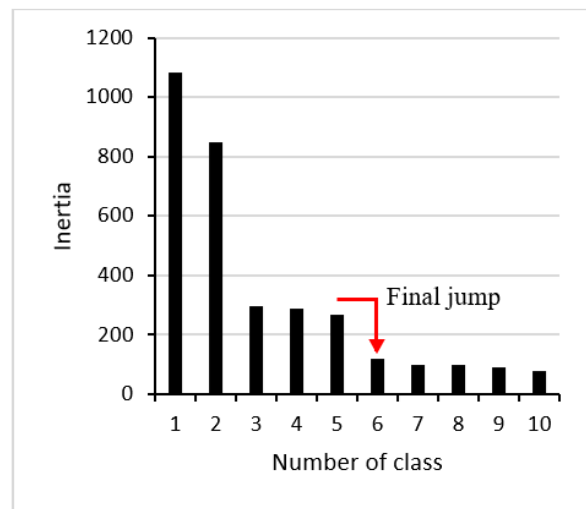


Figure 10: Jumps of inertia of the HCA.

3.3.3 Mean configurations of the atmospheric circulation types

The combination of the PCA and the HCA gave six classes (cf. Table 6) of days with similar atmospheric circulation patterns (ACT). The number of days per ACT class is quite similar from one group to another [1522; 2158]. ACT5 is the one with the most days (2158), while ACT 6 is the one with the fewest (1522).

Table 6: Synthesis of the classification of reanalysis fields.

ID	Type of circulation	Number of days (1950-2019 DJFMA)	Percent of days
ACT1	Depression over Central Europe (DCE)	1582	15
ACT2	Northwest anticyclonic (NWA)	1818	17
ACT3	South, trough on Western Europe (STW)	1815	17
ACT4	West cyclonic (WC)	1813	17
ACT5	West anticyclonic (WA)	2158	20
ACT6	Southwest anticyclonic (SWA)	1522	14

The mean configurations (average of all days belonging to the class) are presented for the six ACT (cf. Figure 11, 12 and 13). These maps can be compared to the mean configuration of the predictors per classes of SP (cf. Figure 6, 7 and 8), to see if the classification has succeeded in the reproduction of an ACT specific to SP and will make it possible to qualify the reversibility of the approach. The mean configurations per classes of ACT of the geopotential height 700 hPa (cf. Figure 11), specific humidity 700 hPa (cf. Figure 12) and air temperature 850 hPa (cf. Figure 13) are very demonstrative (those of the vertical velocity 700 hPa and the V component of the wind 700 hPa are respectively available in Fig.S3 and Fig.S4).

The six ACT cover all the synoptic configurations, from the low-pressure situation to the high blocking over the whole of Europe. The ACT1 appears as a depression over central Europe (DCE), characterized by low altitudes of the geopotential height 700 hPa (values are

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

close to 2800 meters over the WSN) and a low-pressure trough, which extends from the Baltic Sea to Corsica. The air is dry on the North of Europe and the Mediterranean basin, with values close to 1.2 g/kg of moist air on the WSN. The air temperature is very cold, with -2 °C to -6 °C on France.

The ACT2 corresponds to a northwest anticyclonic (NWA) circulation, with a ridge to the west of France, which extends from the Canary Islands to Brittany and a low-pressure trough to the East. The specific humidity is low with 0.9 to 1.2 g/kg of moist air on the WSN. The air is cold in France, with temperature between 0 °C to -4 °C.

The ACT3 is a southern cyclonic circulation with a trough on the Western of Europe (STW). It is marked by a low-pressure area over the British islands and a low-pressure trough centered northwest-southeast, going from the British islands to the Balearic Islands. The direction of the flow is SW, with a high level of specific humidity (2.1 to 2.4 g/kg of moist air throughout the Mediterranean basin). The air temperature is close to 0 °C on the WSN, surrounded by slightly higher values of 2 °C.

The ACT4 has the characteristics of a west cyclonic (WC) circulation, with a rapid flow in altitude, as shown by the tightening of the isohypses. The specific humidity (1.8 g/kg of moist air) and the air temperature (2 °C) are medium over France in comparison to the other ACT.

The ACT5 is a west anticyclonic (WA) circulation, with an anticyclone centered on the Balearic Islands and a powerful ridge centered southwest-northeast, which extends from the Maghreb to Switzerland. The anticyclonic blocking situation leads to an almost total cut off, of the west circulation over Europe, the air here is therefore stable, warm (6 °C above the WSN) and dry (0.9 g/kg of moist air above the WSN).

Finally, the ACT6 is understood as a southwest anticyclonic (SWA) circulation, whose anticyclonic ridge extends from Libya to Hungary. The humidity is quite high, with values around 2.4 to 2.7 g/kg of moist air on the South of France. The air temperature is warm with 4 °C to 6 °C above the WSM.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

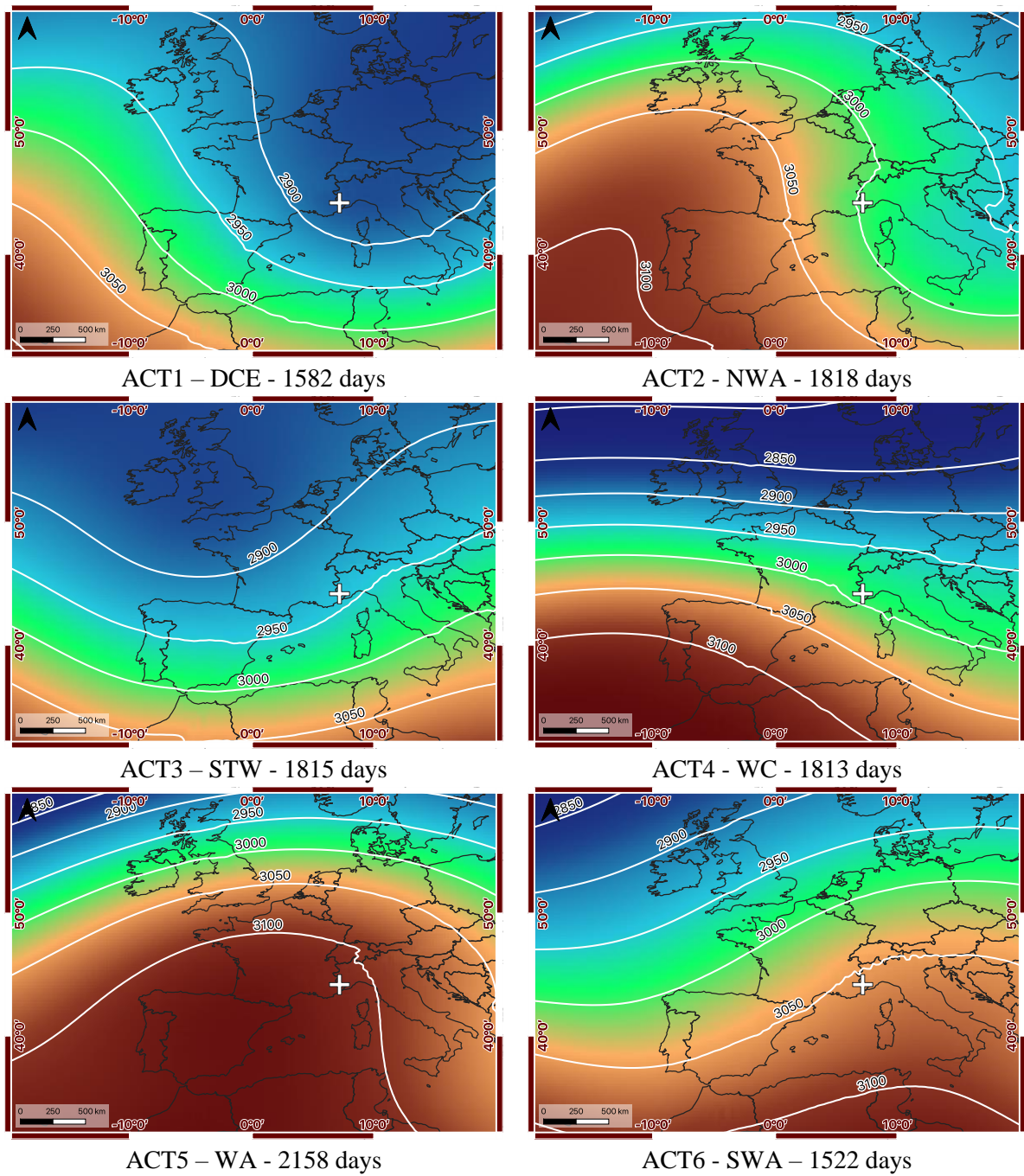


Figure 11: Mean (1950-2019 DJFMA) configurations of the geopotential height 700 hPa for each class of ACTs (ECMWF-ERA5). The white cross corresponds to the WSN.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

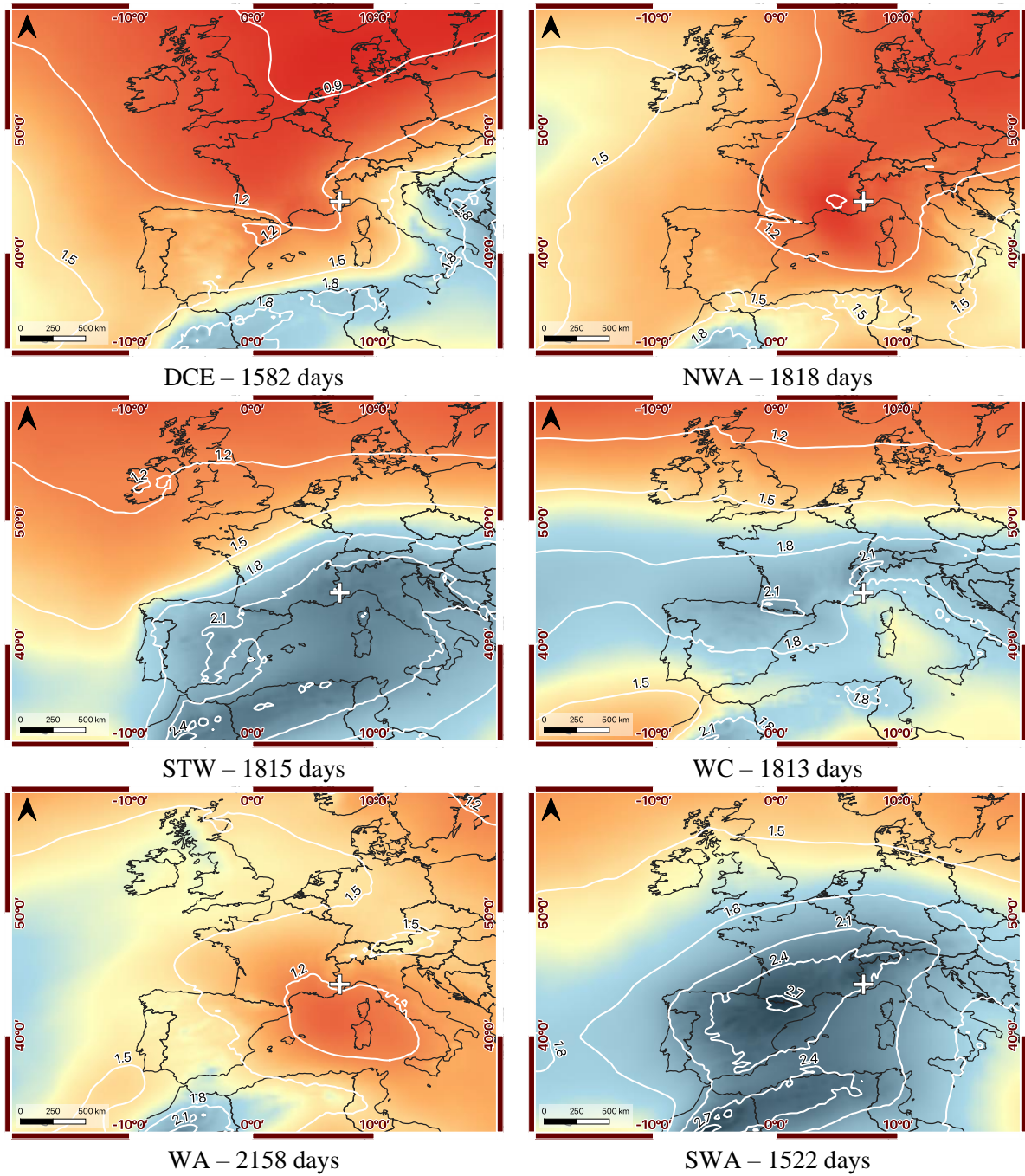


Figure 12: Mean configurations (1950-2019 DJFMA) of the specific humidity 700 hPa for each class of ACTs (ECMWF-ERA5). The white cross corresponds to the WSN.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

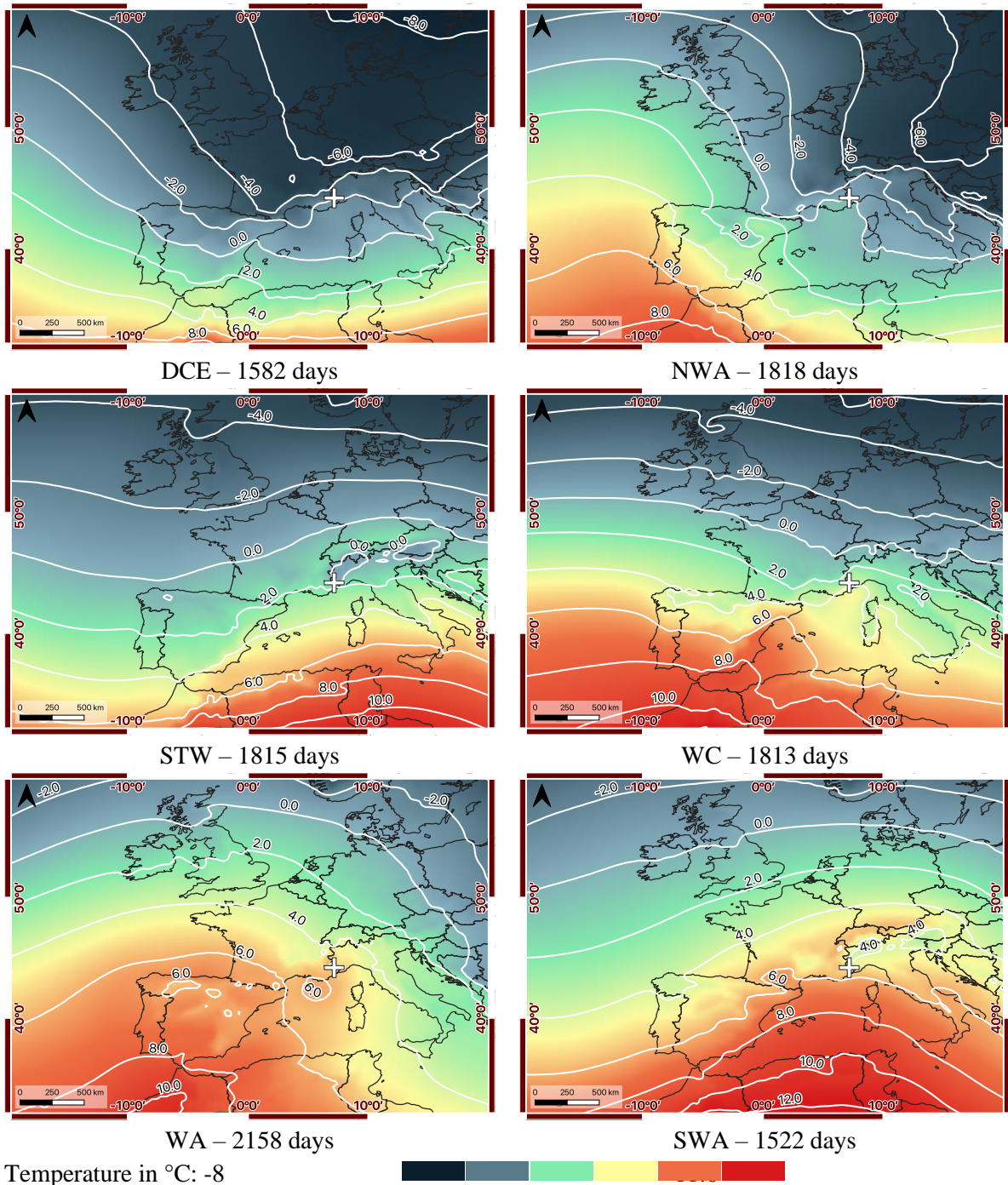


Figure 13: Mean (1950-2019 DJFMA) configurations of the air temperature 850 hPa for each class of ACTs (ECMWF-ERA5). The white cross corresponds to the WSN.

3.4 Association between the classes of solid precipitations and the ACT

3.4.1 Similarity in circulation patterns

The comparison between the mean configurations per class of SP (cf. Part 3.2.2) and the mean configuration per ACT (cf. Part 3.2.3), shows that the STW correctly reproduces the circulation patterns in case of snowy days. Indeed, in both cases, a south cyclonic circulation with a trough over the Western of Europe is observed. Table 7 presents the mean deviation

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

values for the geopotential height 700 hPa and the specific humidity 700 hPa, between the mean configurations for the three classes of SP and the mean configuration for the STW. The comparison is made on these two variables since they are the representation of the movement of the air mass and the raw material of the SP. The evaluation is done on a widened zone around the WSN (cf. Fig.S5) and show small deviations between the datasets (6 meters for the geopotential and 0.12 g/kg for the specific humidity). Also, it is found that the 1950-2019 classification is more efficient (lower difference) than the control classification (1997-2019). It seems like the longer temporal extension of the 1950-2019 classification brings more stability to the ACT produced.

Table 7 : Evaluation of the deviations for the geopotential and the specific humidity between the mean configurations by SP classes and the mean configuration of STW.

Type of configurations	Period	Geopotential 700 hPa	Specific humidity 700 hPa
SP (mean of SP1, SP2 and SP3)	1997-2019	2937 hPa	2.18 g/kg
STW (classification control)	1997-2019	2947 hPa	2.04 g/kg
STW	1950-2019	2943 hPa	2.3 g/kg

3.4.2 Association between the classes of solid precipitations and the ACT

Figure 14 presents the 243 SP, associated with each ACT, between 1997 and 2019, and figure 15 corresponds to the total amount of SP (fell in 24 hours) associated with each ACT. These two figures are the second criteria to validate the efficiency of the classification specific to SP. It is clearly perceived the role of the STW, which leads 150 SP (62 %) and an amount of 2 562 cm (out of 3 285 cm in total). The STW is also associated with 72 % of the SP2 and 100 % of the SP3. DCE is the second most productive class, with 59 SP (24 %), and an amount of 459 cm. NWA and WC, are not very productive with respectively 13 and 21 SP (amount of less than 190 cm). Finally, WA and SWA produce no SP. These two classes are the opposite extreme of STW, since they offer some synoptic conditions very unfavorable to the SP.

There is therefore a statistical link between STW and the 24-hour SP, as shown in Figure 16, which represents the seasonal number of days of occurrence (orange curve) of STW and the seasonal amount of snow caused by the 24-hour SP (blue curve) at the Isola 2000 weather station (Isola 2000 is the only station of the WSN to have some SP measured since 1985). The two curves follow the same dynamic, for example, the decrease in the seasonal amount of SP observed at Isola 2000 between 1990 to 1995, corresponds to the decrease in the occurrences of STW. The r has a score of 0.75 (the two series of data have a Gaussian function), which shows a positive linear relationship between the two variables.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

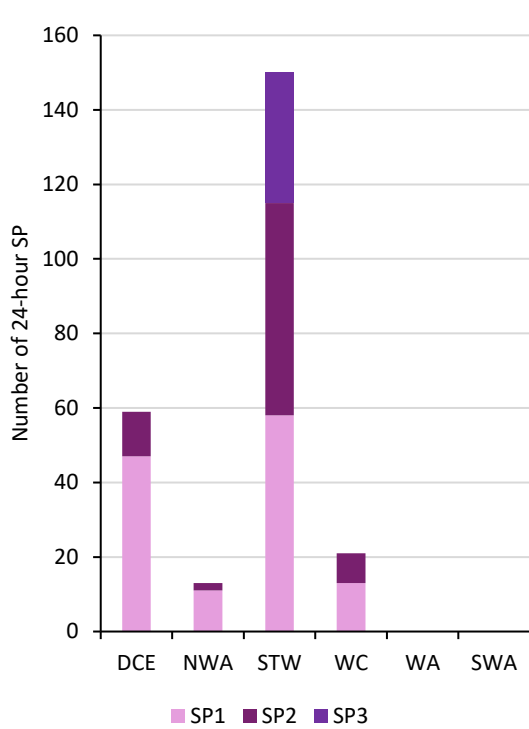


Figure 14: Total number (1997-2019 DJFMA) of 24-hour SP per ACT classes (Météo-France, ECMWF-ERA5).

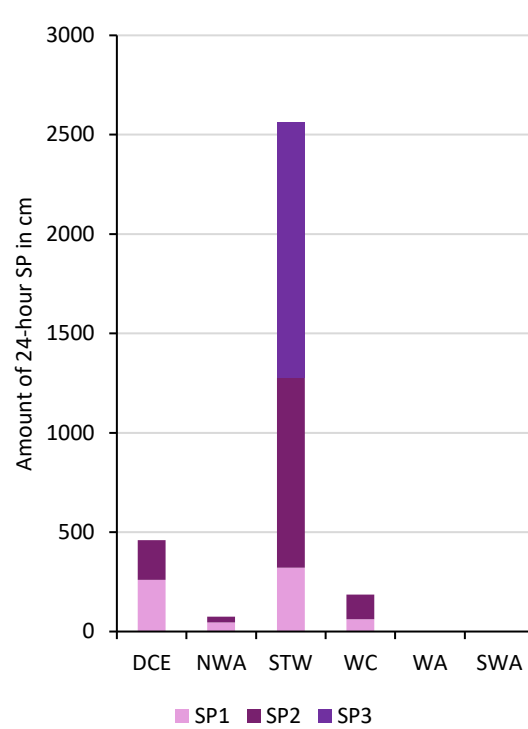


Figure 15: Total amount (1997-2019 DJFMA) of 24-hour SP per ACT classes (Météo-France, ECMWF-ERA5).

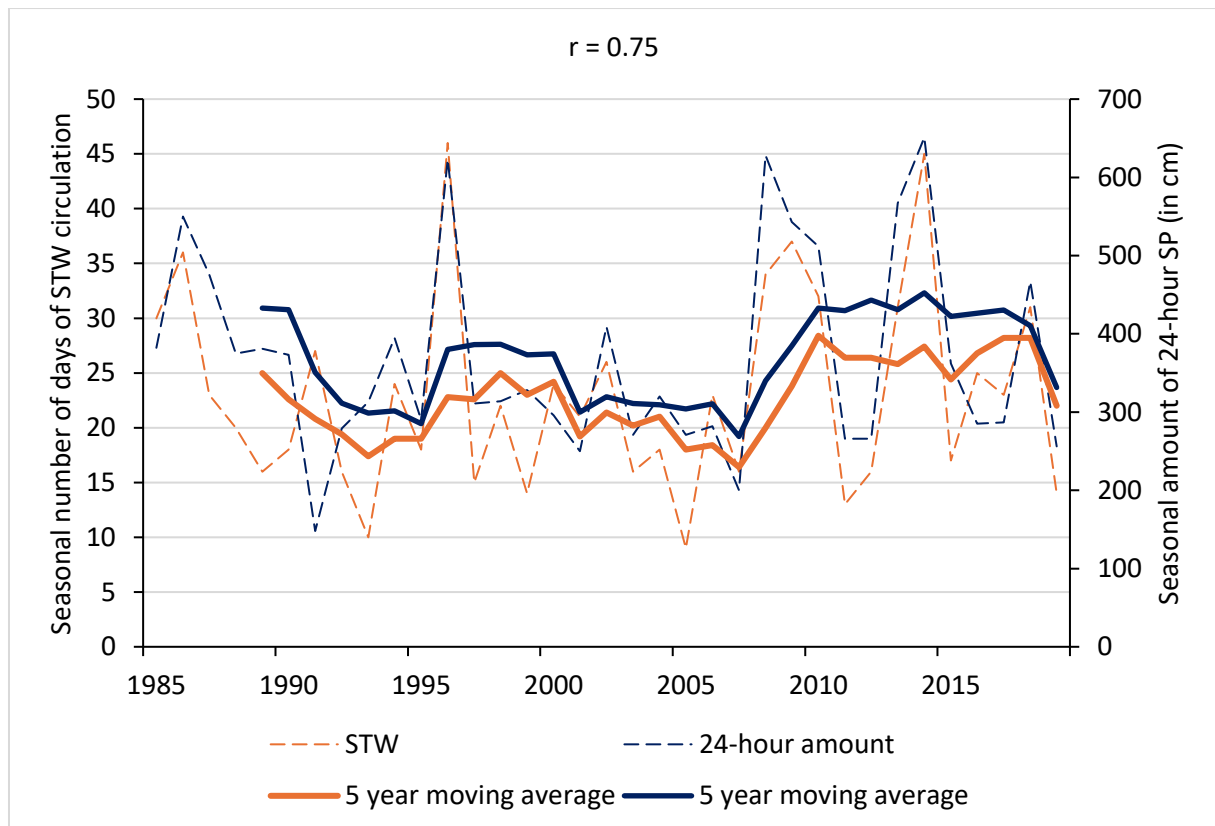


Figure 16: Statistical relationship between the seasonal number of STW circulation and the seasonal amount of 24-hour SP at Isola 2000 (Météo-France, ECMWF-ERA5).

3.5 Evolution of the occurrence of the atmospheric circulation types

3.5.1 Frequency of the atmospheric circulation types

The two synoptic circulations that produced a large majority of the 24-hour SP are STW and DCE. Conversely, the WA and SWA did not produce any SP events. The multi-decadal evolution of the total number of days per season and the anomalies (average of the total period – average of the decade) of these four classes was calculated (cf. Figure 17). The Mann-Kendall (MK) test is applied to each series to ensure the significance of the results (Mann 1945, Kendall 1975, Gilbert 1987) and all the linear trends presented below validated this test.

The multi-decadal evolution of DCE, shows a decrease. The 70-year trend remains largely downward as illustrated by the trend line. In addition, the last three decades (1990-1999, 2000-2009, 2010-2019) show negative anomalies, more marked for the decade 1990-1999, with a decrease of 9 days.

The multi-decadal evolution of STW, shows an increase during the decades 1950-1959, 1960-1969 and 1970-1979, with a maximum of 346 days for 1970-1979. STW follows a sharp drop for the decades 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 and 2010-2019. The 70-year trend is downward. Also, the decade 1990-1999 is the one with the most marked negative anomaly, with on average 5 days.

The WA follows the reverse logic, with a steady decrease for the decades 1950-1959, 1960-1969 and 1970-1979, which drops to a minimum of 218 days. Then, it follows an increase for the decades 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 and 2010-2019, with a maximum of 415 days for 1990-1999 and a positive anomaly of 11 days. Thus, the 70-year trend shows an increase in its occurrence, as illustrated by the trend line.

Finally, the SWA shows a clear increase during the period 1960- 2019. The 2010-2019 decade shows the most marked positive anomaly with an average of 4 days.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

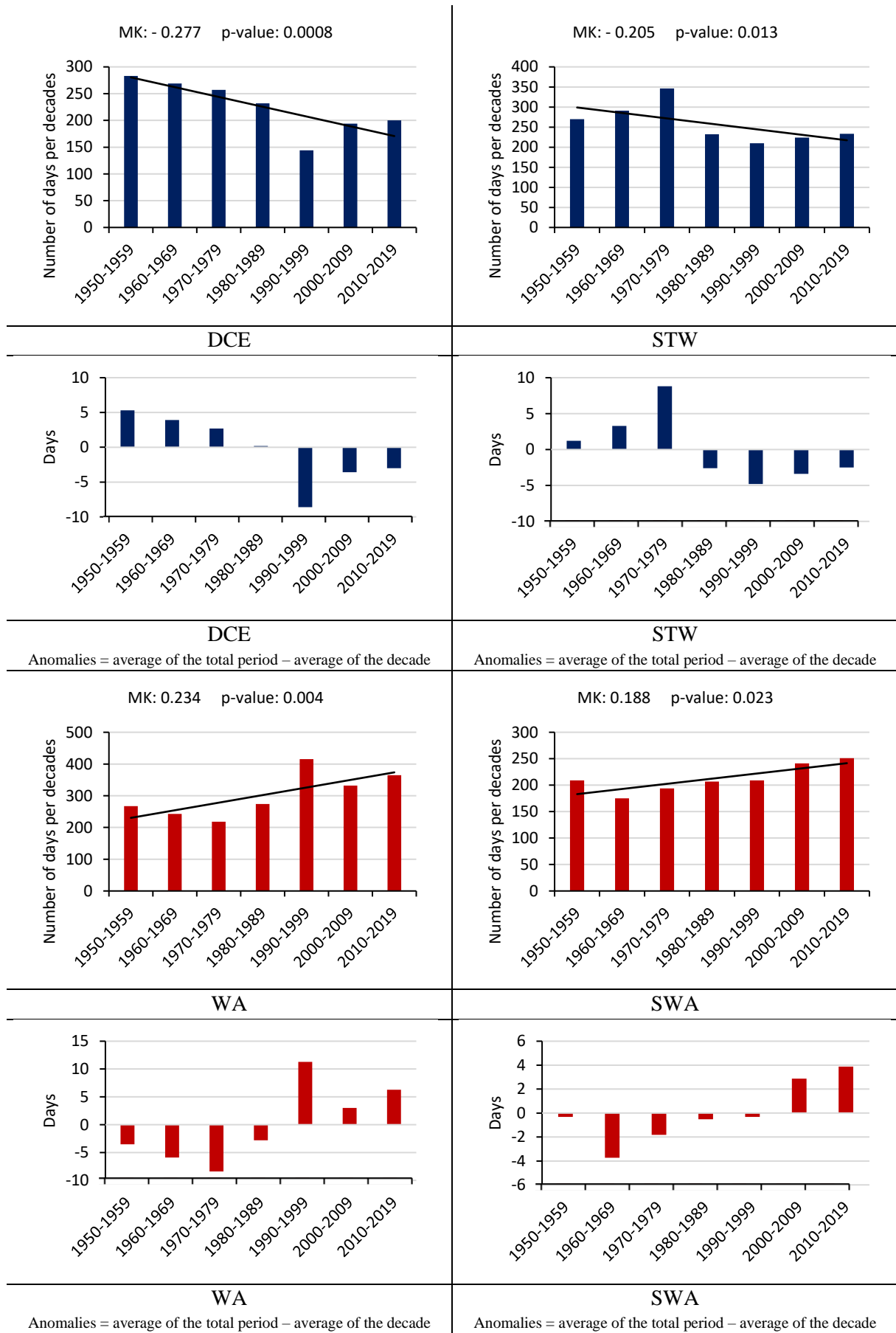


Figure 17: Multi-decade evolution of the ACT.

3.5.2 *Internal variability of the atmospheric circulation types*

The internal variability of the ACT corresponds to the persistence in number of consecutive days of the class when it is established. This is a second indicator which makes it possible to observe the weakening or not of a class over time. This variability is calculated for the four ACT, then an MK test is applied. Only WA showed a significant positive trend (cf. Figure 18). This class has strengthened over the past 70 years, going from an average of 3 consecutive days to around 4 consecutive days.

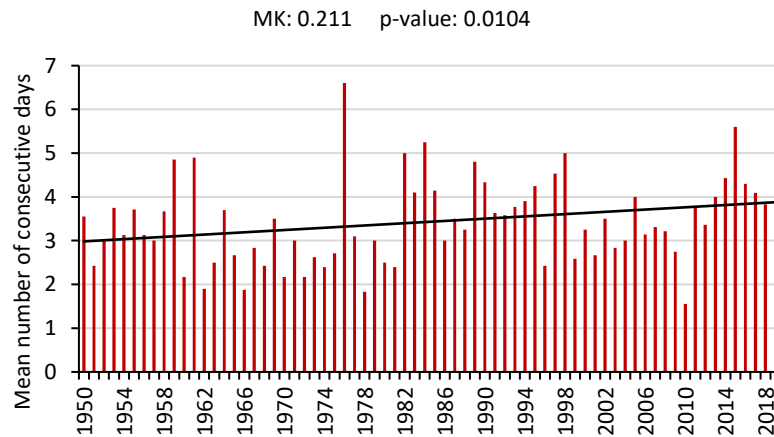


Figure 18: Mean seasonal number of consecutive days for the WA.

4. Discussion and interpretation of the results

4.1 *Method of classification used*

The weather and climate of the South of France are controlled by the large-scale extratropical atmospheric flow of which mid-latitude westerly jet streams are key components (Woollings et al., 2010). To study regional impacts and long-term changes in atmospheric circulation in Europe, the large-scale flow is commonly classified into different circulation types (Demuzere et al., 2011; Kučerová et al., 2017).

In the scientific literature several classification methods are used. Huguenin et al. (2020), who seek to predict the evolution of atmospheric circulation types until 2100 over Europe, carry out a classification using the Grosswetter type method (just like Beck et al., 2007). In this method, atmospheric variables are extracted and then classified from a few grid points in the European area. A different approach was initiated in this study, in order to intersect the synoptic scale with the regional scale and take into account local singularities. This is why the choice was made to use 1 785 grid points of extraction in total, with a more accentuated resolution over the study area. Martin (2008), in his classifications of atmospheric circulations in the South of France, used a similar approach with success. Additionally, the Grosswetter type is also used as part of the Hess and Brezowsky (1952) classification. However, previous research (Guerin & Martin, 2023) has shown that this classification tends to overestimate the number of circulations specific to SP for the extreme Southeast of France.

Tomczyk et al. (2017), classified the synoptic configurations leading to heat waves in three countries (Spain, Portugal and France) with the help of 3 reanalysis fields: geopotential height 500 hPa, temperature 850 hPa and pressure at sea level. The idea of using several atmospheric parameters to carry out a classification was reused in the methodology applied to this study. On the other hand, Tomczyk et al. (2017) did not carry out a correlation test between the variable of interest and the atmospheric variables, because the extent of their study area did not allow this to be done. In this work, a correlation step was included to ensures that the classification is computed with statistical links between the AV and the SP.

Boé et al. (2008) in their work on the weather regimes and downscaling of liquid precipitation in France, made the choice of a classification using the Kmeans algorithm. Esteban et al. (2005) determined the synoptic situations responsible for heavy SP in Andorra in the Pyrenees using a combination of a Principal Component Analysis (PCA) and a Kmeans clustering to obtain a synoptic classification of days with heavy SP. Capozzi et al. (2022) in the Italian Apennines, Irannezhad et al. (2017) in Finland or even Merino et al. (2014) in Spain, carried out similar works. In this study a classification with hierarchical clustering (allowed by the use of a PCA in order to reduce the dataset) was applied. Martin (2008) notably reports the reasons for prioritizing an HCA over a kmeans-type classification. Indeed, the advantage of the HCA is to obtain a hierarchy of partitions and thus to choose the optimal number of classes. This is why, to adjust the methods and variables to the territory, it was decided to use an HCA to avoid using a classification leaving room for a certain subjectivity in the choice of the number of classes.

4.2 Robustness of the classification

The classification (DJFMA, 1950-2019) of the atmospheric circulation specific to the SP computed six different ACT, including two synoptic classes of SP (STW and DCE), and two dry classes (WA and SWA). It is clearly perceived the role of the STW in the occurrence of the 24-hour SP, because it leads 150 SP (62 %) and an amount of 2 562 cm (out of 3 285 cm in total). The STW is also associated with 72 % of the SP2 and 100 % of the SP3. In addition, the comparison between the patterns of circulation per class of SP, with them for STW, shows small deviations between the two datasets around the WSN, with only 6 meters for the geopotential height 700 hPa and 0.12 g/kg for the specific humidity 700 hPa. It is not surprising to observe a statistical link between the occurrences of STW and the 24-hour SP ($r= 0.75$). Thus, the classification reproduces well the atmospheric conditions that lead to the SP, especially for the SP2 and SP3, which are the most important events in the recharge of the natural snow cover for human economic activities (damage for ski resorts). The method used is reliable and reproducible for other geographical areas since it is based on local statistical relationships.

4.3 Statistical link with the atmospheric variables

The classification is built on the statistical links between five AV and the 24-hour SP over the DJFMA 1997-2019 period, by using some correlation tests, then it is computed and studied over the period 1950-2019. So, it is assumed that the statistical links for the period

1997-2019 are unchanged and remains the same for the previous period 1950-1996. To ensure the significance of the 1950-2019 classification, a control classification was first carried out over the 1997-2019 period. The latter served as a model and made it possible to observe that the results remained robust in both cases. It was even found that the 1950-2019 classification had lower difference in the deviation in the patterns of circulation than the control classification. The temporal extension is longer and brings more stability to the ACT produced. Ideally, it would have been wiser to carry out correlation tests and classification over the entire period 1950-2019, unfortunately the WSN did not allow for such a long common study period.

4.4 Evolution of the patterns of circulation and climate in the South of France

The evolution of the seasonal occurrence of STW and DCE showed a negative trend, while WA and SWA obtained a positive trend. A certain natural variability seems to be behind this modification, as already evoked in the scientific literature. For example, Capozzi et al. (2022), explained that the reverse trend of the Arctic Oscillation (AO) index and the prevalence of a neutral or negative Eastern Atlantic Western Russia (EAWR) pattern, follow natural cycle and played an important role in the frequency of the SP in the Italian Apennine mountains.

However, in the case of the South of France, the seasonal variability of the ACT is weakly explained by the annular mode of variability. Indeed, correlation tests conducted between ACT and North Atlantic Oscillation (NAO) or AO, gave low r coefficients (NAO $r = 0.15$, AO $r = 0.26$). Another explanation for this variability could be related to the Hadley circulation. In fact, the latest IPCC report (chapter 8 of the 6th IPCC report, 2021) discusses aspects of large-scale atmospheric circulation that have likely changed since the mid-20th century. A part of this chapter concerns the Hadley circulation which has very probably broadened since at least the 1980s (Figure 2.17 of the report), and the tracks of extratropical storms have probably shifted towards the poles in both hemispheres. This phenomenon could lead to a move further north of the Azores anticyclone, which would therefore be more present at the latitude of the WSN and would have the impact of increasing the occurrence of WA and SWA and decreasing STW and DCE. However, recent work shows that although there is a trend towards the expansion of Hadley cells, more marked in the northern hemisphere (Studholme & Gulev, 2018), this differs depending on reanalysis used. Indeed, the ability of reanalysis to represent Hadley cell strength has been questioned in recent years (Chemke & Polvani, 2019; Mathew & Kumar, 2019).

Finally, the reasons for this probable expansion are not yet well defined. Analysis over previous centuries based on reanalysis, indicates that variations in the size and limit of Hadley cells could be the consequence of differences in insolation, or even linked to natural variabilities relating to positive and negative ENSO. It therefore seems too early to attribute this phenomenon to contemporary climate change and the consequences of greenhouse gas emissions.

Conclusion

This study focused on the relationship between the 24-hour Solid Precipitation (SP) measured in five Alpines stations of the Mediterranean region (French department of the Alpes-

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Maritimes), for the months of December, January, February, March, and (DJFMA), and the hourly Atmospheric Variables (AV), coming from the ERA5 reanalysis of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The 24-hour SP were classified into 3 classes of intensity: SP1 (2.6 cm), SP2 (16.9 cm), SP3 (38 cm).

The main objective was to obtain some Atmospheric Circulation Types (ACT - group of days with a similar atmospheric circulation pattern) reproducing the synoptic conditions causing the SP. The secondary objective was to study statistically the occurrence of the ACT, to define whether the synoptic conditions favorable to SP have evolved between 1950 and 2019. The classification computed (by a combination of a PCA and HCA) six ACT, including two SP classes (STW and DCE) and two dry classes (WA and SWA). Over the period 1997-2019 DJFMA, the south circulation with a trough on the Western of Europe (STW) has resulted 150 SP (62 % in total) and worked especially well on the SP2 (72 %) and the SP3 (100 %). The comparison between the patterns of circulation per classes of SP, with the pattern of circulation for STW, shows strong similarities and demonstrate the success of the approach. The depression over central Europe (DCE) produced 59 SP (24 % in total). Conversely, western anticyclonic (WA) and southwest anticyclonic (SWA) circulations did not produce any SP events.

The total seasonal number of days per decade of STW and DCE, shows a decrease for the period 1950 to 2019, while WA and SWA, indicate the opposite trends, with an increase for the same period. In addition, WA, has strengthened over the past 70 years, going from an average of 3 consecutive days, for around 4 consecutive days. Thus, synoptic configurations conducive to SP seem to be less frequent in favor of anticyclonic atmospheric configurations producing dry weather in the region. Part of the explanation for this phenomenon could be found in the spreading of the Hadley cell (which has very probably broadened since at least the 1980s) which pushes the Azores anticyclone further North. The Azores anticyclone rises more often in the latitude of southern France and favors the appearance of WA and SWA.

Finally, this increase in the frequency of anticyclonic circulation is a serious concern for the region with a real economic risk for the inhabitants of mountain territories, but also impacts on the hydrological cycle and even more a potential worsening of periods of drought. This classification universal and applicable to other areas, will be completed for the future period, which will confirm or invalidate the trend of recent decades. The same method will be produced with the AV coming from the data of the sixth Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6), to obtain the probable evolutions of the DCE, STW, WA and SWA classes until 2100.

3.6 SYNTHÈSE DU CHAPITRE 3.

Ce chapitre analyse les tendances historiques des circulations atmosphériques influençant les précipitations solides dans les massifs des Alpes-Maritimes, de 1950 à 2019 pour la saison allant de décembre à avril. Il commence par présenter les données ERA5, produites par l'ECMWF, qui fournissent des estimations horaires détaillées de nombreuses variables atmosphériques. Ces données sont cruciales pour la modélisation climatique en raison de leur précision et de leur cohérence.

La méthode de production des types de circulations atmosphériques inclut l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour réduire la dimensionnalité des données, suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) pour regrouper les jours en classes distinctes. Les

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

résultats montrent une diminution significative de la fréquence des jours avec une circulation cyclonique de sud (STW), favorable aux événements de neige. En parallèle, une augmentation des circulations anticycloniques à l'ouest (WA) et au sud-ouest (SWA), associées à des conditions sèches, a été observée. Ces changements sont potentiellement attribués à l'expansion latitudinale de la cellule de Hadley.

Ces tendances ont des implications importantes pour l'épaisseur et la durée du manteau neigeux, affectant le tourisme hivernal et la gestion des ressources en eau. La diminution des jours favorables aux chutes de neige et l'augmentation des circulations sèches pourraient entraîner des périodes de sécheresse plus sévères.

En conclusion, ce chapitre met en évidence les impacts climatiques significatifs sur les conditions nivales dans les Alpes du Sud et souligne la nécessité de stratégies d'adaptation appropriées. Face à ces évolutions climatiques et aux modifications des régimes atmosphériques influençant les précipitations solides, le chapitre suivant s'attardera sur les projections futures (CMIP6) des conditions nivales dans les Alpes du Sud. Il explorera en détail comment ces tendances actuelles pourraient évoluer dans un contexte de changement climatique, en s'appuyant sur des modèles climatiques de dernière génération pour anticiper les impacts à long terme sur les écosystèmes et les activités humaines dans cette région montagneuse.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE 3.

Ashcroft, L., Coll, J.-R., Gilabert, A., Domonkos, P., Brunet, M., Aguilar, E., Castella, M., Sigro, J., Harris, I., Unden, P., Jones, P., 2018. A rescued dataset of sub-daily meteorological observations for Europe and the southern Mediterranean region, 1877–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 1613–1635. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1613-2018>.

Barbier, B., 1982. L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports). *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 485-486, pp. 121-124.

Barrier, N., Tréguier, A.-N., Cassou, C., Deshayes, J., 2014. Influence des régimes de temps atmosphériques sur la circulation océanique de l'Atlantique Nord. *La Météorologie, Météo et Climat*, 8(87), pp. 38-44.

Barry, R., & Gan, T., 2022. Snowfall and snow cover. In *The Global Cryosphere: Past, Present, and Future* (pp. 15-86). Cambridge: Cambridge University Press.

Baur, F., 1928. *Korrelationsrechnung (calculation of correlation)*. Leipzig and Berlin: B. G. Teubner. 57 pp.

Beck, C., Jacobeit, J., Jones, P.D., 2007. Frequency and within-type variations of large-scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in Central Europe since 1780. *International Journal of Climatology*, 27, 473–491. <http://doi.org/10.1002/joc.1410>.

Beniston, M., 2012. *Climate Change and Impacts: From Global to Local. Advances in Global Change Research (AGLO, volume 19)*. ISBN: 978-1-4020-2346-0.

Berard-Chenu, L., François, H., Morin, S., George, E., 2022. The deployment of snowmaking in the French ski tourism industry: a path development approach, *Current Issues in Tourism*. DOI: 10.1080/13683500.2022.2151876.

Boé, J., Terray, L., 2008. Régimes de temps et désagrégation d'échelle. *La Houille Blanche*, N°2 (Avril 2008), pp. 45-51.

Bokhorst, S., Pedersen, S.H., Brucker, L., 2016. Changing Arctic snow cover: A review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts. *Ambio*, 45, 516–537.

Capozzi, V., De Vivo, C., Budillon, G., 2022. Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015. *The Cryosphere*, 16, 1741–1763. <https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>.

Capozzi, V., et al., 2022. Méthodes de contrôle de la qualité des données de précipitations solides.

Carrega, P., 2004. « Avant-propos sur les « types de temps » », *Norois*, 191, 7-9.

Carrega, P., et al., 2021. Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes. *Physio-Géo*, 16, 70. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>.

Chemke, R., Polvani, L.-M., 2019. Opposite tropical circulation trends in climate models and in reanalyses. *Nat. Geosci.*, 12, 528–532. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0383-x>.

Chesneau, C., 2016. *Éléments de classification*. Master. France. {cel-01252973v4}.

Chiadjeu, O., Gratton, Y., St-Hilaire, A., 2016. *Analyse multivariée des paramètres morphologiques des lacs de la province du Québec*. Rapport No R1684, INRS-ETE, Québec (QC): vi + 23 p.

Chochon, R., Martin, N., Lebourg, T., 2021. Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes: atmospheric mechanisms and resulting rainfall. In: *SimHydro 2021 – Models for Complex and Global Water Issues-Practices and Expectations*. Sophia-Antipolis France, pp. 16–18. June 2021.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Copernicus Climate Change Service (C3S). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate.

Creusier, J., Biétry, F., 2014. Analyse comparative des méthodes de classifications. L'exemple du bien-être au travail. *RIMHE : Revue Interdisciplinaire Management, Homme & Entreprise*, 2014/1 (n° 10, vol. 3), p. 105-123. DOI : 10.3917/rimhe.010.0105. URL : <https://www.cairn.info/revue-rimhe-2014-1-page-105.htm>.

Croce, P., Formichi, P., Landi, P., Mercogliano, P., Bucchignani, E., Dosio, A., Dimova, S., 2018. The snow load in Europe and the climate change. *Climate Risk Management*, 20, 138-154.

Demuzere, M., Kassomenos, P., Philipp, A., 2011. The COST733 circulation type classification software: An example for surface ozone concentrations in Central Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 105(1), 143–166.

ECMWF, 2020. ERA5 Reanalysis dataset documentation.

Esteban, P., Jones, P.D., Martín-Vide, J., Mases, M., 2005. Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *Int. J. Climatol.*, 25, 319-329.

Franco, C., 2021. *Environmental History, The History of Tourism in the Mountains and the Construction of New Knowledge: A Study of the Architecture of Winter Sports Resorts in the French-Italian Alps*. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*.

François, H., Morin, S., Spandre, P., Lafaysse, M., Lejeune, Y., George-Marcelpoil, E., 2016. Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). *La Houille Blanche*, n° 4, 2016, p. 66-84.

Gilbert, R.O., 1987. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. Wiley, NY.

Guerin, G., Martin, N., 2022. Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps: Case of the Isola 2000 weather station. *Polar Science*. 10.1016/j.polar.2022.100922.

Guerin, G., Martin, N., 2023. Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification: case in the French department of the Alpes-Maritimes. *Bull. of Atmos. Sci. & Technol.*, 4, 2. <https://doi.org/10.1007/s42865-023-00056-5>.

Hanzer, F., Carmagnola, C.-M., Ebner, P.-P., Koch, F., Monti, F., Bavay, M., Bernhardt, M., Lafaysse, M., Lehning, M., Strasser, U., François, H., Morin, S., 2020. Simulation of snow management in Alpine ski resorts using three different snow models. *Cold Regions Science and Technology*, 172, 102995. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.102995>.

Hassler, B., Lauer, A., 2021. Comparison of reanalysis and observational precipitation datasets including ERA5 and WFDE5. *Atmosphere*, 12, 1462. <https://doi.org/10.3390/atmos12111462>.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

Hess, P., Brezowsky, H., 1952. *Katalog der Grosswetterlagen Europas*. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone*, 33.

Huguenin, M.F., Fischer, E.M., Kotlarski, S., Scherrer, S.C., Schwierz, C., Knutti, R., 2020. Lack of change in the projected frequency and persistence of atmospheric circulation types over Central Europe. *Geophysical Research Letters*, 47. <https://doi.org/10.1029/2019GL086132>.

IPCC, 2021. *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., Caud, Y., Chen, L., Goldfarb, M.I., Gomis, M., Huang, K., Leitzell,

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

E., Lonnoy, J.B.R., Matthews, T.K., Maycock, T., Waterfield, O., Yelekçi, R., Zhou, B.J. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Irannezhad, M., Ronkanen, A.-K., Kiani, S., Chen, D., Kløve, B., 2017. Long-term variability and trends in annual snowfall/total precipitation ratio in Finland and the role of atmospheric circulation patterns. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 143, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.008>.

Joye, J.-F., 2019. Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. Le point après l'annulation partielle du décret UTN. *Journal Spécial des Sociétés*.

Kaiser, H.F., 1961. A Note on Guttman's Lower Bound for the Number of Common Factors. *British Journal of Statistical Psychology*, 14, 1–2.

Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th edition. Charles Griffin, London.

Klein, G., 2018. Variabilité du manteau neigeux des Alpes Européennes entre 1950 et 2016 dans un contexte de changement climatique : revue bibliographique. *Climatologie*, 15, 22-45.

Kučerová, M., Beck, C., Philipp, A., Huth, R., 2017. Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *International Journal of Climatology*, 37, 2502–2521. <https://doi.org/10.1002/joc.4861>.

Kysely, J., Beguería, S., Beranová, R., Gaál, L., López-Moreno, J.-I., 2012. Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Global Planet. Change*, 98–99, 63–72.

Lastrada, E., Garzón-Roca, J., Cobos, G., Torrijo, F.J., 2021. A Decrease in the Regulatory Effect of Snow-Related Phenomena in Spanish Mountain Areas Due to Climate Change. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w13111550>.

Lavers, D.A., Harrigan, S., Prudhomme, C., 2021. Precipitation Biases in the ECMWF Integrated Forecasting System. *Journal of Hydrometeorology*, 22(5), 1187-1198.

Mahto, S.-S., Mishra, V., 2019. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JD031155>.

Mann, H.B., 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 163-171.

Marnezy, A., 2008. Alpine dams. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine [Online]*, 96-1. URL: <http://journals.openedition.org/rga/430>. <https://doi.org/10.4000/rga.430>.

Martin, N., 2008. La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes. *Géographie. Université Nice Sophia Antipolis*.

Martin, N., Carrega, P., 2011. L'enneigement dans les Alpes du sud en France : évolution temporelle et relation avec la circulation atmosphérique. *Actes du XXIVème colloque AIC, Rovereto septembre 2011*, pp. 387-392.

Martin, S., Saintignon, M.-F., 1974. Application de l'analyse factorielle en composantes principales à l'étude de la variabilité régionale et interannuelle des précipitations ardéchoises. *Revue de géographie de Lyon*, 49(1), 77-92. <https://doi.org/10.3406/geoca.1974.1638>.

Mathew, S.-S., Kumar, K.-K., 2019. Characterization of the long-term changes in moisture, clouds and precipitation in the ascending and descending branches of the Hadley Circulation. *Journal of Hydrology*, 570, 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.047>.

Merino, A., Fernández, S., Hermida, L., López, L., Sánchez, J.L., García-Ortega, E., Gascón, E., 2014. Snowfall in the northwest Iberian Peninsula: synoptic circulation patterns and their influence on snow day trends. *Scientific World Journal*. <https://doi.org/10.1155/2014/480275>.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Morin, S., François, H., Réveillet, M., Sauquet, E., Crochemore, L., Branger, F., Leblois, E., Dumont, M., 2022. Quantifying the hydrological disturbances induced by snow grooming and snowmaking in ski resorts: a case study in the French Alps. *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2022-1186>.

Nogueira, M., 2020. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, 583.

Nunnally, J.C., Bernstein, I.-H., 1994. *Psychometric Theory*. McGraw-Hill, New York.

Parker, W., 2016. Reanalyses and Observations: What's the Difference?. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97, 160128144638003. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1>.

Pathak, R., Sahany, S., Mishra, S.K., et al., 2019. Precipitation Biases in CMIP5 Models over the South Asian Region. *Sci Rep*, 9, 9589. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45918-6>.

Pédélaborde, P., 1956. La circulation générale de l'atmosphère. *L'information géographique*, 20(3).

Peña, J.-C., Schulte, L., 2019. Simulated and reconstructed atmospheric variability and their relation with large Pre-industrial summer floods in the Hasli-Aare catchment (Swiss Alps) since 1300 CE. *Global and Planetary Change*, 190.

Pettitt, A.-N., 1979. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Society: Series C (Applied Statistics)*, 28, 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>.

Piras, M., Mascaro, G., Deidda, R., Vivoni, E., 2016. Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. *Sci. Total Environ.*, 543.

Planchon, O., Cantat, O., Quénot, H., 2015. Types de temps et types de circulation atmosphérique : Essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège.

Poccard, I., 2000. Étude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses. Exemples d'application aux précipitations en Afrique tropicale. *Géographie*. Université de Bourgogne.

Silber, I., Verlinde, J., Wang, S.-H., Bromwich, D., Fridlind, A., Cadetdu, M.-P., Eloranta, E., Flynn, C., 2019. Cloud Influence on ERA5 and AMPS Surface Downwelling Longwave Radiation Biases in West Antarctica. *Journal of Climate*, 32. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0149.1>.

Smith, C.D., Ross, A., Kochendorfer, J., Earle, M.E., Wolff, M., Buisán, S., Roulet, Y.-A., Laine, T., 2020. Evaluation of the WMO Solid Precipitation Intercomparison Experiment (SPICE) transfer functions for adjusting the wind bias in solid precipitation measurements. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 4025–4043.

Stoffel, M., Corona, C., 2018. Future winters glimpsed in the Alps. *Nature Geosci.*, 11, 458–460. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0177-6>.

Studholme, J., Gulev, S., 2018. Concurrent Changes to Hadley Circulation and the Meridional Distribution of Tropical Cyclones. *J. Climate*, 31, 4367–4389. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0852.1>.

Tomczyk, A.M., Pótrolniczak, M., Bednorz, E., 2017. Circulation Conditions' Effect on the Occurrence of Heat Waves in Western and Southwestern Europe. *Atmosphere*, 8(2), 31. <https://doi.org/10.3390/atmos8020031>.

Viceto, C., Gorodetskaya, I., Rinke, A., Maturilli, M., Crewell, S., 2021. Atmospheric rivers and associated precipitation patterns during the ALOUD/PASCAL campaigns near Svalbard (May–June 2017): case studies using observations, reanalyses, and a regional climate model. *10.5194/acp-2021-609*.

Varlas, G., Stefanidis, K., Papaioannou, G., Panagopoulos, Y., Pytharoulis, I., Katsafados, P., Papadopoulos, A., Dimitriou, E., 2022. Unravelling precipitation trends in Greece since 1950s using ERA5 climate reanalysis data. *Climate*, 10, 12. <https://doi.org/10.3390/cli10020012>.

CHAPITRE 3 : ANALYSE DES TENDANCES PASSÉES DE LA FRÉQUENCE DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE PROPRES AUX PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Woollings, T., Hannachi, A., Hoskins, B., 2010. *Variability of the North Atlantic eddy-driven jet stream. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 136, 856–868. <https://doi.org/10.1002/qj.625>.

Ye, H., Cohen, J., Rawlins, M., 2013. *Discrimination of Solid from Liquid Precipitation over Northern Eurasia Using Surface Atmospheric Conditions. Journal of Hydrometeorology*, 14(4), 1345-1355.

Zhang, R., Wang, H., Fu, Q., Rasch, P.J., Wang, X., 2019. *Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 116(48), 23947-23953. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915258116>.

Zuo, H., Alonso-Balmaseda, M., Tietsche, S., Mogensen, K., Mayer, M., 2019. *The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment. Ocean science*.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

4.1 INTRODUCTION.

L'évaluation des impacts du changement climatique sur les types de circulation atmosphérique est fondamentale pour comprendre et anticiper les modifications futures des régimes de précipitations. Ces changements ont des implications profondes pour la gestion des ressources en eau, l'agriculture, la biodiversité, et les activités économiques, en particulier dans les régions montagneuses comme les Alpes-Maritimes. Dans ce contexte, ce chapitre se concentre sur les projections des tendances futures des types de circulation atmosphérique qui influencent les précipitations solides dans les Alpes du Sud, pour la période allant de 2030 à 2100, couvrant les mois de décembre à avril (DJFMA). L'objectif principal de ce chapitre est d'anticiper les changements potentiels dans les régimes de circulation atmosphérique et d'évaluer leurs impacts sur les conditions nivales, en utilisant les modèles climatiques de dernière génération, notamment les projections issues du Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6).

Ce chapitre, qui traite du quatrième article de la thèse, utilise les modèles CMIP6 pour projeter les modifications des circulations atmosphériques associées aux chutes de neige dans les Alpes-Maritimes aux horizons 2030 et 2100, en se concentrant sur les mois de décembre à avril, période critique pour les précipitations solides dans cette région. Les projections climatiques offrent une perspective sur la manière dont les schémas de circulation atmosphérique, tels que les circulations cycloniques favorables aux précipitations neigeuses et les circulations anticycloniques associées à des conditions sèches, pourraient évoluer sous l'influence du réchauffement climatique.

Les données et les méthodes utilisées pour ces projections incluent l'analyse des sorties des modèles CMIP6, qui intègrent divers scénarios socio-économiques pour simuler les futurs climats possibles. Ces scénarios permettent d'explorer une gamme d'avenirs climatiques, en tenant compte des incertitudes liées aux émissions de gaz à effet de serre et aux réponses climatiques correspondantes. L'analyse des tendances futures portera sur la fréquence des types de circulation atmosphérique, avec une attention particulière aux implications pour les régimes de précipitation solides. En conclusion, le quatrième article de la thèse, qui aborde dans les détails l'ensemble des sujets de ce chapitre, est présenté à la fin.

4.2 DÉFINITION ET RÔLE DES DONNÉES CMIP6.

Les données issues du Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) jouent un rôle central dans l'étude des projections climatiques futures. Le CMIP6 est une initiative coordonnée par le World Climate Research Programme (WCRP), regroupant un vaste ensemble de modèles climatiques développés par plus de 50 institutions académiques et de recherche à travers le monde (Eyring et al., 2016). Ces données sont essentielles pour comprendre les impacts du changement climatique à l'échelle mondiale et régionale, en particulier dans des zones sensibles comme les Alpes-Maritimes.

Les données CMIP6 sont cruciales car elles utilisent des modèles climatiques de nouvelle génération, intégrant des améliorations significatives par rapport aux phases précédentes

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

(CMIP5). Ces améliorations incluent une résolution spatiale plus fine et une meilleure représentation des processus physiques complexes tels que la formation des nuages et les interactions entre l'atmosphère, l'océan, et la biosphère (Eyring et al., 2016). Ces modèles sont indispensables pour produire des projections climatiques précises et fiables, nécessaires pour les évaluations de l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) dans ses rapports, qui fournissent des bases scientifiques pour les décisions politiques mondiales sur le climat.

Les simulations CMIP6 sont basées sur un ensemble multi-modèles, comprenant plus de 100 modèles provenant de diverses institutions, ce qui permet de capturer une large gamme de futures conditions climatiques possibles et les incertitudes qui y sont associées (Eyring et al., 2016). Ces ensembles sont essentiels pour évaluer les variations naturelles et forcées du climat et pour tester la sensibilité des modèles climatiques à différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Les modèles CMIP6 sont exécutés sous différents scénarios socio-économiques partagés (SSP), tels que SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5, correspondant à diverses trajectoires d'émissions de GES, permettant d'évaluer les impacts potentiels des politiques de mitigation et d'adaptation au changement climatique (Eyring et al., 2016).

Le rôle des données CMIP6 dans ce chapitre est fondamental pour projeter les tendances futures des types de circulation atmosphérique spécifiques aux précipitations solides dans les Alpes du Sud. En utilisant ces données, il est possible d'évaluer comment les schémas de circulation atmosphérique, identifiés comme critiques pour les précipitations neigeuses, pourraient évoluer au cours du XXI^e siècle en fonction des différents scénarios de changement climatique. Les simulations CMIP6 permettent également d'analyser la variabilité et l'incertitude des projections climatiques. En comparant les résultats issus de différents modèles et scénarios, il est possible de mieux comprendre les fourchettes d'incertitude associées aux prévisions climatiques et de renforcer la robustesse des conclusions tirées.

Les données CMIP6 sont accessibles via l'Earth System Grid Federation (ESGF), qui fournit une infrastructure robuste pour le stockage, la gestion et la distribution des données climatiques à l'échelle mondiale. Cette accessibilité permet aux chercheurs et aux décideurs de consulter des projections climatiques détaillées et de les utiliser pour des analyses régionales spécifiques. Des guides et une documentation utilisateur complète sont également disponibles pour faciliter l'accès et l'utilisation des données.

Enfin, les données CMIP6 fournissent une base solide pour le développement de stratégies d'adaptation aux impacts du changement climatique. En identifiant les types de circulation atmosphérique susceptibles de devenir plus ou moins fréquents à l'avenir, les décideurs locaux et régionaux peuvent mieux anticiper les changements climatiques et planifier des mesures adaptées pour protéger les écosystèmes, les ressources en eau, et les activités économiques, en particulier le tourisme hivernal.

4.3 MÉTHODE DE PROJECTION DES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE.

L'objectif principal de cette section est de détailler la méthodologie employée pour projeter les types de circulation atmosphérique spécifiques aux précipitations solides dans les Alpes du Sud, en utilisant les données issues du CMIP6. Cette méthodologie repose sur une approche rigoureuse combinant la préparation des données, l'application des modèles climatiques, et

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

l'analyse des résultats pour identifier les schémas de circulation susceptibles d'évoluer dans le contexte du changement climatique.

4.3.1 Préparation des données.

Les données utilisées pour cette étude proviennent de plusieurs sources. Les variables atmosphériques sont issues des réanalyses ERA5 et des sorties de modèles CMIP6. Les observations des précipitations solides ont été collectées auprès de cinq stations météorologiques dans les Alpes-Maritimes pour la période de 1997 à 2019. Ces données servent de base pour calibrer les classifications dérivées des champs de réanalyses ERA5, qui à leur tour serviront de référence pour évaluer la capacité des modèles de projections CMIP6 à reproduire les conditions climatiques passées. Les données climatiques sont extraites pour les mois de décembre à avril, période critique pour les précipitations solides dans les Alpes du Sud. Les variables atmosphériques choisies incluent la hauteur du géopotential à 700 hPa, la composante méridionale V du vent à 700 hPa, la vitesse verticale à 700 hPa, la température à 850 hPa et l'humidité spécifique à 700 hPa. Le prétraitement des données inclut entre autre l'interpolation sur une grille commune pour assurer une résolution spatiale uniforme.

4.3.2 Analyse statistique et classification.

Une méthode rigoureuse a été mise en œuvre pour analyser et classer les circulations atmosphériques. L'analyse en composantes principales (ACP) a été utilisée pour réduire la dimensionnalité des variables atmosphériques, tout en conservant les informations essentielles. Cette analyse permet d'identifier les motifs dominants de circulation atmosphérique qui expliquent la majeure partie de la variance dans les données climatiques. Ensuite, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée pour regrouper les jours en fonction des similitudes des configurations de circulation identifiées. Cette approche aide à identifier les types de circulation dominants durant la période historique (1950-2019, DJFMA) en utilisant des données robustes telles que les réanalyses ERA5 et fournit une référence pour évaluer les changements futurs prévus par les scénarios des modèles CMIP6.

En effet, la classification réalisée avec les réanalyses ERA5 sert de référence, en regroupant les jours en fonction des similitudes des configurations de circulation identifiées sur la base des données historiques. Ce même algorithme de classification est ensuite utilisé pour classer les données CMIP6, permettant ainsi une comparaison directe entre les conditions climatiques passées et futures. Cette approche garantit que les types de circulation identifiés dans les réanalyses ERA5 sont directement comparables aux projections issues des modèles CMIP6, offrant ainsi une base solide pour évaluer les changements projetés dans la fréquence des circulations atmosphériques associées aux précipitations solides.

Pour ces projections, cinq modèles CMIP6 ont été soigneusement sélectionnés en fonction de critères spécifiques, tels que leur capacité à reproduire fidèlement les circulations atmosphériques historiques tant d'un point de vue spatial, que dans la fréquence de la normale climatique. Le choix de ces modèles a été fait pour assurer la robustesse et la fiabilité des projections climatiques. Les résultats des projections se basent sur la moyenne multi-modèle de ces cinq modèles, permettant ainsi d'obtenir des prévisions plus robustes et représentatives des

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

conditions futures, et de mesurer avec précision comment les schémas de circulation atmosphérique pourraient évoluer au cours du XXI^e siècle.

4.3.3 Projection et scénarios SSP.

La projection des types de circulations jusqu'en 2100 a été effectuée en utilisant quatre scénarios SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5), qui couvrent une gamme de trajectoires d'émissions futures de gaz à effet de serre. Ces scénarios SSP, qui sont recommandés par le GIEC, permettent d'évaluer l'impact des politiques de mitigation et d'adaptation sur les modèles de circulation atmosphérique dans les Alpes-Maritimes. Les variables atmosphériques issues des modèles CMIP6 ont été analysées pour identifier les changements dans la fréquence et l'intensité des circulations atmosphériques associés aux précipitations solides. Les données sont regroupées par périodes de 30 ans, couvrant deux horizons temporels : 2030-2060, 2070-2100, afin d'analyser les tendances à long terme dans les types de circulation atmosphérique et d'évaluer les changements projetés en fonction des différents scénarios.

4.4 PROJECTIONS A L'HORIZON 2100 DES TYPES DE CIRCULATION ATMOSPHERIQUE.

Cette section se concentre sur les projections des types de circulation atmosphérique spécifiques aux précipitations solides dans les Alpes du Sud, à l'horizon 2100. En utilisant les données issues des modèles CMIP6, les projections ont été réalisées pour différents scénarios socio-économiques partagés (SSP), permettant d'évaluer les impacts potentiels du changement climatique sur les régimes de circulation atmosphérique durant les mois de décembre à avril (DJFMA).

4.4.1 Analyse de la fréquence d'occurrence des circulations STW et WA.

Les analyses indiquent une réduction notable de la fréquence des circulations cycloniques du sud avec un talweg sur l'Europe occidentale (STW) à travers tous les scénarios SSP (Figure 10). Ce type de circulation, lorsqu'il apparaît, est régulièrement à l'origine des chutes de neige. Par exemple, selon le scénario SSP5-8.5, le nombre moyen d'occurrences de STW par décennie est projeté pour passer de 302 durant la période de référence (1950-1979) à seulement 91 d'ici à 2100. Cette diminution est également observée dans des scénarios plus modérés, tels que SSP1-2.6 et SSP2-4.5, avec des réductions respectives de 30 % et 41 % des occurrences de STW.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

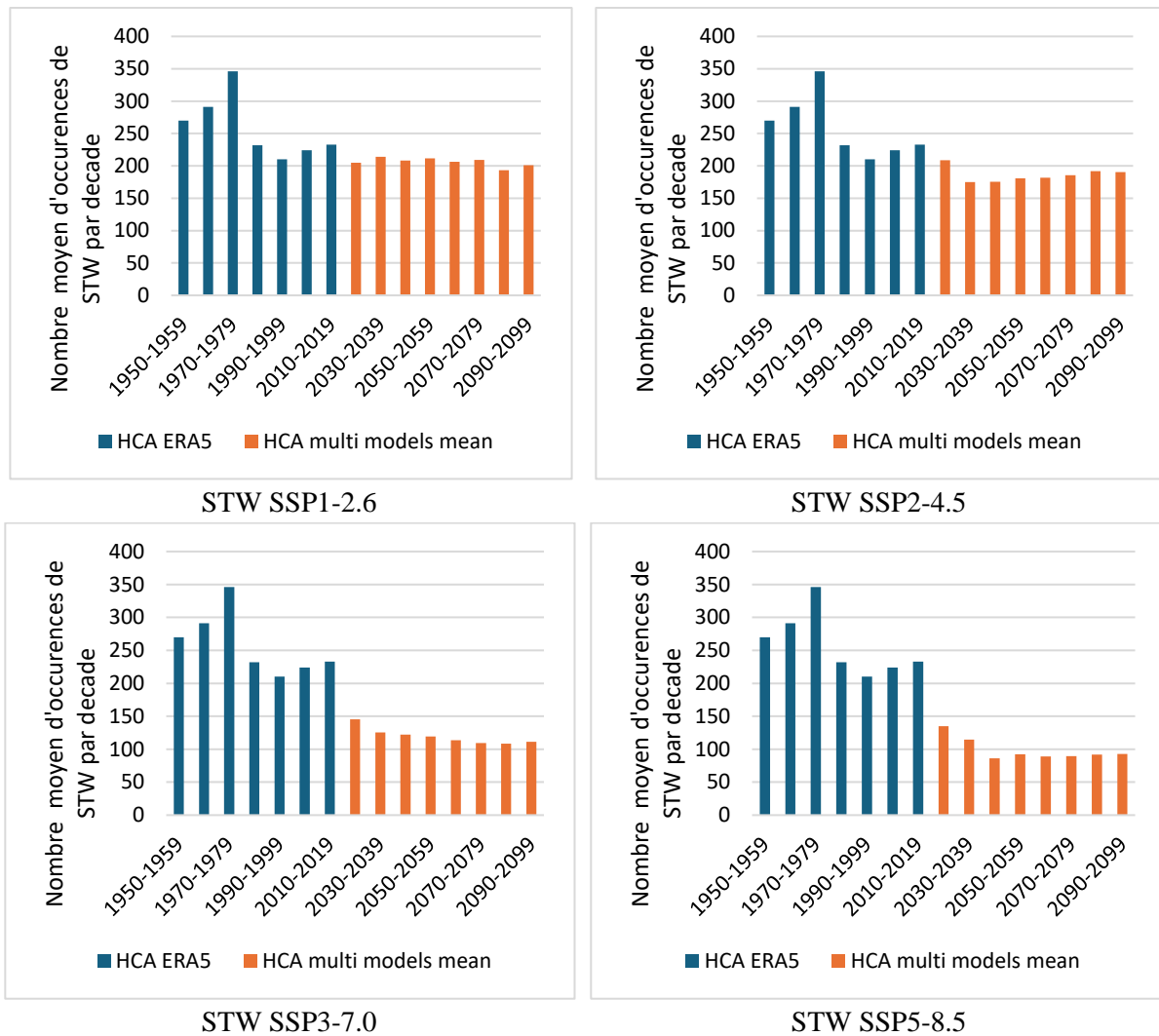


Figure 10 : Projection à l'horizon 2100 (DJFMA) de la fréquence moyenne décennale d'occurrences des circulations de type STW (Guerin, 2023).

Parallèlement, les projections prévoient une augmentation significative des circulations anticycloniques de l'ouest (WA), ce qui indique des conditions plus sèches et plus chaudes pour la région (Figure 11). Sous le scénario SSP5-8.5, la fréquence des WA est prévue pour passer de 242 occurrences durant la période de référence à 501 occurrences d'ici à 2100. Ces changements suggèrent une modification substantielle du climat régional, avec des impacts potentiels sur les précipitations solides.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

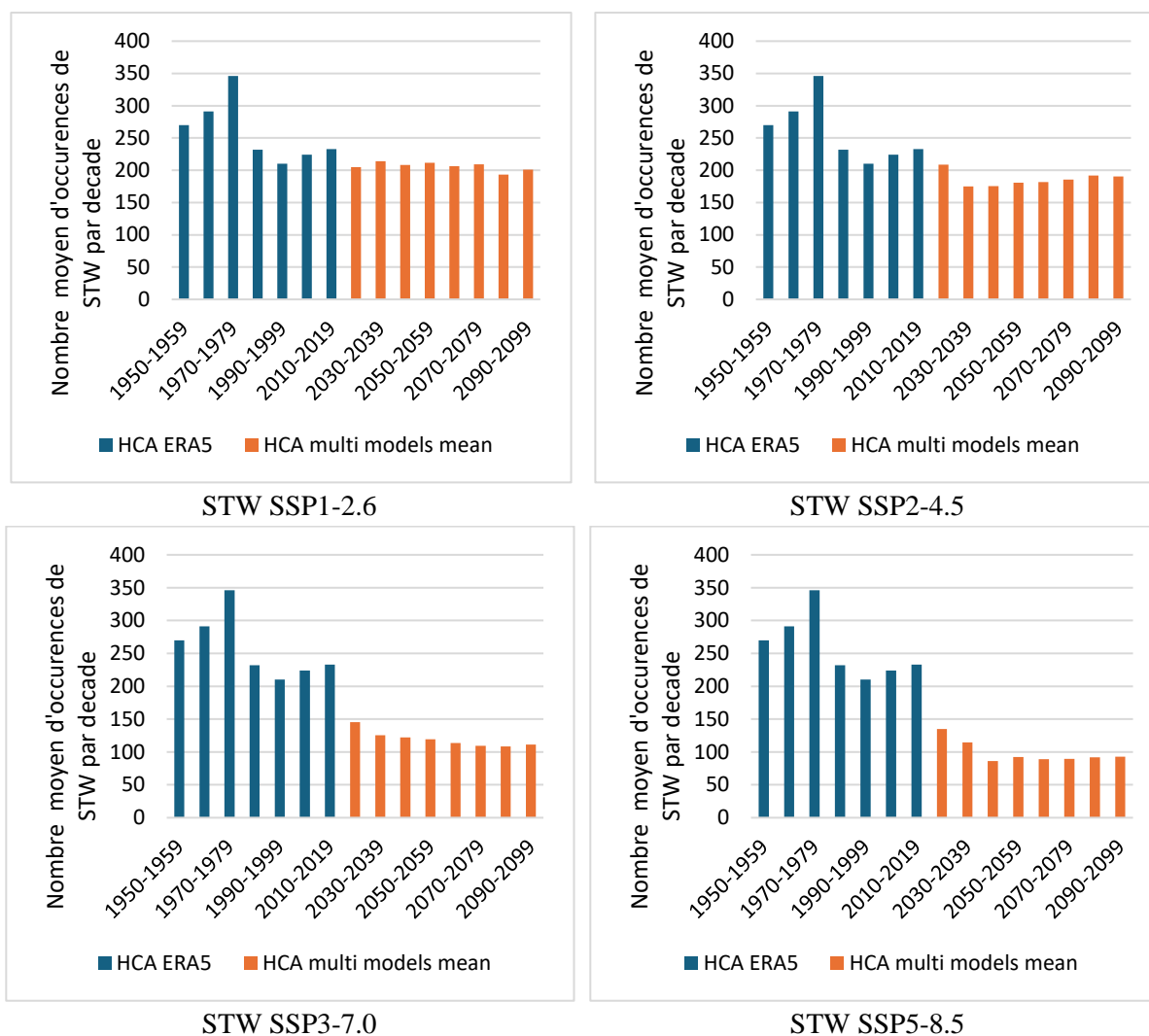


Figure 11 : Projection à l'horizon 2100 (DJFMA) de la fréquence moyenne décennale d'occurrences des circulations de type STW (Guerin, 2023).

4.4.2 Analyse des changements dans l'intensité des variables.

Les variables atmosphériques telles que la hauteur du géopotential à 700 hPa et la température à 850 hPa montrent des tendances significatives de modification au sein de la classe de circulation neigeuse STW (<Table 3). L'augmentation de la hauteur du géopotential indique une stabilisation de l'atmosphère, réduisant ainsi la probabilité de précipitations. Parallèlement, le réchauffement notable à 850 hPa suggère une élévation de la limite pluie-neige, ce qui pourrait diminuer la fréquence et l'intensité des précipitations neigeuses. Ces changements dans les fréquences des circulations atmosphériques auront des implications profondes pour les écosystèmes, l'hydrologie, et les économies locales des Alpes-Maritimes.

En conclusion, les projections à l'horizon 2100 indiquent des changements significatifs dans les régimes de circulation atmosphérique, avec des implications profondes pour les précipitations solides dans les Alpes du Sud. La diminution probable des chutes de neige affectera non seulement les réserves en eau mais aussi le tourisme hivernal, qui représente une source économique majeure pour la région. L'augmentation des conditions anticycloniques, accentuant la sécheresse, nécessitera des adaptations significatives dans la gestion des ressources hydriques

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

et dans les pratiques agricoles. Ces résultats soulignent la nécessité d'une adaptation proactive aux nouvelles conditions climatiques, en particulier pour les secteurs dépendants de la neige, tels que le tourisme et la gestion des ressources hydriques, et l'importance de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour atténuer les impacts futurs du changement climatique. Ainsi, ces projections mettent en lumière les changements significatifs attendus dans les régimes de circulation atmosphérique et leurs impacts potentiels sur les précipitations solides dans les Alpes du Sud. Pour approfondir cette analyse et explorer en détail les conséquences de ces évolutions climatiques sur les stations alpines de la région méditerranéenne de la Côte d'Azur, l'article suivant propose une étude exhaustive des circulations atmosphériques et de leurs impacts futurs.

Table 3 : Valeurs moyennes des variables atmosphériques dans la zone d'étude lors de la présence du STW et écarts par rapport à la période de référence 1950-1979 (Guerin, 2023).			
	Altitude du géopotential à 700 hPa (en m)	Humidité spécifique à 700 hPa (en g/kg)	Température à 850 hPa (en °C)
ERA5 – 1950 - 1979 (DJFMA) Période de référence	2940	2.3	1.6
ERA5 – 1990 - 2019 (DJFMA)	2945 (+ 5)	2.3 (0)	2 (+ 0.4)
SSP1-2.6 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2955 (+ 15)	2.5 (+ 0.2)	2.5 (+ 0.9)
SSP2-4.5 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2979 (+ 39)	2.8 (+ 0.5)	3.8 (+ 2.2)
SSP3-7.0 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2991 (+ 51)	2.8 (+ 0.5)	4.1 (+ 2.5)
SSP5-8.5 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2997 (+57)	3 (+ 0.7)	4.8 (+ 3.2)
SSP1-2.6 – 2070 - 2099 (DJFMA)	2953 (+13)	2.5 (+ 0.2)	2.7 (+ 1.1)
SSP2-4.5 – 2070 - 2099 (DJFMA)	2982 (+ 42)	2.8 (+ 0.5)	4.1 (+ 2.5)
SSP3-7.0 – 2070 - 2099 (DJFMA)	3004 (+ 64)	2.8 (+ 0.5)	5 (+ 3.4)
SSP5-8.5 – 2070 - 2099 (DJFMA)	3014 (+74)	3.2 (+ 0.9)	6.2 (+ 4.6)

4.5 ARTICLE 4 : « EVOLUTION OF ATMOSPHERIC CIRCULATIONS AND IMPACTS ON SOLID PRECIPITATION IN THE ALPINE STATIONS OF THE MEDITERRANEAN REGION OF THE CÔTE D'AZUR ».

Cette partie est structurée en plusieurs sections afin de présenter les résultats et les analyses de manière claire et détaillée. Elle commence par un résumé long (4.5.1), qui fournit une vue d'ensemble complète des objectifs, des méthodes et des principaux résultats de l'article 4, qui apporte une conclusion à cette thèse. Ce résumé permet au lecteur de saisir les enjeux essentiels de l'étude sans avoir besoin de consulter l'intégralité de l'article.

Ensuite, le contexte et les objectifs de l'article (4.5.2) sont détaillés. Cette section explique le cadre théorique de l'étude et les raisons pour lesquelles cette recherche est cruciale pour comprendre les impacts du changement climatique sur les circulations atmosphériques et les précipitations solides dans la région de la Côte d'Azur.

La section suivante présente la discussion et les limites de l'article (4.5.3), où les résultats sont analysés en profondeur. Les forces de l'article sont mises en avant, ainsi que ses limites,

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

en discutant des aspects méthodologiques qui pourraient influencer les conclusions tirées. Cette discussion est essentielle pour situer les résultats dans un contexte plus large et pour envisager des pistes de recherche futures.

Enfin, l'article est positionné dans le cadre de la thèse (4.5.4), montrant comment il s'intègre dans l'ensemble de la recherche. Cette dernière section clarifie la contribution de l'article aux objectifs globaux de la thèse et son lien avec les chapitres précédents. A la suite de cette sous-partie l'article 4 est présentée dans son intégralité.

4.5.1 Résumé long.

Cet article aborde l'avenir des précipitations neigeuses dans les massifs de la Côte d'Azur, au sud-est de la France, en se concentrant particulièrement sur le département des Alpes-Maritimes. Il examine comment le changement climatique affecte les schémas de circulation atmosphérique, influençant ainsi les précipitations solides, dont l'origine synoptique d'une grande partie de leur mécanisme de formation est bien établie. L'importance des précipitations neigeuses est mise en évidence en raison de leurs rôles économiques et écologiques dans ces régions montagneuses et les vallées environnantes. Des recherches antérieures (Cf. Article 1 à 3) ont identifié les principaux types de circulations qui les entraînent, notamment la circulation cyclonique de sud avec une dépression à l'ouest de l'Europe et un talweg qui s'étend des îles britanniques aux côtes languedociennes (nommé STW pour South with Trough on Western Europe). À l'inverse, la circulation anticyclonique de l'ouest (nommé WA pour West Anticyclonic) a été identifiée comme une classe de circulation n'entraînant aucune chute, mais plutôt des conditions chaudes et sèches. Il est donc aussi crucial de suivre cette dernière avec attention.

L'étude utilise des données de réanalyses ERA5 et des modèles climatiques CMIP6 pour projeter les circulations STW et WA jusqu'en 2060 et 2100. Les réanalyses ERA5 fournissent des données historiques, tandis que les modèles CMIP6 offrent des projections futures basées sur divers scénarios socio-économiques (nommés SSP pour Shared Socioeconomic Pathways). Des outils de regroupement statistique, tels que l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH), sont utilisés pour produire les classes synoptiques.

Les principales découvertes incluent une diminution significative de la fréquence des circulations STW. Par exemple, le nombre moyen d'occurrences de STW sur dix ans passe de 302 pendant la période de référence (1950-1979) à seulement 91 d'ici 2100 selon le scénario pessimiste SSP5-8.5. En revanche, une augmentation de la fréquence des circulations WA est prévue, cette fréquence pouvant plus que doubler d'ici 2100, en particulier dans les scénarios les plus pessimistes (SSP3-7.0 et SSP5-8.5). L'augmentation des circulations WA implique des conditions plus sèches et plus chaudes, exacerbant entre autres les préoccupations liées à la sécheresse et aux risques d'incendie. Au sein des STW, les variables atmosphériques évoluent également à l'horizon 2060 et 2100, avec une légère augmentation de la hauteur du géopotential à 700 hPa et de l'humidité spécifique à 700 hPa. En revanche, la température de l'air à 850 hPa montre un réchauffement significatif dès l'horizon 2060, particulièrement pour les SSP3-7.0 et SSP5-8.5, suggérant une élévation altitudinale de la limite pluie-neige.

Ainsi, les implications écologiques et économiques comprennent une réduction de la couverture neigeuse et une diminution des ressources en eau dues à la fonte des neiges,

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

augmentant la pression sur les approvisionnements locaux en eau. Il est également nécessaire que les stations de ski diversifient leurs activités pour s'adapter à ces changements climatiques. L'étude appelle donc à une surveillance continue et à des recherches supplémentaires pour mieux comprendre et gérer les effets du changement climatique dans cette région vulnérable.

4.5.2 Contexte et objectifs de l'article.

L'article s'inscrit dans le contexte du changement climatique et de ses impacts sur les chutes de neige dans les massifs des Alpes-Maritimes, au sud-est de la France. Ces précipitations neigeuses sont cruciales pour les régions montagneuses ainsi que pour les vallées et les villes qui dépendent de ces ressources pour leur stabilité économique et hydrique. Avec l'augmentation des températures, le changement climatique affecte la limite pluie-neige et modifie les schémas de circulation atmosphérique, influençant ainsi les chutes de neige. Ce phénomène a des implications économiques et écologiques majeures, en particulier pour les stations de ski et la gestion des ressources en eau.

Les objectifs de l'article sont multiples. Tout d'abord, il vise à analyser les fréquences des occurrences des circulations favorables aux précipitations solides à l'horizon 2060 et 2100, en utilisant les données des réanalyses ERA5 et des modèles climatiques CMIP6. Deux types de circulations atmosphériques sont particulièrement étudiés : la STW et la WA. L'objectif est de comprendre comment ces classes influencent les chutes de neige et de prévoir leur évolution future. Pour ce faire, l'article utilise des outils statistiques tels que l'ACP et la CAH pour produire des classifications des schémas de circulation. Ces dernières sont ensuite projetées jusqu'en 2060 et 2100 à l'aide des modèles CMIP6.

4.5.3 Discussion et limites de l'article.

L'article se distingue par rapport à d'autres travaux en se concentrant spécifiquement sur les schémas de circulation atmosphérique et leur impact sur les précipitations neigeuses dans les massifs des Alpes-Maritimes. Contrairement à de nombreuses études précédentes, qui se focalisent principalement sur la quantification de la couverture neigeuse passée ou sur la simulation de la hauteur et de la distribution spatiale de la neige future, cet article adopte une approche synoptique pour comprendre les événements météorologiques à l'échelle locale en relation avec les circulations atmosphériques à grande échelle. Cette approche permet une compréhension plus approfondie des mécanismes météorologiques influençant les précipitations solides et offre des projections détaillées basées sur les scénarios SSP les plus utilisés à ce jour. Les auteurs font également référence aux travaux antérieurs de Guerin et Viaux (2022, 2023) qui ont étudié les conditions de circulation atmosphérique et les précipitations neigeuses dans les Alpes du Sud, ainsi que l'interaction avec la classification de Hess et Brezowsky. Cette continuité de la recherche montre une progression logique et approfondie dans l'analyse des impacts du changement climatique sur les précipitations neigeuses dans cette région spécifique.

Cependant, l'article présente certaines limites. Les projections climatiques reposent sur les modèles CMIP6 qui, malgré leur robustesse, comportent des incertitudes inhérentes. Les différences entre les modèles peuvent entraîner des variations dans les projections des types de circulation, bien que celles-ci soient produites à partir d'une moyenne multi-modèles des

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

modèles CMIP6 jugées les plus robustes par rapport à l'algorithme de classification utilisé. Les projections sont également basées sur des scénarios socio-économiques qui prévoient diverses trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre, mais ces scénarios restent des hypothèses susceptibles de ne pas se réaliser comme prévu en raison de facteurs politiques, économiques ou technologiques imprévus. De même, l'étude utilise cinq variables atmosphériques pour produire les classifications, mais d'autres facteurs locaux, tels que les conditions spécifiques de température et d'humidité, pourraient également influencer les précipitations solides et n'ont pas été inclus dans cette analyse. En outre, bien que les données ERA5 offrent une haute résolution, il peut y avoir des limitations dans la résolution spatiale des modèles CMIP6 interpolés, ce qui pourrait affecter la précision des projections à l'échelle locale. Enfin, bien que l'article présente des tendances à long terme, les auteurs reconnaissent que la variabilité annuelle et interannuelle peut entraîner des années avec des niveaux de précipitations neigeuses très différents, ce qui complique la planification à long terme.

4.5.4 Positionnement de l'article dans la thèse.

Cet article occupe une place cruciale dans le cadre de la thèse en s'appuyant sur les connaissances approfondies des données d'observation et des réanalyses ERA5 étudiées dans les trois articles précédents. Il exploite les mécanismes de formation des précipitations neigeuses, largement abordés dans ces travaux antérieurs, et utilise les types de circulation propices aux chutes de neige, préalablement déterminés. De plus, l'article s'appuie sur l'algorithme de classification développé dans le troisième article, fondé sur les données ERA5, pour projeter les classes de circulation à partir des données CMIP6. Ce travail synthétise et capitalise sur les recherches antérieures, apportant ainsi une conclusion à la thèse en offrant une perspective complète de l'évolution de la fréquence des occurrences des types de circulation responsables des chutes de neige dans cette partie des Alpes du Sud à l'horizon 2100. En outre, il ouvre des perspectives pour des recherches futures, notamment sur l'avenir des précipitations liquides, un enjeu crucial pour la région d'étude, en montrant l'augmentation de la fréquence de la classe de circulation WA, qui entraîne des conditions chaudes et sèches sur la région d'étude.

Après avoir situé cet article dans le contexte global de la thèse et souligné son importance pour la compréhension des évolutions climatiques régionales, l'article complet intitulé « Evolution of atmospheric circulations and impacts on solid precipitation in the Alpine stations of the Mediterranean region of the Côte d'Azur » est présenté ci-après, offrant une analyse détaillée des méthodes employées et des résultats obtenus.

Evolution of atmospheric circulations and impacts on solid precipitation in the Alpine stations of the Mediterranean region of the Côte d'Azur : Climatic perspectives until 2100 using ERA5 and CMIP6 data

Guillaume GUERIN^{1*}, Nicolas VIAUX¹

¹ Université Côte d'Azur, CNRS ESPACE, Nice, France

*Corresponding author.

E-mail address: (Auteur). guillaume.guerin@etu.univ-cotedazur.fr (G. Guerin).

Postal address: *Campus Carlone, 98 Boulevard Edouard Herriot, 06200 Nice, France*

Resume

This work investigates the projections of the frequency of the atmospheric circulation types favorable to the SP in the Côte d'Azur massifs up to 2060 and 2100, utilizing ERA5 reanalyses and CMIP6 models. The study particularly focuses on the snow circulation class STW (South circulation with a Trough on Western Europe) and the anticyclonic circulation class WA (West Anticyclonic circulation with a South-West flow). The research underscores the importance of snow for mountain regions and surrounding valleys, highlighting its economic and ecological impacts. Climate change is not only raising temperatures, affecting the rain-snow threshold, but also altering atmospheric circulation patterns, which influence precipitation types. The authors employed ERA5 reanalyses to identify atmospheric circulation types conducive to SP using statistical clustering tools (Principal Component Analysis and Hierarchical Clustering Analysis). These classifications were then projected to 2060 and 2100 using CMIP6 models, based on four Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5. The projections indicate a significant decrease in the frequency of STW circulations and an increase in the frequency of WA circulations, particularly in the most pessimistic scenarios (SSP3-7.0 and SSP5-8.5). For instance, the ten-year average number of STW occurrences drops from 302 in the reference period (1950-1979) to only 91 by 2100 under the SSP5-8.5 scenario. Concurrently, the frequency of WA circulations could more than double. The authors highlight potential ecological and economic consequences of these changes, such as reduced snow cover, decreased water resources from diminished snowmelt, and increased pressure on local water supplies. They stress the need for ski resorts to diversify their activities to adapt to these inevitable climatic changes. In summary, this study provides detailed projections of future changes in snow-favorable atmospheric circulations in the Côte d'Azur region, revealing concerning trends that necessitate significant adaptations for local ecosystems and economies.

Key words : Atmospheric circulation, Climate change, Snow, CMIP6 projection models, ERA5 reanalyses

1. Introduction

In the Côte d'Azur massifs, located southeast of the Alps, the future of solid precipitation (SP) amidst contemporary climate change has been a central topic of discussion for several years. The significance of SP is undeniable for these mountainous areas, as well as for the valleys and towns dependent on them for water resources and economic stability (Barbier, 1982 ; Bokhorst et al., 2016 ; François et al., 2016 ; Croce et al., 2018 ; Joye, 2019 ; Zhang et al., 2019 ; Franco, 2021 ; Barry & Gan, 2022). In this Mediterranean region, climate change poses a threat to the thickness and extent of snow cover, with profound implications : economically, in terms of water resource management in the valleys, and in exacerbating the intensity of drought (Marnezy, 2008 ; Beniston, 2012 ; Hanzer et al., 2020 ; Lastrada et al., 2021 ; Morin et al., 2022).

This work is part of a series of studies including Guerin & Viaux, 2022 ("Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps"), Guerin & Viaux, 2023 ("Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification"), and Guerin & Viaux, 2023 ("How changes in the circulation patterns specific to solid precipitation can affect these meteorological events in the alpine stations of the Mediterranean region?"). It seeks to begin addressing the future of SP in the Côte d'Azur massifs, specifically in the Alpes-Maritimes department, from a large-scale atmospheric circulation perspective. Climate change not only impacts the rain-snow limit through rising temperatures above the 0 °C isotherm, but it could also alter atmospheric circulation patterns, which would consequently affect precipitation patterns (IPCC, 2021). SP is influenced by Atmospheric Circulation Types (ACT), which interact with local weather in synergy with factors such as substratum and topography (Planchon et al., 2015).

In previous research, the ACT conducive to SP were identified using ERA5 reanalysis, employing statistical clustering tools like Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Clustering Analysis (HCA). Five atmospheric variables (AV) correlated with SP observations from five meteorological stations were used : geopotential height at 700 hPa, meridional component V of the wind at 700 hPa, air temperature at 850 hPa, vertical velocity at 700 hPa, and specific humidity at 700 hPa. By matching SP observation data with the daily classification results of the five AV, it was found that SP in the study region is predominantly produced by a single circulation class : the south circulation with a trough over Western Europe (STW). At the level of the weather station network (WSN) encompassing the five SP observation stations, the STW accounts for 62% of total SP, 72% of medium-intensity SP (approximately 15 cm snowfall), and 100% of high-intensity SP (approximately 35 cm snowfall).

A study on the decadal frequency of STW shows a worrying decline in its occurrence since the early 1980s, affecting the number of SP events recorded in the study area (Guerin & Viaux, 2023). This decline appears to be due to an increase in anticyclonic circulations, particularly the West Anticyclonic (WA) circulation, whose frequency has risen since the 1980s. Previous research demonstrated that, from a climatic perspective, the WA circulation is the opposite of the STW snow circulation, as it leads to stable, dry, and hot weather mainly due to the southwest origin of its flow.

The main objective of this article is to provide projections for the evolution of STW until 2060 and 2100 for the months from December to April, including monitoring the

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

frequency of WA, using ERA5 reanalysis and Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6) data. How will the frequency of STW change by 2060 and 2100 during the winter season? In the context of climate change and through a synoptic approach, does the climate of the study area show any signs of change during the winter season?

2. Data

In this article, three different types of data are used : SP observation data from five meteorological stations, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), and data from 15 climate projection models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6).

2.1 Study area and solid precipitation observations

2.1.1 The weather stations network

The weather stations network (WSN) contains five meteorological stations (cf. Table 1) : Isola 2000, Valberg, Auron, Val Casterino and Estenc.

Stations	Latitude in degrees	Longitude in degrees	Altitude in meters
Isola 2000	44.18	7.15	1912
Valberg	44.09	6.92	1630
Auron	44.22	6.93	1910
Val Casterino	44.09	7.5	1554
Estenc	44.23	6.75	1850

They are positioned along a NW/SE axis in the northern part of the French department of Alpes-Maritimes, and they exhibit a diversity of altitudes (cf. Figure 1). This site benefits from a unique topographical context, being only 40 km from the Mediterranean Sea. The Mediterranean acts as a reservoir of warm water, with temperatures rarely falling below 12 °C even in winter. This contributes to the enrichment of water vapor in air masses, resulting in significant total rainfall during Mediterranean episodes (Kysely et al., 2012

; Piras et al., 2016 ; Chochon et al., 2021 ; Carrega et al., 2021).

These five stations were chosen because they are located in the Alpes-Maritimes department, they have data series dating back to before the year 2000, and the daily readings have less than 3% gaps. They measure the amount of fresh SP fallen in 24 hours in centimeters. This data will be referred to as “SP” in this paper and comes from the official meteorology and climatology service in France : Météo-France. Measurements are taken once a day at 6:00 UTC. The SP is recorded from 6:00 UTC on Day-D to 6:00 UTC on Day-D+1. In other words, all the SP for Day-D are measured the following morning at 6:00 UTC. The measurements are made manually using a snow table, which is a square wooden board with a 30 cm high rod fixed to it. A ruler, graduated in centimeters, is inserted into the board to determine the height of the SP.

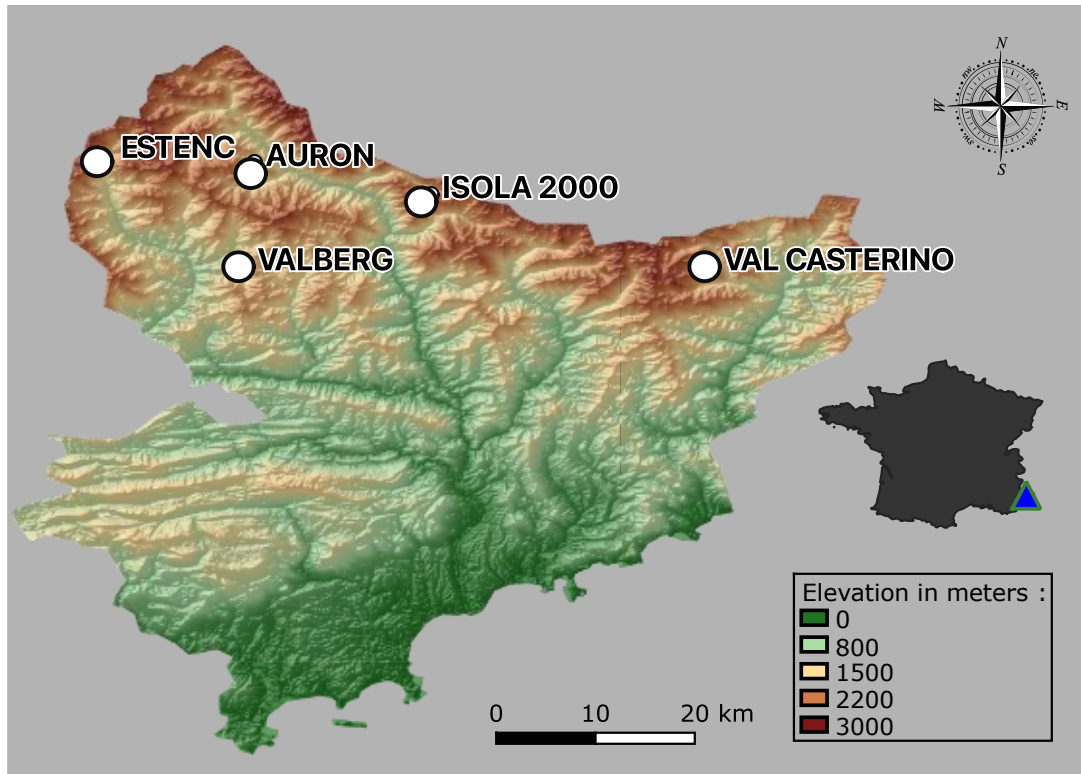


Figure 1 : Location of the five weather stations of the WSN (IGN).

The WSN data were carefully checked according to the protocol (aberrant data, homogeneity, etc.) outlined by Capozzi et al. (2022), using various tests (Petitt, Mann-Kendall) and showed no deficiencies. Subsequently, a classification was performed via Hierarchical Clustering Analysis (HCA) on the SP, revealing three classes (cf. Table 2). Class 1 (SP1) consists on SP with low values for all stations, averaging 2.3 cm in 24 hours and occurring on 129 days. Class 2 (SP2) has a mean value of approximately 16.9 cm and occurs on 79 days. Finally, Class 3 (SP3) corresponds to high values, averaging 38 cm and occurring on 35 days.

Table 2 : Mean amount in cm per classes of SP and occurrence (Météo-France).

Classes	Val Casterino	Isola 2000	Val-berg	Estenc	Auron	Mean
SP1 (129 obs.)	2.2 cm	3.2 cm	1.6 cm	2.7 cm	2.1 cm	2.3 cm
SP2 (79 obs.)	14.6 cm	16.6 cm	15.6 cm	19.8 cm	17.8 cm	16.9 cm
SP3 (35 obs.)	38.1 cm	37 cm	34.4 cm	39.3 cm	41.3 cm	38 cm

2.1.2 Mean configurations of the atmospheric variables per classes of solid precipitations

In previous research, five atmospheric variables (AV) were selected based on their correlation scores with the SP. Mean configurations per SP classes of the geopotential height at 700 hPa (cf. Figure 2), specific humidity at 700 hPa (cf. Figure 3), and air temperature at 850

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

hPa (cf. Figure 4) are presented. In other words, the maps below depict the atmospheric conditions for SP1, SP2, and SP3 classes.

Figure 2 illustrates a southwest cyclonic circulation, with a trough extending from Great Britain to the Mediterranean. This trough becomes more pronounced as we move from one class to another. Specific humidity at 700 hPa (cf. Figure 3) reveals relatively dry conditions in northern Europe, with moisture levels ranging from 1.2 to 1.5 g/kg. Conversely, in the southern France region, particularly around the Mediterranean basin, humidity levels are higher, ranging from 1.8 to 2.4 g/kg, especially during the most intense events (SP3). Lastly, air temperature at 850 hPa indicates temperatures close to 0 °C near the WSN (cf. Figure 4). In the case of SP2 and SP3, this cold air is surrounded by warmer air, potentially enhancing the convection mechanism of air masses from the Mediterranean Sea. This interaction between cold and warm air masses can lead to thermal instability.

In previous studies, a daily classification of five atmospheric variables (AV) was employed to identify a predominant Atmospheric Circulation Type (ACT) responsible for the majority of SP occurrences in the WSN : the South circulation, characterized by a trough over Western Europe (referred to as STW). Additionally, the same classification identified an anticyclonic pattern : the West anticyclonic circulation (referred to as WA). The AV used for this classification were derived from the ERA5 reanalysis provided by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). ERA5 data are freely accessible and can be downloaded from the ECMWF's climate data store portal.

They represent an amalgamation of observations and modeling efforts (Parker, 2016 ; Zuo et al., 2019 ; Nogueira, 2020), and due to the incorporation of observed data, the reanalysis appears to align more closely with observed climatology than with model climatology (Poccard, 2000). Covering the period since 1950, ERA5 reanalysis offers a horizontal resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and a temporal resolution of hourly data (Silber et al., 2019). This dataset was selected for its high resolution over the WSN (the highest available at the onset of the study), providing a comprehensive hourly data series for a wide range of AV at various pressure levels, and offering a geographical coverage sufficient for visualizing both high-latitude depressions and low-latitude anticyclones. Additionally, the data assimilation method utilizing 4D-VAR technology contributes to more robust trends in climate variables (Mahto et al., 2019).

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

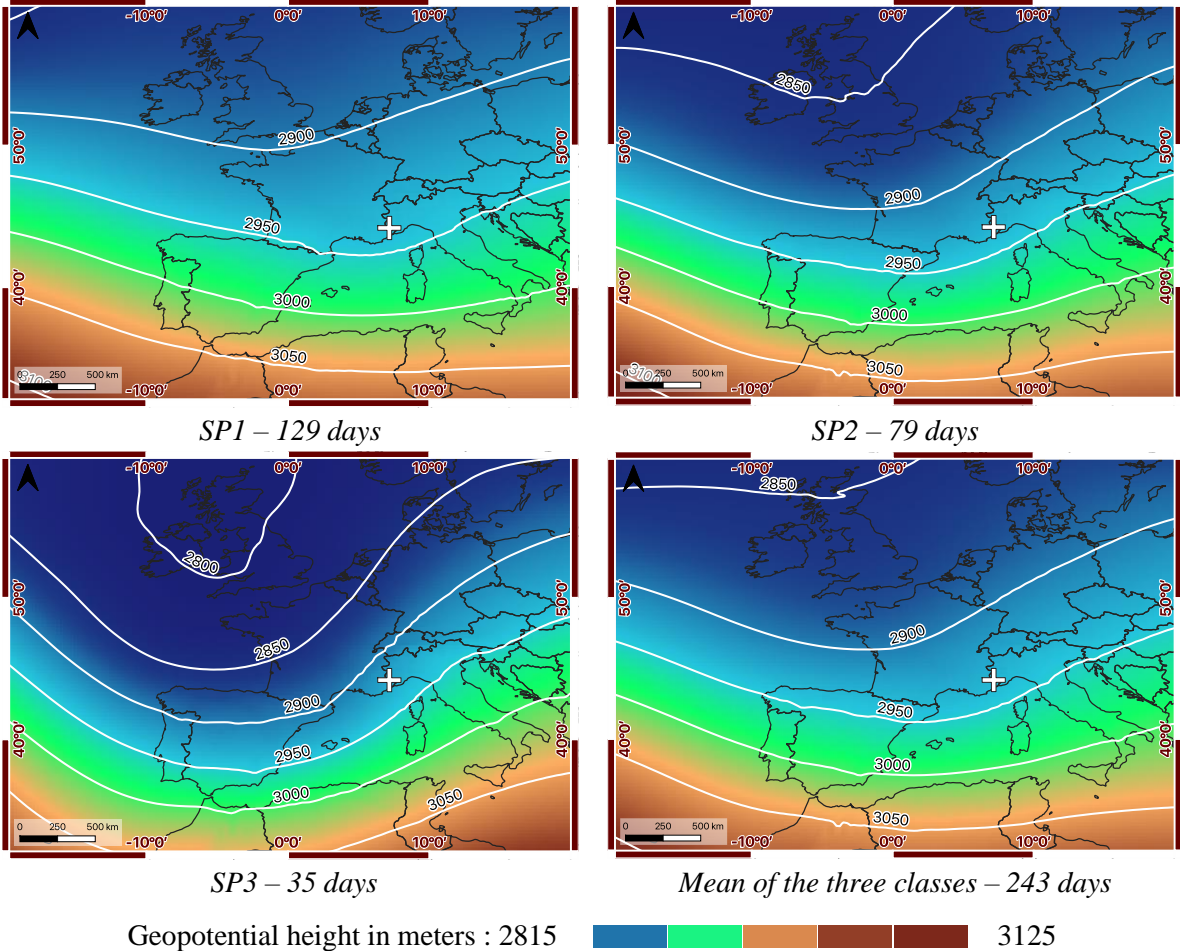


Figure 2 : Mean configurations of the geopotential height 700 hPa for the three SP classes (ECMWF-ERA5; Guerin, 2023). The white cross corresponds to the location of the WNS.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

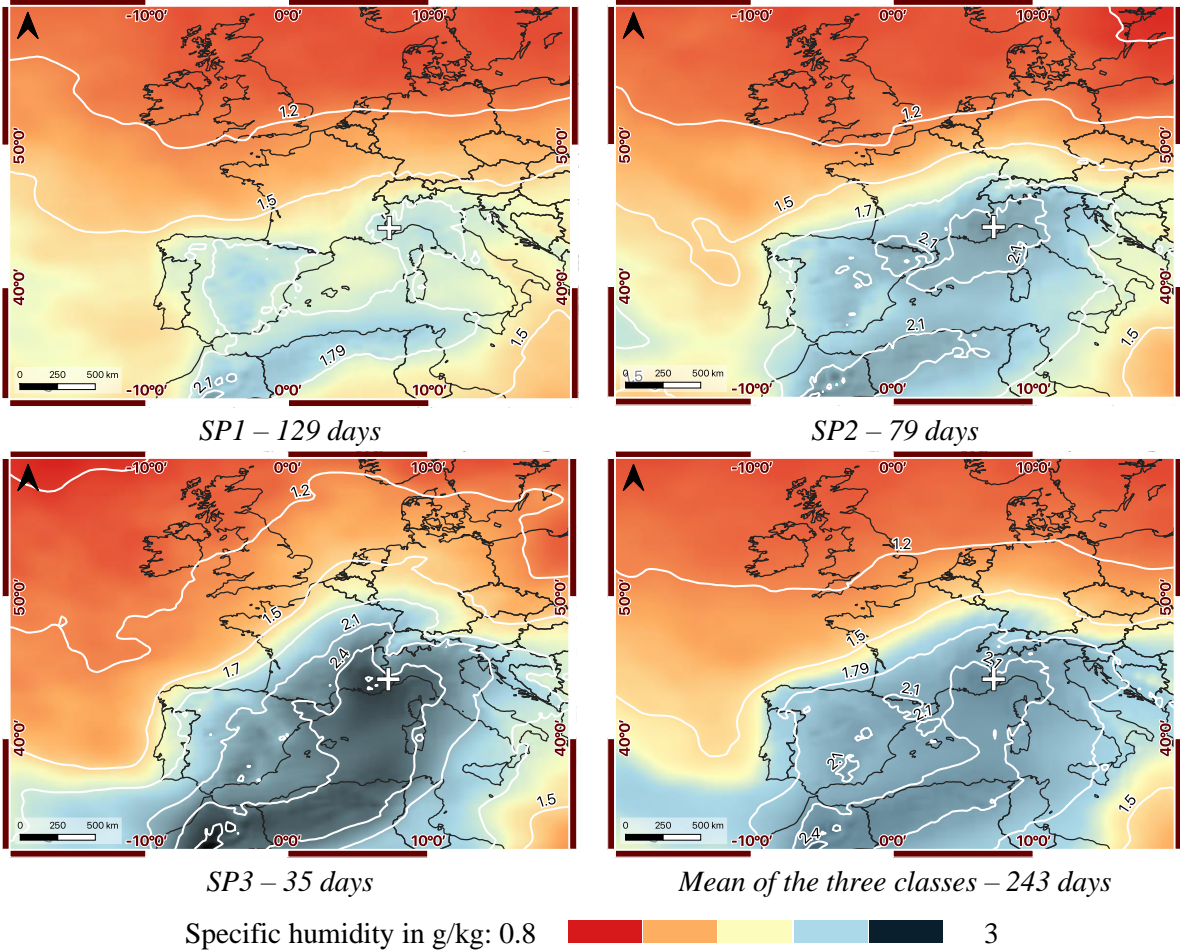


Figure 3 : Mean configurations of the specific humidity 700 hPa for the three SP classes (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023). The white cross corresponds to the location of the WNS.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

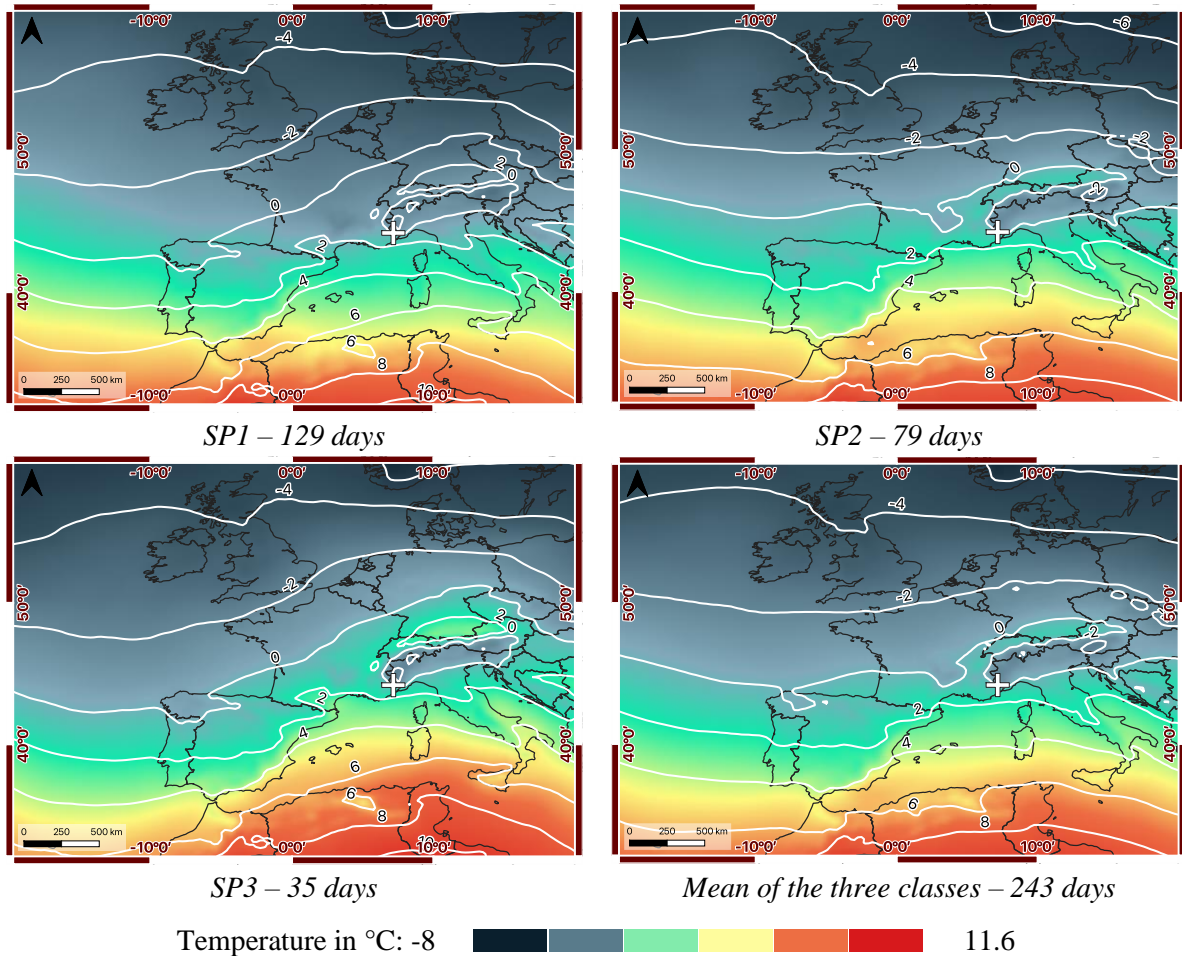


Figure 4 : Mean configurations of the air temperature 850 hPa for the three SP classes (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023).). The white cross corresponds to the location of the WNS.

2.2 The ERA5 reanalysis

2.2.1 Description of the ERA5 reanalysis

2.2.2 Classification of ERA5 reanalysis data

The ERA5 reanalysis classification method is detailed extensively in the article titled "How changes in circulation patterns specific to solid precipitation can impact meteorological events in Alpine stations of the Mediterranean region? Use of ERA5 reanalyses" by Guerin & Viaux, 2023.

In summary, this method involves conducting correlation tests between SP and numerous AV obtained from the ECMWF website. The five selected AV are then extracted within a window centered on the Euro-Atlantic area and recorded in five data matrices, each available in CSV format. These results give a large volume of data, which may introduce statistical noise. To mitigate this, Principal Component Analysis (PCA) is performed on each matrix to retain the main information, specifically the components with eigenvalues greater than 1 as per Kaiser's rule (1960). Subsequently, the results of the five PCA analyses are

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

combined into a single matrix and subjected to Hierarchical Clustering Analysis (HCA). The classification tree is then cut based on the last inertia jump recorded on the partition.

The combination of PCA and HCA yields six classes (cf. Table 3) representing days with similar atmospheric circulation patterns (ACT), for the time period 1950 to 2014 and for the months of January (J), February (F), March (M) and April (A). The two main classes identified are the STW (associated with snowy weather) and the WA (associated with hot and dry weather).

Table 3 : Synthesis of the classification of reanalysis fields (Guerin, 2023).

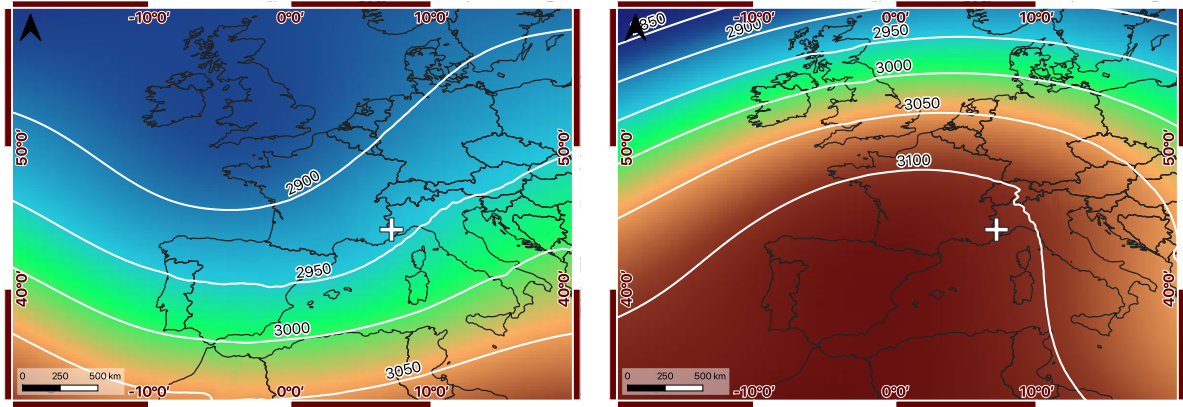
ID	Type of circulation	Number of days (1950-2019 DJFMA)	Percent of days
ACT1	Depression over Central Europe (DCE)	1582	15
ACT2	Northwest anticyclonic (NWA)	1818	17
ACT3	South, trough on Western Europe (STW)	1815	17
ACT4	West cyclonic (WC)	1813	17
ACT5	West anticyclonic (WA)	2158	20
ACT6	Southwest anticyclonic (SWA)	1522	14

The mean configurations (averages of all days within the class) are presented for both the STW and the WA (cf. Figures 5, 6, and 7). These maps can be compared with the mean configuration of predictors per SP class (cf. Figures 2, 3, and 4) to assess the classification's success in reproducing an ACT specific to SP, thereby qualifying the effectiveness of the approach. The mean configurations per ACT class of geopotential height at 700 hPa (cf. Figure 5), specific humidity at 700 hPa (cf. Figure 6), and air temperature at 850 hPa (cf. Figure 7) are highly illustrative.

The STW is characterized by a southern cyclonic circulation with a trough over Western Europe. It is distinguished by a low-pressure system over the British Isles and a low-pressure trough oriented northwest-southeast, stretching from the British Isles to the Balearic Islands. The airflow direction is southwest, accompanied by elevated levels of specific humidity (ranging from 2.1 to 2.4 g/kg of moist air across the Mediterranean basin). The air temperature near the WSN hovers around 0 °C, surrounded by slightly higher values of approximately 2 °C.

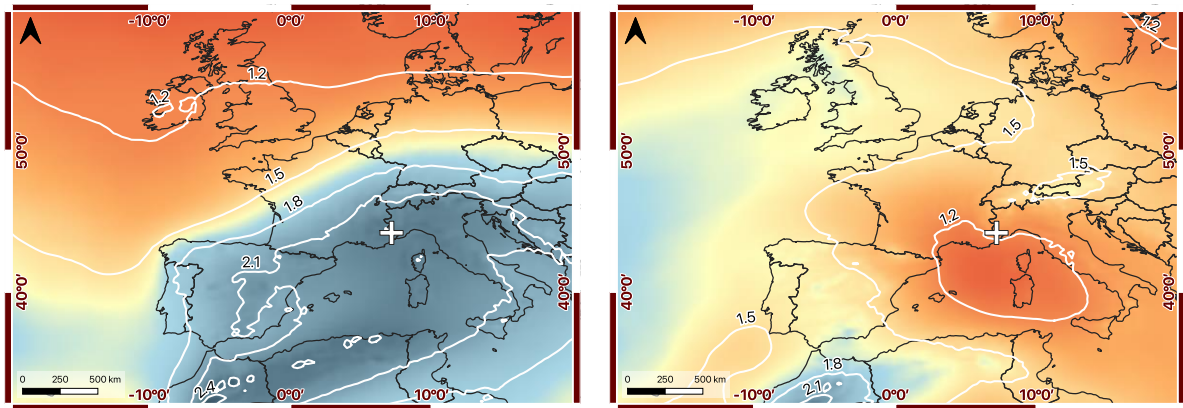
On the other hand, the WA features a west anticyclonic circulation with an anticyclone centered over the Balearic Islands and a robust ridge extending southwest-northeast from the Maghreb to Switzerland. The presence of a blocking anticyclonic system with high pressure results in a near-total cessation of westward circulation over Europe. The airflow direction remains southwest, resulting in stable and warm conditions (approximately 6 °C above the WSN) with dry air (0.9 g/kg of moist air above the WSN).

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.



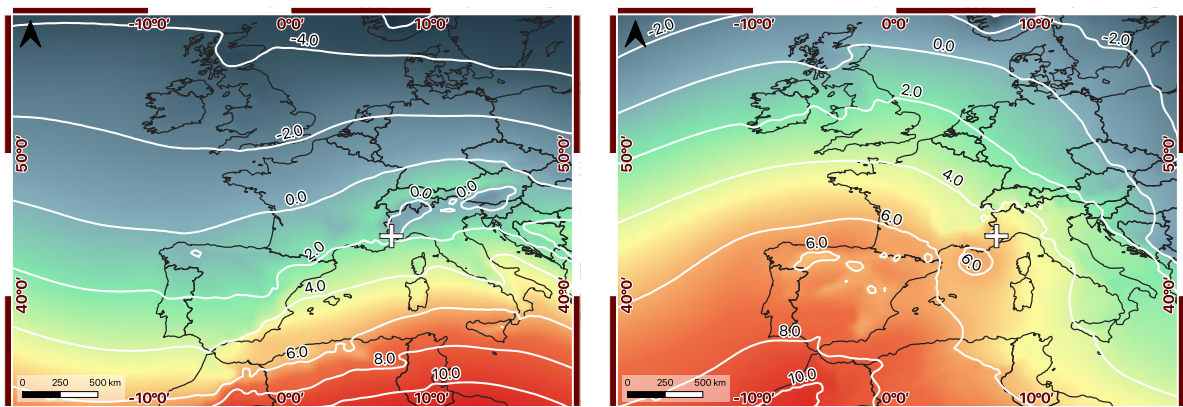
STW WA
Geopotential height in meters : 2815 3125

Figure 5 : Mean (1950-2019 DJFMA) configurations of the geopotential height 700 hPa for STW and WA (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023). The white cross corresponds to the WSN.



STW WA
Specific humidity in g/kg : 0.8 3

Figure 6 : Mean configurations (1950-2019 DJFMA, Guerin, 2023) of the specific humidity 700 hPa for STW and WA (ECMWF-ERA5). The white cross corresponds to the WSN.



STW WA
Temperature in °C : -8 11.6

Figure 7 : Mean (1950-2019 DJFMA) configurations of the air temperature 850 hPa for STW and WA (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023). The white cross corresponds to the WSN.

2.3 CMIP6 data

A third type of data is used, these are AV from the Coupled Model Intercomparison Project 6 (CMIP6). This is a project of the World Climate Research Program (WCRP).

2.3.1 Description of CMIP6 data

This project aims to conduct climate simulations in a coordinated manner across various research groups, facilitating a better estimation and understanding of the discrepancies between climate models. It also enables the assessment of uncertainty stemming from model imperfections in estimating human-induced climate change. The sixth phase of this project brought together nearly 45 climate centers from around the world, incorporating approximately 115 climate models (Eyring et al., 2016).

Among the standard simulations of the CMIP6 project, historical simulations spanning the period from 1850 to 2014 and climate projections for future climate change throughout the 21st century are available. These future climate simulations, termed climate projections, are highly contingent upon greenhouse gas emissions, which are influenced by future socio-economic conditions and thus remain significant unknowns (Eyring et al., 2016). Several projections are conducted based on different greenhouse gas emission scenarios.

In this study, 15 CMIP6 models are utilized (cf. Table 4). This reduction from 115 models to 15 models is attributed to data availability at the time of the study. Each model must include the five AV correlated with SP and must also be capable of providing a comprehensive set of Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios to cover a range of future possibilities.

ID	Name	Country	Resolution in km
1	ACCESS-CM2	Australie	250
2	CESM2	USA	100
3	CESM2-WACCM	USA	100
4	CNRM-CM6-1-HR	France	50
5	EC-Earth3	Europe	100
6	FGOALS-g3	Chine	250
7	IITM-ESM	Inde	250
8	INM-CM4-8	Russie	100
9	INM-CM5-0	Russie	100
10	IPSL-CM6A-LR	France	250
11	MIROC6	Japon	250
12	MPI-ESM1-2-HR	Suisse	100
13	MPI-ESM1-2-LR	Suisse	250
14	MRI-ESM2-0	Japon	100
15	TaiESM1	Taiwan	100

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

2.3.2 SSP scenarios for CMIP6 models

With CMIP6, a new generation of climate scenarios enables a better understanding of potential futures in terms of climate changes. The Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios have replaced the RCP (Representative Concentration Pathways) scenarios (Moss et al., 2010).

In the context of adapting to climate change, the use of climate projections derived from these scenarios is essential. These projections help study the future evolution of climatic hazards, identify those whose evolution may be unfavorable, and determine the processes most vulnerable to these changes (Moss et al., 2010). It is important to note that a climate projection estimates the future evolution of average or extreme weather conditions. Unlike weather forecasts, climate projections do not aim to predict specific weather conditions on a given date and location but rather estimate the probabilities of observing particular changes over a period (generally 10 to 20 years) within a given prospective scenario and for a specific region (Moss et al., 2010). For this reason, averages over 10 or 30 years are used in this work to define the evolution of circulation classes.

The SSP scenarios represent socio-economic hypotheses, each numbered from 1 to 5. SSP1 and SSP5 envision relatively optimistic trends for human development, with substantial investments in education and health, rapid economic growth, and well-functioning institutions. However, SSP5 assumes an energy-intensive, fossil fuel-based economy, while SSP1 foresees an increasing shift towards sustainable practices (Moss et al., 2010). SSP3 and SSP4 predict more pessimistic development trends, with little investment in education or health, rapid population growth, and increasing inequalities. In SSP3, countries prioritize regional security, while in SSP4, large inequalities within and between countries dominate, making societies highly vulnerable to climate change (Moss et al., 2010). The SSP2 scenario envisions an intermediate trajectory with continuing trends (Moss et al., 2010).

The abbreviation SSPx-y denotes a scenario, where x is the number (1 to 5) of the SSP socio-economic scenario used to develop the emissions trajectory, and y indicates the approximate value of the radiative forcing (in W/m²) reached at the end of the century (Moss et al., 2010). An “SSPx-y scenario” represents a trajectory of greenhouse gas (GHG) emissions and associated warming. For example, SSP2-4.5 is a GHG emissions trajectory based on socio-economic assumptions compatible with a trend scenario (SSP2). This trajectory results in a radiative forcing of 4.5 W/m² by 2100, corresponding to approximately 2.7 °C of warming compared to the pre-industrial period, as indicated in Table 5.

Table 5 : Warming levels according to SSP scenarios (IPCC, 2021).

SSP	Warming (2041–2060) in °C	Warming (2081–2100) in °C	Very likely range in °C (2081–2100)
SSP1-2.6	1.7	1.8	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	2.0	2.7	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	2.1	3.6	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	2.4	4.4	3.3 – 5.7

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

As part of this work, the decision was made to focus on the following four scenarios, which are recommended by the IPCC and capture the sensitivity of risks to different scenarios. SSP1-2.6 : An optimistic scenario featuring an economy based on renewable energy and low GHG emissions, with CO₂ emissions cut to net zero around 2075. SSP2-4.5 : The most likely scenario, characterized by intermediate GHG emissions. CO₂ emissions remain around current levels until 2050, then decline but do not reach net zero by 2100. SSP3-7.0 : A pessimistic scenario with high GHG emissions, where CO₂ emissions double by 2100. SSP5-8.5 : An optimistic scenario with an energy-intensive economy based on fossil fuels, resulting in CO₂ emissions tripling by 2075.

3. Method

Previously, a classification of atmospheric circulation was produced using clustering tools (PCA/HCA) over the historical period 1950-2014 (DJFMA), based on atmospheric variables (AV) correlated with solid precipitation (SP) from ERA5 reanalyses (Guerin & Viaux, 2023). This classification is referred to as the ERA5 classification. Subsequently, with AV from 15 CMIP6 projection models and using the same tools and clustering method, 15 classifications (one for each model) of atmospheric circulation were conducted. The most robust models, in comparison to the ERA5 classification, were selected based on several criteria. This classification is called the CMIP6 classification and will facilitate the analysis of the frequency of the STW and WA classes.

3.1 CMIP6 models classification method

First, the grids of the 15 CMIP6 models were interpolated (using bilinear interpolation) onto the grid of the ERA5 reanalysis to achieve regular latitude-longitude grids with a resolution of 0.25 ° x 0.25 °. Bilinear interpolation is a widely used technique in climate studies for re-gridding data (Lea et al., 2014 ; Thorarinsdottir et al., 2019 ; Almazroui et al., 2020 ; Wu et al., 2022). A test comparing the average differences in geopotential height 700 hPa, specific humidity 700 hPa, and air temperature 850 hPa values between the ERA5 classification and the CMIP6 models was conducted, with and without this interpolation step. The average differences were significantly lower when the CMIP6 data were re-mapped compared to using the original model resolutions.

Next, the daily data (for the period 1950-2014, DJFMA) of the 15 models and their 5 variables were extracted from a window extending from 30 ° south to 60 ° north latitude and from 40 ° west to 30 ° east longitude. This window was chosen to keep the WSN near the center of the space, slightly offset to the east : since the general circulation is oriented from west to east at this latitude, it is essential to consider reanalyzed atmospheric fields over the near Atlantic. Even if the atmospheric fields over the near Atlantic do not directly influence the SP of the WSN, they frequently lie upstream of the relevant atmospheric circulation. The extraction window for the AV consists of 1,785 grid points. Maximum resolution (0.25 °) is maintained near the center of the map (close to Southeast France), while a lower resolution (1.25 °) is used elsewhere. Each AV is extracted for all 1,785 grid points and for all DJFMA days. All these days are then classified according to the method described below.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

The classification method (identical to that used for the ERA5 classification) begins with a PCA for each of the five AV extracted from the 15 CMIP6 models to reduce data volume. According to the Kaiser rule, only components with an eigenvalue score greater than 1 were retained. The PCA results for each variable are then combined into a matrix (one matrix per CMIP6 model, totaling 15) for the purpose of performing an HCA. The separation of HCA classes is based on the last observed jump in inertia. As noted by Chesneau (2016), when the inertia jump between groupings is significant, the separation of groups is more robust. The result yields 6 ACT, potentially including the STW snow class and the WA class.

3.2 CMIP6 models selection method

To obtain the most robust projection of the STW snow class, a selection from the panel of 15 CMIP6 models is made. This involves calculating the average differences in geopotential height 700 hPa and specific humidity 700 hPa over a southeastern area (cf. Figure 8) between the STW of the ERA5 classification and the STW of the 15 CMIP6 classifications, evaluating each model. Additionally, the ten-year frequency of the STW in the ERA5 classification is compared to those in the CMIP6 classifications, providing a statistical evaluation point. The test window used for selecting the CMIP6 models corresponds to the $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ pixels used for data extraction (cf. Figure 8).

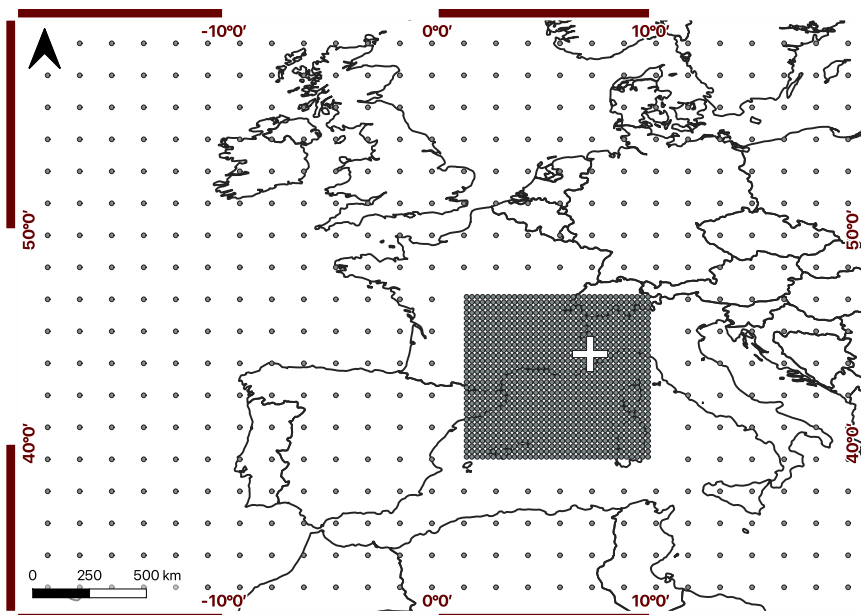


Figure 8 : CMIP6 models evaluation area in green points (Guerin, 2023).

3.3 Projection of the STW

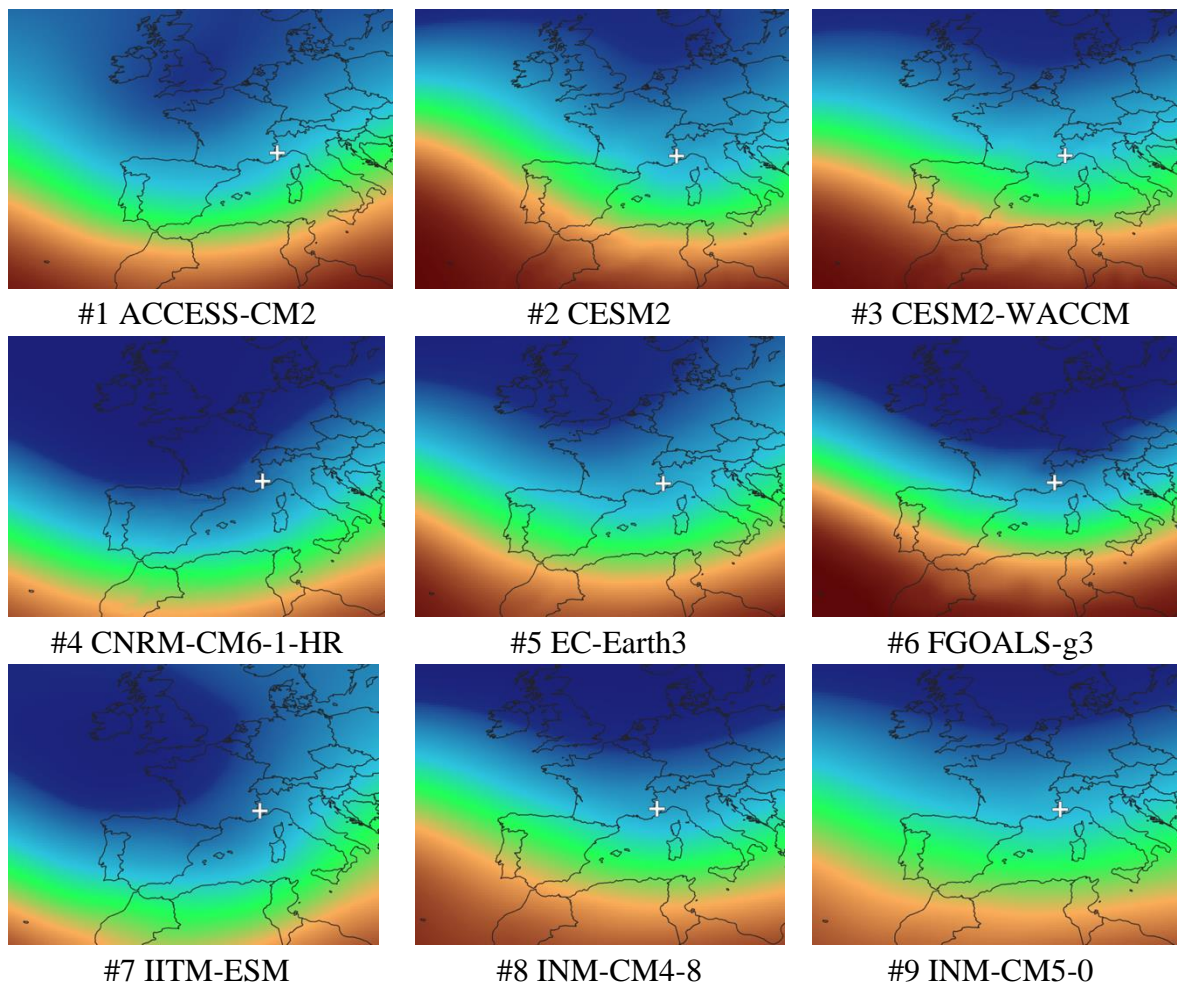
Once the selection of the most robust models has been made, the same classification steps must be repeated, this time with the different SSP scenarios previously selected : SSP1-2.6 ; SSP2-4.5 ; SSP3-7.0 ; SSP5-8.5. Then the 2020-2100 ten-year evolution of the snow class is calculated in order to perceive a possible change in its trend.

4. Results

4.1 Classifications of CMIP6 models over the historical period

4.1.1 Classifications result

The results of the 15 classifications conducted on CMIP6 models for the historical period (1950-2014, DJFMA) are presented below. Figure 9 corresponds to the snow circulation class STW, represented through the average of geopotential height 700 hPa, while Figure 10 corresponds to the specific humidity at 700 hPa. Thus, the 15 models fairly accurately represent the STW class, both in terms of low geopotential and their southwest flow, as well as through specific humidity and the core of high humidity centered on the Mediterranean basin. These results demonstrate that the classification algorithm used on ERA5 reanalysis data also works on CMIP6 models.



CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

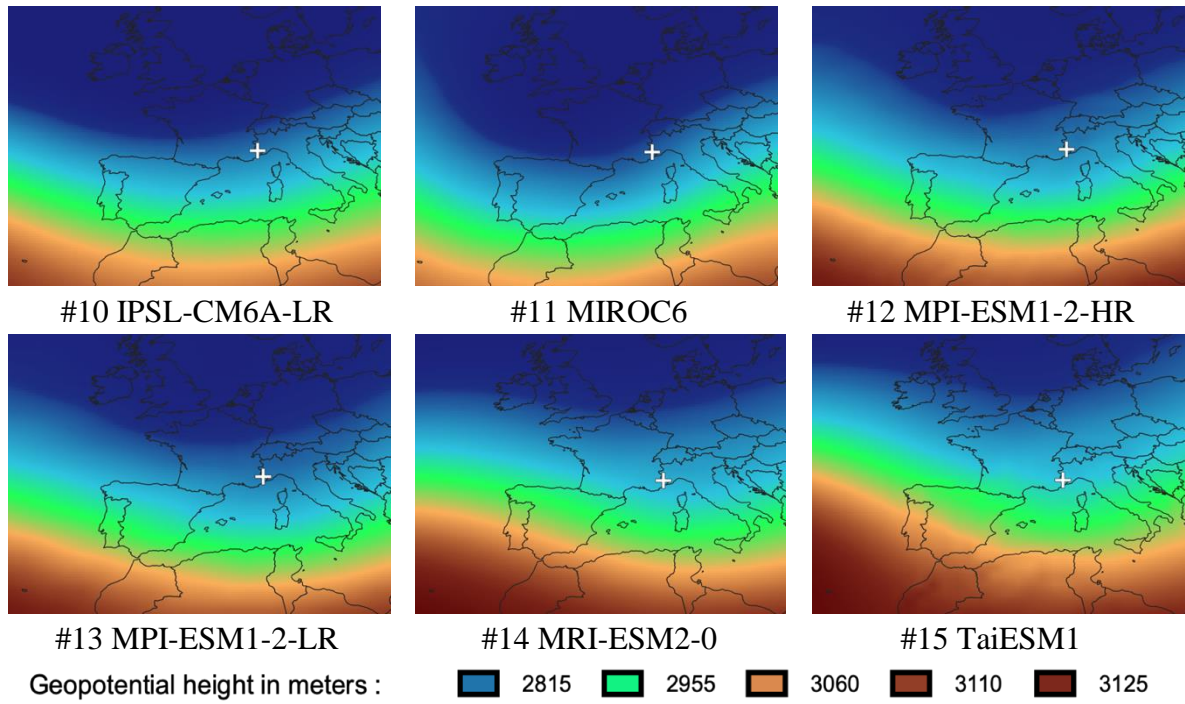
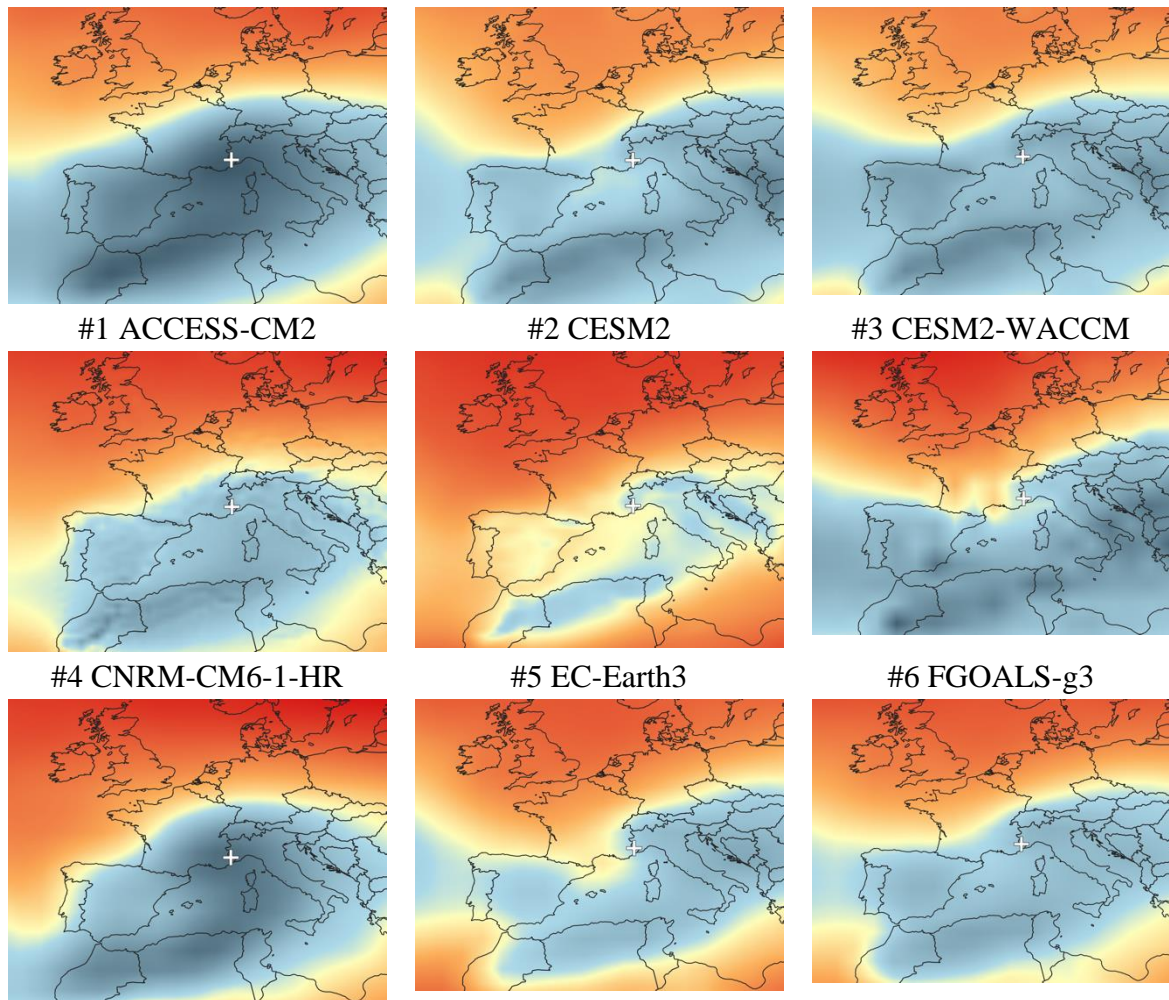


Figure 9 : Mean configurations of the geopotential height 850 hPa of the STW class obtained by PCA/HCA on the 15 CMIP6 models (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023).



CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

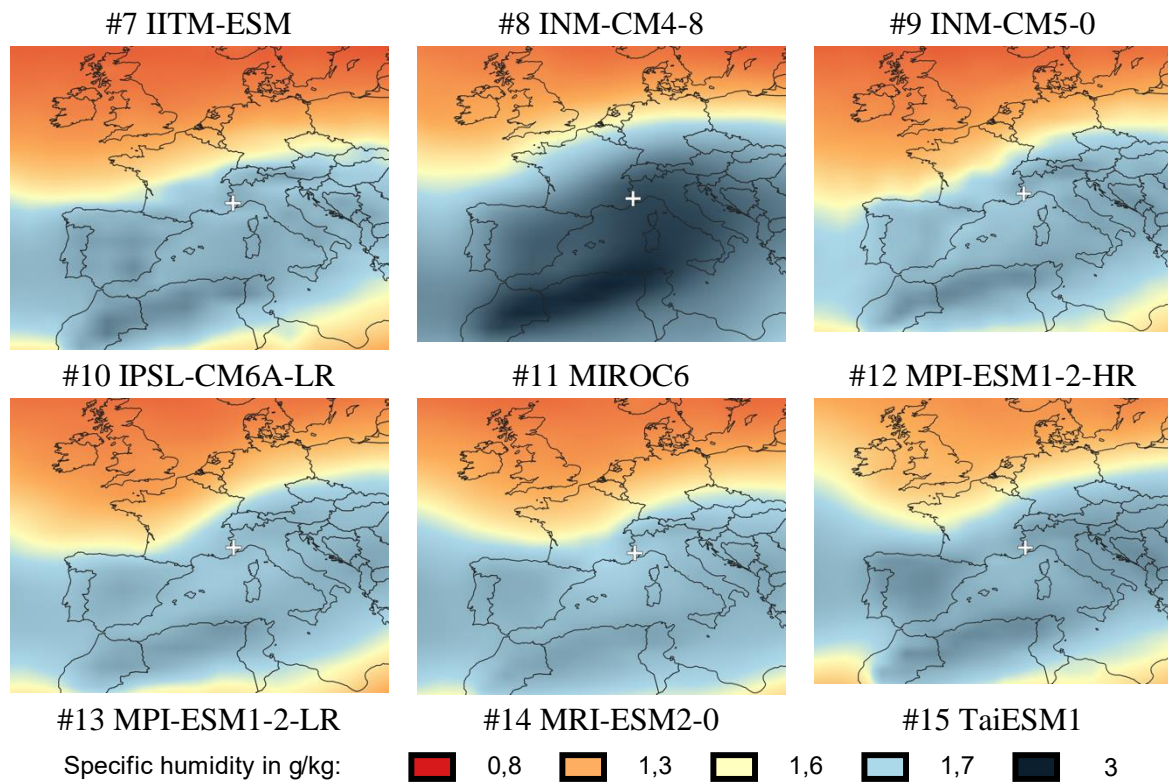
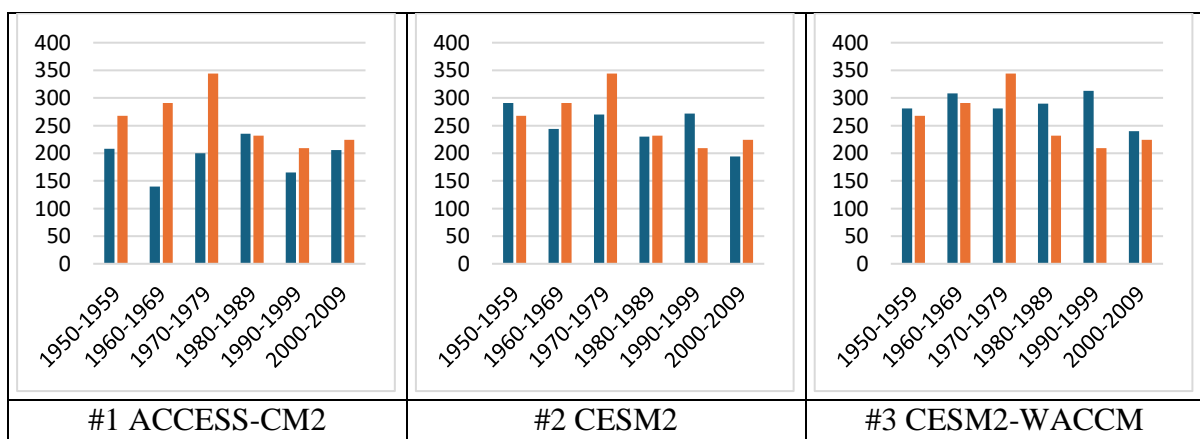


Figure 10 : Mean configurations of the specific humidity 700 hPa of the STW class obtained by PCA/HCA on the 15 CMIP6 models (ECMWF-ERA5, Guerin, 2023).

The histograms below (cf. Figure 11) show the ten-year frequency of the STW for the 15 CMIP6 models. This information is crucial to determine whether the CMIP6 models can statistically replicate the frequency of the STW occurrences. In each histogram, the orange bars represent the decadal frequency according to the ERA5 classification, while the blue bars indicate the frequencies for the 15 CMIP6 classifications.



CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.



Figure 11 : Decadal frequency of STW class for the ERA5 classification (orange bar) and the CMIP6 classification (blue bar). The vertical axis corresponds to the number of days of presence, while the vertical axis indicates the periods (Guerin, 2023).

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

4.1.2 Selection of the CMIP6 models

The objective of selecting CMIP6 models is to exclude those that significantly deviate from the STW representation produced by the ERA5 classification, thereby reducing the risk of error when using projections up to the year 2100. In other words, models that do not align well with the implemented classification method will be discarded. The average values in the study test area (cf. Figure 8) for the geopotential height 700 hPa and the specific humidity 700 hPa, as well as the ten-year frequency, are used to identify and exclude the least efficient CMIP6 models. The selection is based on the following three criteria, always compared to the ERA5 classification for the same period (1950-2014 for DJFMA) :

- Retain only CMIP6 models whose geopotential height 700 hPa deviations from the ERA5 classification are less than 40 m (excluding values greater than the 3rd quartile).
- Retain only CMIP6 models whose specific humidity 700 hPa deviations from the ERA5 classification are less than 0.5 g/kg (excluding values above the 3rd quartile).
- Retain only CMIP6 models whose deviations in the ten-year average frequency compared to the ERA5 classification are less than 70 days (excluding values above the 3rd quartile).

Based on these selection criteria, five CMIP6 models are retained : ACCESS-CM2, TaiESM1, CESM2-WACCM, MRI-ESM2-0, and MPI-ESM1-2-HR (cf. Table 6).

ID models	Name	Gap geopotential in m	Gap specific humidity in g/kg	Gap in the ten-year average in days
#1	ACCESS-CM2	9	0.2	70
#2	CESM2	16	0.52	40
#3	CESM2-WACCM	1	0.39	45
#4	CNRM-CM6-1-HR	49	0.4	40
#5	EC-Earth3	19	0.68	64
#6	FGOALS-g3	32	0.62	60
#7	IITM-ESM	42	0.12	76
#8	INM-CM4-8	21	0.57	43
#9	INM-CM5-0	8	0.44	89
#10	IPSL-CM6A-LR	44	0.38	101
#11	MIROC6	56	0.38	75
#12	MPI-ESM1-2-HR	38	0.4	59
#13	MPI-ESM1-2-LR	45	0.43	48
#14	MRI-ESM2-0	12	0.5	48
#15	TaiESM1	2	0.32	19
	Range (min/max)	<1 à 56>	<0,12 à 0,68>	<19 à 101>

	3rd quartile	43 m	0,51 g/kg	72 jours
--	--------------	------	-----------	----------

4.2 STW projection result

4.2.1 Frequency of evolution by 2060 and 2100

The histograms below (cf. Figure 12) illustrate the ten-year frequency of the STW snow circulation. During the historical period (1950-2019, DJFMA), this circulation accounted for 62 % of the total SP, 72 % of medium-intensity SP (approximately 15 cm), and 100 % of high-intensity SP (approximately 35 cm) in the study area.

The blue bar represents the historical period (1950-2020 for DJFMA - ERA5 classification), while the orange section depicts the future period (2020-2099 for DJFMA) based on the multi-model average of five CMIP6 models : ACCESS-CM2, CESM2-WACCM, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and TaiESM1. Each graph corresponds to one of the SSP scenarios (SSP12.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Table 7 provides the rate of evolution of STW over four time periods, each consisting of three decades :

- From 1950 to 1979, this is the reference period (pre-climate change) ;
- From 1990 to 2019, this is the contemporary period ;
- From 2030 to 2059, this represents medium-term projections ;
- From 2070 to 2099, this represents long-term projections.

The average ten-year frequency of STW for the reference period (1950-1979, DJFMA) is 302 occurrences (one occurrence corresponds to a day when STW was present over Western Europe). During the contemporary period (1990-2019, DJFMA), a decrease of 26.5 % (222 occurrences) is observed compared to the reference level. For medium-term climate projections (2030-2059, DJFMA), all scenarios indicate a decrease in the ten-year frequency of STW compared to the reference period. The SSP1-2.6 scenario (the most optimistic) indicates a 30 % decrease (211 occurrences), while the most likely scenario (SSP2-4.5) shows a nearly 41 % drop (177 occurrences). This decrease is even more pronounced with the high warming scenarios SSP3-7.0 and SSP5-8.5, with reductions of 59.5 % (122 occurrences) and 68 % (97 occurrences), respectively. In the long term, by 2100, the reduction levels remain approximately the same.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

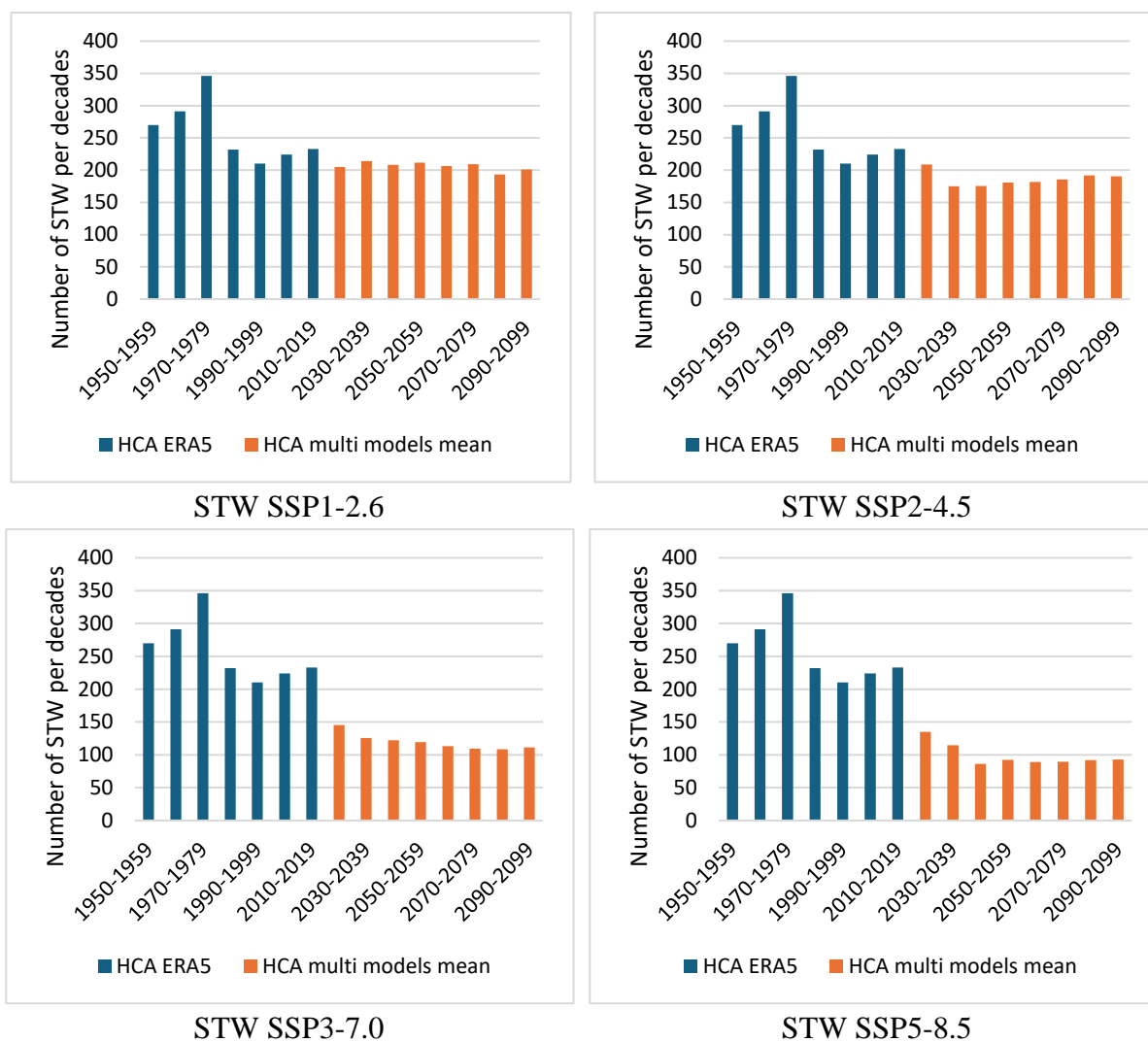


Figure 12 : Projection by 2100 (DJFMA) of the frequency of STW snow circulations on the Côte d'Azur massifs : use of ERA5 reanalyses and CMIP6 models (Guerin, 2023).

Table 7 : Frequency of occurrence and rate of change of the STW snow circulation class between 1950 and 2100 (DJFMA). The rates of change are calculated according to the reference period post climate change 1950-1979 (DJFMA) (Guerin, 2023).				
Classification	Numbers of occurrences (average of three decades)			
	1950-1979 (reference pe- riod)	1990-2019	2030-2059	2070-2099
ERA5 (reference classification)	302	222 (- 26.5 %)	-	-
SSP1-2.6	-	-	211 (- 30 %)	201 (- 33 %)
SSP2-4.5	-	-	177 (- 41 %)	189 (- 37 %)
SSP3-7.0	-	-	122 (- 59.5 %)	109 (- 64 %)
SSP5-8.5	-	-	97 (- 68 %)	91 (- 70 %)

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

4.2.2 Evolution of atmospheric variables linked to SP

Beyond analyzing the frequency of circulation patterns, it is also insightful to examine the evolution of AV correlated with SP by 2100 under different SSP scenarios, particularly focusing on the temperature at 850 hPa, an indicator of changes in the rain-snow limit. Table 8 presents the average atmospheric parameters in the study area during the presence of STW. Different periods are displayed for each scenario to avoid masking the pace of development trends. On the right of each value is the difference compared to the reference period of 1950-1979.

The geopotential height at 700 hPa increases across the different scenarios. The SSP3-7.0 and SSP5-8.5 scenarios exhibit the most significant increases, with +64 m and +74 m respectively by 2100 compared to the reference period. The SSP2-4.5 scenario shows a rise of +39 m by 2060 and +42 m by 2100. These results indicate a weakening of the STW class intensity in the future.

The specific humidity values at 700 hPa show little change ; however, a slight increase is noted across the scenarios. The SSP5-8.5 scenario, with the highest level of warming, experiences the largest increase, with +0.7 g/kg by 2060 and +0.9 g/kg by 2100. This trend logically follows the Clausius-Clapeyron equation (Clausius, 1850; Clapeyron, 1834), which describes the quantitative relationship between the vapor pressure of a substance and its temperature. As the air temperature rises, the amount of water vapor the air mass can contain increases.

The evolution of temperatures at 850 hPa is crucial for assessing changes in the rain-snow line. An upward trend in temperatures is observed across the scenarios, with a sharp increase for SSP5-8.5, showing +3.2 °C by 2060 and +4.6 °C by 2100 compared to the reference period. The most probable scenario, SSP2-4.5, shows an increase of +2.2 °C by 2060 and +2.5 °C by 2100. These results suggest an upward shift in the altitude of the rain-snow line, which would reduce the amount of solid precipitation in the Alpes-Maritimes mountain ranges.

	Geopotential 700 hPa (in meters)	Specific humidity 700 hPa (in g/kg)	Temperature 850 hPa (in °C)
ERA5 – 1950 - 1979 (DJFMA) Reference period	2940	2.3	1.6
ERA5 – 1990 - 2019 (DJFMA)	2945 (+ 5)	2.3 (0)	2 (+ 0.4)
SSP1-2.6 – 2030 - 2060 (DJFMA)	2955 (+ 15)	2.5 (+ 0.2)	2.5 (+ 0.9)
SSP2-4.5 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2979 (+ 39)	2.8 (+ 0.5)	3.8 (+ 2.2)
SSP3-7.0 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2991 (+ 51)	2.8 (+ 0.5)	4.1 (+ 2.5)
SSP5-8.5 – 2030 - 2059 (DJFMA)	2997 (+57)	3 (+ 0.7)	4.8 (+ 3.2)

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

SSP1-2.6 – 2070 - 2099 (DJFMA)	2953 (+13)	2.5 (+ 0.2)	2.7 (+ 1.1)
SSP2-4.5 – 2070 - 2099 (DJFMA)	2982 (+ 42)	2.8 (+ 0.5)	4.1 (+ 2.5)
SSP3-7.0 – 2070 - 2099 (DJFMA)	3004 (+ 64)	2.8 (+ 0.5)	5 (+ 3.4)
SSP5-8.5 – 2070 - 2099 (DJFMA)	3014 (+74)	3.2 (+ 0.9)	6.2 (+ 4.6)

4.3 WA projection result

4.3.1 Frequency of evolution by 2100

The histograms below (cf. Figure 13) depict the ten-year frequency of the WA circulation. As a reminder, during the historical period (1950-2019, DJFMA), this circulation caused no SP events in the study area. The average ten-year frequency of WA for the reference period (1950-1979, DJFMA) is 242 occurrences. During the contemporary period (1990-2019, DJFMA), there is a noted increase of 53 % (370 occurrences) compared to the reference period. For medium-term climate projections (2030-2059, DJFMA), all scenarios indicate a further increase in the ten-year frequency of WA compared to the reference period. The SSP1-2.6 scenario shows an increase of 54.5 % (374 occurrences), roughly aligning with the last three decades (1990-2019, DJFMA). The most likely scenario, SSP2-4.5, predicts a significant increase of 73.5 % (420 occurrences). The higher warming scenarios, SSP3-7.0 and SSP5-8.5, project even more substantial increases of 109 % (506 occurrences) and 107 % (501 occurrences) respectively. By 2100, these levels of increase remain roughly consistent with those projected for 2030-2059.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

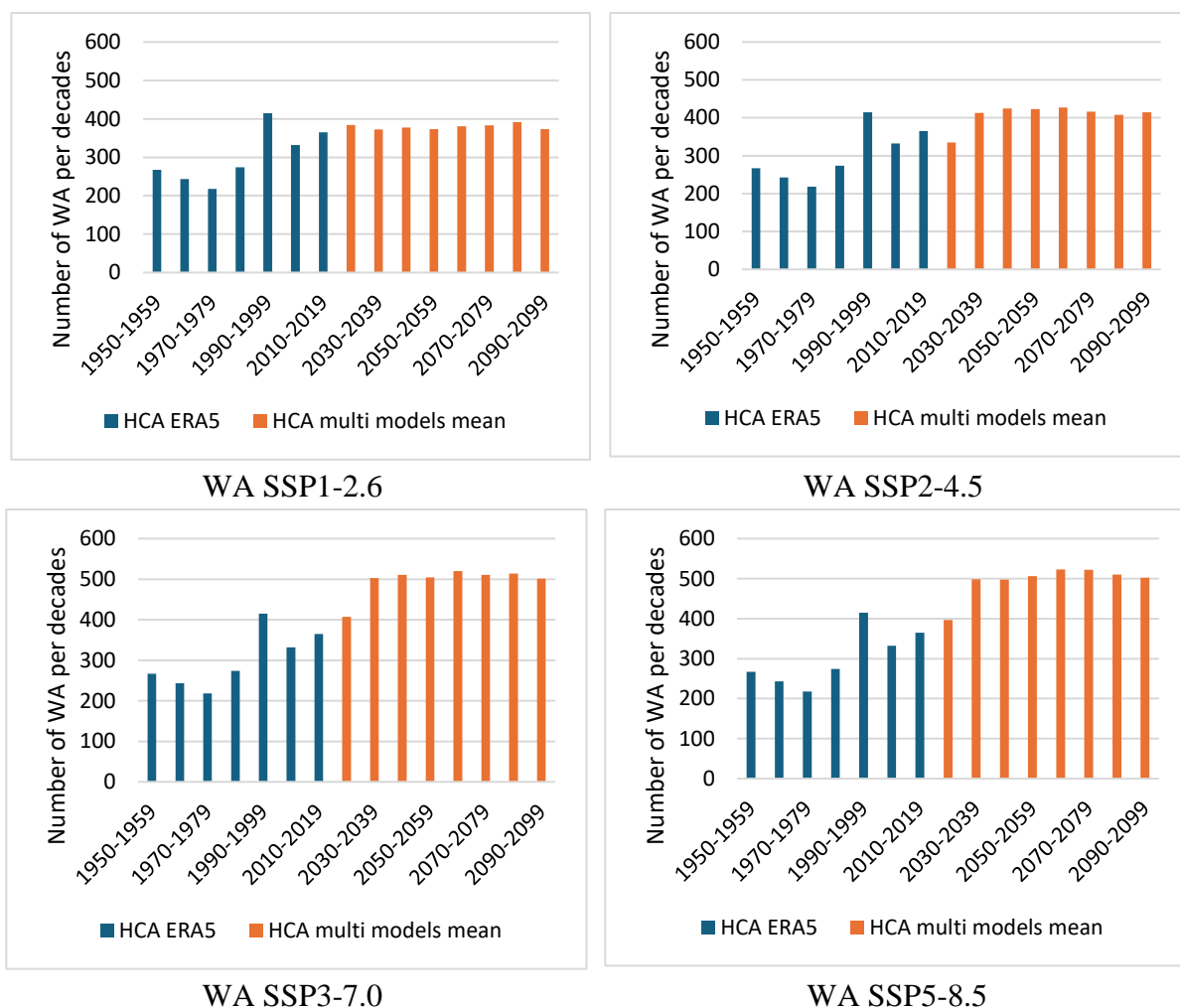


Figure 13 : Projection by 2100 (DJFMA) of the frequency of WA on the Côte d'Azur massifs : use of ERA5 reanalyses and CMIP6 models (Guerin, 2023).

Classification	Numbers of occurrences (average of three decades)			
	1950-1979 (reference period)	1990-2019	2030-2059	2070-2099
ERA5 (reference classification)	242	370 (53 %)	-	-
SSP1-2.6	-	-	374 (54.5 %)	383 (58 %)
SSP2-4.5	-	-	420 (73.5 %)	413 (70.5 %)
SSP3-7.0	-	-	506 (109 %)	509 (110 %)
SSP5-8.5	-	-	501 (107 %)	511 (111 %)

5. Discussion

In this study, we utilized a combination of ERA5 reanalysis data and CMIP6 climate models to project the evolution of atmospheric circulation types affecting Solid Precipitation (SP) in the Côte d'Azur massifs up to 2060 and 2100. Employing statistical classification methods, we distinguished two types of atmospheric circulation : a South cyclonic circulation with a trough over Western Europe (STW) and a West anticyclonic (WA) circulation. Our findings reveal a declining trend in the frequency of STW, responsible for the majority of SP in the region, accompanied by a corresponding increase in WA frequency. These trends align with climate warming projections and various socio-economic scenarios considered.

This study is innovative in its aim to quantify the frequency of atmospheric circulations conducive to SP, specifically the STW atmospheric circulations, in the Alpes-Maritimes massif in Southeast France from 1950 to 2100 for DJFMA. While prior studies on snow often concentrate on quantifying past or simulating future snow cover height and spatial distribution, our work focuses on investigating the meteorological phenomenon from a synoptic perspective. This approach is grounded in the understanding that SP represents the manifestation, on a local scale, of large-scale atmospheric circulation patterns (Planchon et al., 2015). The robustness of our projections stems from the incorporation of multiple atmospheric circulation variables (geopotential height 700 hPa, specific humidity 700 hPa, component V of the wind 700 hPa, air temperature 850 hPa, vertical velocity 700 hPa), rather than relying solely on a single sensitive weather variable as precipitation. This multi-variable approach in classification lends credibility to the obtained results.

The primary outcome of our research is the observed reduction in the occurrence frequency of the STW snow class during the historical period of 1990-2019, projected until 2060 and 2100 across all Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios. Conversely, a resurgence of anticyclonic blockages, and thus the WA class, is evident during the 1990-2019 period and projected for 2060 and 2100 under all scenarios. Similar results have been reported in several studies, indicating a poleward shift of high-pressure systems (Studholme & Gulev, 2018 ; Chemke & Polvani, 2019 ; Mathew & Kumar, 2019). The IPCC report from August 2021 suggests a likely expansion of the Hadley cell circulation, particularly towards the Northern hemisphere since 1980 (Chapter 8 of the 6th IPCC report, 2021). Regarding future projections, modifications in atmospheric circulation, and consequent shifts in anticyclone positioning, are highly probable according to the IPCC. Climate models consistently predict a greater meridional extension of Hadley cells in the future, associated with anticyclones shifting poleward, along with depression tracks. Therefore, further studies are warranted to comprehend the impact of climate change on large-scale circulation patterns. For the study region, these changes would likely result in reduced precipitation, leading to climatic desertification. The projected decrease in STW frequency suggests less favorable meteorological conditions for SP in the Côte d'Azur massifs in the future, potentially impacting water availability, the local economy, and sensitive mountain ecosystems. Simultaneously, the increased frequency of WA indicates a transition towards warmer and drier weather conditions, exacerbating drought concerns and escalating fire risks in the area. The findings of this study underscore the importance of implementing adaptation and mitigation measures to address anticipated climate changes in the Côte d'Azur massifs. Continued monitoring and research efforts are essential for better understanding the potential

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

impact of climate change on the region's fragile mountain ecosystems. These results can inform management decisions and adaptation policies aimed at mitigating the adverse effects of climate change in this vulnerable region.

The ERA5 reanalysis data used for the reference classification are widely accepted within the scientific community and have been utilized in numerous recent climate studies on snow (Shrestha et al., 2023 ; Lei et al., 2022 ; Alonso-González et al., 2021 ; Orsolini et al., 2021). These data served as the reference dataset to develop a classification algorithm and subsequently identify the most effective CMIP6 projection models for reproduction. This rigorous selection process, based on various criteria and alignment with reference data, ensures the most accurate projection of the STW snow class, as inefficient CMIP6 models were excluded from the study. Our results are based on the utilization of multiple CMIP6 climate models and validation against ERA5 reanalysis data. The selection of the most reliable CMIP6 models was guided by their ability to replicate observed atmospheric circulation characteristics in the reanalysis data. However, it is important to acknowledge that uncertainties inherent in climate projections cannot be entirely eliminated, and discrepancies may exist between different models and scenarios.

While our study offers valuable insights into future trends of solid precipitation in the Côte d'Azur massifs, it does have limitations. For instance, we did not consider other factors influencing solid precipitation, such as local temperature and humidity conditions, or potential changes in regional topography. Furthermore, our projections are contingent upon assumptions regarding future greenhouse gas emissions and socio-economic scenarios, which may vary due to external factors. To enhance accuracy, conducting more detailed studies and integrating results from multiple climate models with long-term field observations is recommended.

6. Conclusion

This study examines the evolution of atmospheric circulations driving solid precipitation (SP) in the Alpes-Maritimes massif on the Côte d'Azur (Mediterranean part of southeastern France) from 1950 to 2100, focusing on December to April. Specifically, it aims to assess the frequency of occurrence of two snow circulation classes, the South circulation with a trough on Western Europe (STW) and its opposite, the West anticyclonic circulation (WA), across various periods and horizons : post-climate change (1950-1979) ; contemporary (1990-2019) ; medium-term (2030-2059) ; and long-term (2060-2099).

Previously, these two circulation classes were identified using PCA/HCA clustering tools based on ERA5 reanalyses. Five variables correlated with the SP at five observation posts (Isola 2000, Estenc, Valberg, Val Casterino, and Auron) served as input data to the classification algorithm : geopotential height at 700 hPa, temperature at 850 hPa, vertical velocity at 700 hPa, specific humidity at 700 hPa, and the V component of wind at 700 hPa. This classification of atmospheric circulation, termed ERA5 classification, serves as a reference for subsequent climate projections for 2060 and 2100.

During the historical period (1950-2019), STW caused, according to a correspondence analysis with the measurement network, 62 % of the total SP, 72 % of SP of average intensity (approximately 15 cm), and 100 % of high-intensity SP (approximately 35 cm). This class represents the most productive category in terms of SP within the ERA5 reference classification

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

and is therefore crucial for predicting future snow cover trends in the Alpes-Maritimes massif. In contrast, WA is associated with stable, dry, and warm weather (characterized by high temperatures and low specific humidity due to the southern origin of its flow) in the study region and has never caused an SP event.

The subsequent phase of the study involved projecting these two classes to the horizons of 2060 and 2100 under four SSP scenarios : SSP1-2.6 ; SSP2-4.5 ; SSP3-7.0 ; SSP5-8.5. To accomplish this, a selection of CMIP6 projection models was conducted, aiming to retain only the models that best matched the ERA5 reference classification algorithm. Initially, 15 CMIP6 models and their respective five variables were utilized to produce classifications over the historical period of 1950-2014. Then, based on comparison criteria with STW of the ERA5 reference classification over the same period, five models were retained : ACCESS-CM2, CESM2-WACCM, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and TaiESM1.

Projections for 2060 and 2100 of STW and WA were generated using a multi-model average, incorporating the five CMIP6 models selected earlier. These projections were then compared to the reference period of 1950-1979, chosen due to its minimal impact from climate change and the availability of ERA5 reanalysis data from 1950. The average ten-year frequency of STW for the reference period 1950-1979 is 302 occurrences (one occurrence corresponds to a day during which STW was present over western Europe). Over the contemporary period (1990-2019), a decrease of 26.5 % (222 occurrences) is already noted, compared to the reference level. In terms of medium-term climate projections (2030-2059), all scenarios indicate a decrease in the ten-year frequency of STW compared to the reference period. The SSP1-2.6 scenario (the most optimistic) indicates a decrease of 30 % (211 occurrences), while the most likely scenario (SSP2-4.5) shows a drop of almost 41 % (177 occurrences). This means that the circulations at the origin of SP will be almost half as present by 2060 as they were during the reference period. This decrease is even more marked with the high warming scenarios SSP3-7.0 and SSP5-8.5, with - 59.5 % (122 occurrences) and - 68 % (97 occurrences) respectively. In the long term period (2100), the levels of reduction remain within a few percentages of the same.

The projections for the WA class show the exact opposite, with an increase in its ten-year frequency for the four SSP scenarios. Occurrences gradually increase as you move from one scenario to another. The average ten-year frequency of WA for the reference period 1950-1979 is 242 occurrences. Over the contemporary period (1990-2019), an increase of 53 % (370 occurrences) is noted. In the medium term (2030-2059), all scenarios indicate an increase in the ten-year frequency of WA compared to the reference period. The SSP1-2.6 scenario indicates an increase of 54.5 % (374 occurrences), which roughly corresponds to what happened over the last 3 decades (1990-2019). On the other hand, the SSP2-4.5 scenario shows a strong increase of 73.5 % (420 occurrences). This increase is even more marked with the high warming scenarios SSP3-7.0 and SSP5-8.5, with 109 % (506 occurrences) and 107 % (501 occurrences) respectively. By 2100, the levels of increase also remain the same as those mentioned for the period 2030-2059.

These findings suggest that global warming likely influences the general circulation at the latitudes of the study area by altering the frequency of appearance of different regimes. The impact of GHG emissions was also evident, with scenarios characterized by high emissions demonstrating the greatest reduction in the STW class and the largest increase in the WA class.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

Beyond this high probability of a reduction in SP events, the study also notes a fairly clear warming of the temperature within the STW class. The temperature 850 hPa, for the most probable scenario (SSP-2-4.5) expected to increase by +2.5°C by 2100, compared to the reference period 1950-1979. For the SSP5-8.5 scenario with high warming, the increase explodes with + 3.2 °C by 2060 and + 4.6 °C by 2100. Thus, the rain-snow limit should rise in altitude, leaving territories usually snowy in winter, completely devoid of snow.

In conclusion, the consequences are significant, as all scenarios project a decrease in the atmospheric circulations responsible for SP events by 2060, coupled with a clear warming of temperatures within the STW class. This profound climate change, marked by a drying of winter conditions, is expected to have multifaceted impacts on the Côte d'Azur massifs, including economic, ecological, and hydrological repercussions. Adaptation efforts are essential to mitigate these consequences, as the future of snow cover in this region faces considerable challenges. An adaptation of these territories has already started to take place, via a diversification of the activities offered by the ski resorts, which are now developing activities out of ski season in order to smooth their turnover over the entire year and not depend only on SP. If resorts wish to maintain a viable economy over time, they will therefore have to reduce their investments in skiing, because even the use of emergency solutions such as snow cannons seems unviable, as precipitation appears to be decreasing and temperatures are increasing... Adaptation efforts will have to continue to limit the consequences, because the snow levels experienced in the past will no longer be the same in the years to come, although annual variability could lead to abundant years in SP, as it was the case for the 2023-2024 season.

Finally, beyond the consequences of a reduction in SP, concerns are now focused on water resources and the lack of liquid precipitation, which are likely to be felt more and more in the coming decades. The latter being governed in part by the same large-scale mechanisms as SP. The use of this type of projections could largely be adapted to this type of meteorological event, in order to analyze its possible development trends.

4.6 SYNTHÈSE DU CHAPITRE.

Ce chapitre a illustré l'importance et l'utilité des modèles CMIP6 dans la projection des changements futurs des schémas de circulation atmosphérique favorables aux précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes, offrant des perspectives cruciales pour la planification et l'adaptation au changement climatique. Les résultats mettent en évidence la nécessité de politiques anticipatives pour gérer les impacts écologiques et économiques attendus, tout en soulignant l'importance d'une collaboration continue entre les scientifiques, les décideurs et les communautés locales pour développer des réponses efficaces aux défis climatiques à venir.

En tirant les enseignements de ces analyses et projections, il est désormais essentiel de synthétiser l'ensemble des résultats obtenus dans cette étude. Le chapitre conclusif abordera ces aspects en récapitulant les contributions majeures de la recherche et en proposant des orientations pour les actions futures face aux défis climatiques dans les Alpes-Maritimes.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE 4.

Alonso-González E., Gutmann E., Aalstad K., Fayad A., Bouchet M., Gascoin S., 2021. Snowpack dynamics in the Lebanese mountains from quasi-dynamically downscaled ERA5 reanalysis updated by assimilating remotely sensed fractional snow-covered area, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 4455–4471, <https://doi.org/10.5194/hess-25-4455-2021>.

Almazroui M., Saeed S., Saeed F., Islam M. N., Ismail, M., 2020. Projections of Precipitation and Temperature over the South Asian Countries in CMIP6. *Earth Systems and Environment* 4, 297–320.

Barbier B., 1982. L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports). *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 485-486 pp. 121-124.

Barry R., & Gan T., 2022. Snowfall and snow cover. In *The Global Cryosphere: Past, Present, and Future* (pp. 15-86). Cambridge: Cambridge University Press.

Bokhorst S., Pedersen S.H., Brucker L., 2016. Changing Arctic snow cover: A review of recent developments and assessment of future needs for observations, modelling, and impacts. *Ambio* 45, 516–537 (2016).

Capozzi V., De Vivo C., Budillon G., 2022. Synoptic control over winter snowfall variability observed in a remote site of Apennine Mountains (Italy), 1884–2015. *The Cryosphere*, 16, 1741–1763, 2022, <https://doi.org/10.5194/tc-16-1741-2022>.

Carrega, P., et al., 2021. Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes. *Physio-G eo* 16, 70. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.12370>.

Chemke R., Polvani L-M., 2019. Opposite tropical circulation trends in climate models and in reanalyses. *Nat. Geosci.* 12, 528–532. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0383-x>

Chesneau C., 2016. *Éléments de classification*. Master. France. (cel-01252973v4)

Chochon, R., Martin, N., Lebourg, T., 2021. Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes : atmospheric mechanisms and resulting rainfall. In: *SimHydro 2021 – Models for Complex and Global Water Issues-Practices and Expectations*. Sophia-Antipolis France, pp. 16–18. June 2021.

Clapeyron M. C., 1834). "Mémoire sur la puissance motrice de la chaleur". *Journal de l'École polytechnique [fr]* (in French). 23: 153–190. <ark:/12148/bpt6k4336791/f157>.

Clausius R., 1850. "Ueber die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen" [On the motive power of heat and the laws which can be deduced therefrom regarding the theory of heat]. *Annalen der Physik* (in German). 155 (4): 500–524. Bibcode:1850AnP...155..500C. doi:10.1002/andp.18501550403. hdl:2027/uc1.5b242250.

Croce P., Formichi P., Landi P., Mercogliano P., Bucchignani E., Dosio A., Dimova S., 2018. The snow load in Europe and the climate change, *Climate Risk Management*, Volume 20, 2018, Pages 138-154, ISSN 2212-0963.

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., Taylor K. E., 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.

Franco C., 2021. *Environmental History, The History of Tourism in the Mountains and the Construction of New Knowledge: A Study of the Architecture of Winter Sports Resorts in the French-Italian Alps* », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*.

François H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., 2016. Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux Alpes françaises et

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). La Houille Blanche, n° 4, 2016, p. 66-84.

Guerin G., Martin N., 2022. Atmospheric circulation conditions and snowy weather in the Southern Alps: Case of the Isola 2000 weather station. *Polar Science*. 10.1016/j.polar.2022.100922.

Guerin, G., Martin N., 2023. Solid precipitation and its relationship with the Hess and Brezowsky classification: case in the French department of the Alpes-Maritimes. *Bull. of Atmos. Sci. & Technol.* 4, 2. <https://doi.org/10.1007/s42865-023-00056-5>

Guerin, G., Martin N., 2023. How changes in the circulation patterns specific to the solid precipitations can affect these meteorological events in the Alpine stations of the Mediterranean region? Use of the ERA5 reanalyses. *Theoretical and Applied Climatology*. 155. 1-22. 10.1007/s00704-023-04733-5.

IPCC, 2021: *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte V., P. Zhai A., Pirani S.L., Connors C., Péan S., Berger N., Caud Y., Chen L., Goldfarb M.L., Gomis M., Huang K., Leitzell E., Lonnoy J.B.R., Matthews T.K., Maycock T., Waterfield O., Yelekçi R., Zhou B. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Joye J-F., 2019. Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. *Le point après l'annulation partielle du décret UTN. Journal Spécial des Sociétés.*

Kaiser H.F., 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141–151.

Kendall M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*, 4th edition, Charles Griffin, London.

Kysely, J., Beguería, S., Beranov' a, R., Ga' al, L., Lo'pez-Moreno, J.-I., 2012. Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. *Global Planet. Change Volumes 98–99*, 63–72.

Lea JM., Fitt RNL., Brough S., Carr G., Dick J., Jones N., Webster RJ., 2024. Making climate reanalysis and CMIP6 data processing easy: two "point-and-click" cloud based user interfaces for environmental and ecological studies. *Front. Environ. Sci.* 12:1294446. doi: 10.3389/fenvs.2024.1294446

Lei Y., Pan J., Xiong C., et al., 2023. Snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau observed from space in against ERA5: matters of scale. *Clim Dyn* 60, 1523–1541 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06376-0>

Mahto S-S., Mishra V., 2019. Does ERA-5 outperform other reanalysis products for hydrologic applications in India? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JD031155>

Mann H.B., 1945. Non-parametric tests against trend, *Econometrica* 13:163-171.

Mathew S-S., Kumar K-K., 2019. Characterization of the long-term changes in moisture, clouds and precipitation in the ascending and descending branches of the Hadley Circulation. *Journal of Hydrology*. Volume 570. Pages 366-377. ISSN 0022-1694. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.047>.

Moss R., Edmonds J., Hibbard K. et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Nogueira M., 2020. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years : Process-based analysis of systematic and random differences. *Journal of Hydrology*, Volume 583.

Orsolini Y., Wegmann M., Dutra E., Liu B., Balsamo G., Yang K., de Rosnay P., Zhu C., Wang W., Senan R., Arduini G., 2019. Evaluation of snow depth and snow cover over the Tibetan Plateau in global reanalyses using in situ and satellite remote sensing observations, *The Cryosphere*, 13, 2221–2239, <https://doi.org/10.5194/tc-13-2221-2019>.

CHAPITRE 4 : PROJECTIONS DES TENDANCES FUTURES (2030-2100, DJFMA) DES TYPES DE CIRCULATION ATMOPSHÉRIQUE.

Parker W., 2016. *Reanalyses and Observations: What's the Difference?*. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 97. 160128144638003. [10.1175/BAMS-D-14-00226.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00226.1).

Pettitt A-N., 1979. *A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem*. *Journal of the Royal Society: Series C (Applied Statistics)*, 28, 126-135.
<https://doi.org/10.2307/2346729>.

Piras, M., Mascaro, G., Deidda, R., Vivoni, E., 2016. *Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin*. *Sci. Total Environ.* 543.

Planchon O., Cantat O., Quénoel H., 2015. *Types de temps et types de circulation atmosphérique : Essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France)*. XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège 2015.

Poccard I., 2000. *Étude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses. Exemples d'application aux précipitations en Afrique tropicale*. Géographie. Université de Bourgogne. Français.

Shrestha S., Zaramella M., Callegari M., Greifeneder F., Borga M., 2023. *Scale Dependence of Errors in Snow Water Equivalent Simulations Using ERA5 Reanalysis over Alpine Basins*. *Climate* 2023, 11, 154.
<https://doi.org/10.3390/cli11070154>

Silber I., Verlinde J., Wang S-H., Bromwich D., Fridlind A., Cadetdu M-P., Eloranta E., Flynn C., 2019. *Cloud Influence on ERA5 and AMPS Surface Downwelling Longwave Radiation Biases in West Antarctica*. *Journal of Climate*. 32. [10.1175/JCLI-D-19-0149.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0149.1).

Studholme J., Gulev S., 2018. *Concurrent Changes to Hadley Circulation and the Meridional Distribution of Tropical Cyclones*. *J. Climate*, 31, 4367–4389, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0852.1>.

Thorarinsdottir T. L., Sillmann J., Haugen M., Gissibl, N., Sandstad M., 2019. *Evaluation of CMIP5 and CMIP6 simulations of historical surface air temperature extremes using proper evaluation methods*. *Environmental Research Letters* 15.

Wu H., Lei H., Lu W., Liu Z., 2022. *Future changes in precipitation over the upper Yangtze River basin based on bias correction spatial downscaling of models from CMIP6*. *Environmental Research Communications* 4, 45002

Zhang R., Wang H., Fu Q., Rasch P.J., Wang X., 2019. *Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s*. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2019 Nov 26;116(48):23947-23953. doi: [10.1073/pnas.1915258116](https://doi.org/10.1073/pnas.1915258116). Epub 2019 Nov 11. PMID: 31712425; PMCID: PMC6883849.

Zuo H., Alonso-Balmaseda M., Tietsche S., Mogensen K., and Mayer M., 2019. *The ECMWF operational ensemble reanalysis–analysis system for ocean and sea ice: a description of the system and assessment* The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Shinfield Rd, Reading RG2 9AX, UK, Ocean science 2019.

CHAPITRE CONCLUSIF.

Ce chapitre conclusif a pour objectif de synthétiser les principaux résultats obtenus au cours de cette thèse, de discuter de la contribution globale de cette recherche à la compréhension des interactions entre la circulation atmosphérique et les précipitations solides dans les Alpes du Sud et plus spécifiquement les massifs du département des Alpes-Maritimes, et de proposer des perspectives de recherche ainsi que des implications pratiques pour la gestion des ressources naturelles, les politiques climatiques, et la prévision météorologique.

SYNTHÈSE DÉTAILLÉE DES PRINCIPAUX RÉSULTATS DES QUATRES ARTICLES.

Afin de mieux comprendre l'évolution des précipitations solides dans les Alpes du Sud, cette thèse a été articulée autour de quatre articles scientifiques. Ces articles ont chacun abordé des aspects spécifiques et complémentaires de la problématique étudiée. Dans cette première section, nous proposons une synthèse détaillée des principaux résultats obtenus à travers ces quatre contributions.

Résultats du premier article.

Le premier article a permis de poser les bases de l'étude en analysant les tendances historiques des précipitations solides à la station d'Isola 2000, une station de référence pour la région des Alpes-Maritimes. Attention, les résultats obtenus sont produits à partir de trois mois d'hiver (janvier, février et mars). Les résultats de cette analyse historique sont essentiels pour comprendre les dynamiques passées des chutes de neige dans un contexte de réchauffement climatique. Pour mieux contextualiser ces résultats, il est intéressant de noter que des études récentes ont montré que les montagnes à travers le monde subissent une intensification des précipitations sous la forme liquide, en partie due au réchauffement climatique. Par exemple, une étude publiée dans *Nature* souligne que le réchauffement global entraîne une augmentation des précipitations pluvieuses au détriment des chutes de neige dans de nombreuses régions montagneuses, amplifiant ainsi le risque d'événements de précipitations extrêmes, comme des crues soudaines (Ombadi et al., 2023).

Phase de diminution (1972-1993) : durant cette première phase, les observations ont révélé une diminution marquée de la fréquence et de l'intensité des jours de neige. Cette diminution a été corrélée à une augmentation des températures hivernales, observée tant à la surface qu'à 850 hPa. Les anomalies de température identifiées par les réanalyses ERA-INTERIM confirment une tendance au réchauffement depuis les années 1990, accentuant la réduction des précipitations neigeuses, en particulier à basse et moyenne altitude. Cette tendance préoccupante s'est toutefois atténuée au cours des années suivantes, laissant place à une phase d'augmentation relative des chutes de neige.

Phase de stabilisation et d'augmentation (1994-2016) : après une période de déclin continu, les précipitations neigeuses ont montré une certaine résilience à partir du milieu des années 1990. Cette phase de stabilisation, suivie d'une légère augmentation, a coïncidé avec une fréquence accrue des circulations atmosphériques favorables aux chutes de neige, telles que les circulations cycloniques occidentales et méridionales. Ces résultats sont particulièrement

intéressants, car ils suggèrent que malgré le réchauffement climatique, certaines conditions atmosphériques peuvent encore favoriser la formation de neige, même à des altitudes moyennes.

Corrélations entre variables atmosphériques et précipitations solides : l'étude a mis en évidence des corrélations fortes entre les précipitations neigeuses et des variables atmosphériques telles que la vitesse verticale, l'humidité spécifique, la pression au niveau de la mer etc. Ces résultats montrent que les chutes de neige dans les Alpes-Maritimes dépendent fortement de la dynamique des circulations atmosphériques, particulièrement des dépressions sur l'Atlantique Nord et des creux dépressionnaires orientés NO-SE qui favorisent l'apport d'air humide depuis la Méditerranée.

Résultats du deuxième article.

Ayant établi une compréhension solide des tendances historiques des précipitations solides, le deuxième article s'est davantage concentré sur l'évaluation de la classification de Hess et Brezowsky pour décrire les types de circulation atmosphérique responsables des chutes de neige dans les Alpes-Maritimes. Cette évaluation est cruciale pour déterminer la pertinence de la classification dans un contexte régional spécifique. Cependant, avant toute chose, l'étude des tendances historiques a été revisitée sur une période de quatre mois (décembre à avril), montrant des évolutions plus fines dans la fréquence des chutes de neige à la station de référence d'Isola 2000 (1912 mètres d'altitude).

Tendances historiques de la fréquence d'évolution des occurrences de précipitations solides : entre 1985 et 1999 pour la saison allant de décembre à avril, une diminution significative du nombre d'événements de précipitations solides a été observée, passant d'environ 40 événements par saison à seulement 20. À partir de 2000 jusqu'à 2015, une augmentation progressive des précipitations neigeuses a été notée, ramenant le nombre d'événements à environ 40 par saison. Cependant, depuis 2016, une nouvelle tendance à la baisse se dessine, avec une moyenne de moins de 30 événements par saison entre 2017 et 2019, soulignant une nouvelle phase de réduction potentiellement liée à l'augmentation continue des températures et aux changements dans les schémas de circulation atmosphérique.

Tendances historiques mensuelles de la fréquence d'évolution des occurrences de précipitations solides : l'article examine également les tendances mensuelles, révélant une diminution significative des chutes de neige en décembre, janvier, et avril. Cette diminution pourrait indiquer un réchauffement précoce en hiver, augmentant la limite pluie-neige ou réduisant les circulations favorables à la neige en début et fin de saison. En revanche, les mois de février et mars montrent une légère augmentation, suggérant que les conditions hivernales centrales restent propices aux chutes de neige, malgré le réchauffement global. Ces tendances mensuelles mettent en évidence l'impact du changement climatique sur la saisonnalité et la durée des chutes de neige dans cette région.

Limites de la classification de Hess et Brezowsky pour les Alpes-Maritimes : l'étude a montré que cette classification, bien qu'efficace pour d'autres régions d'Europe centrale, ne parvient pas à identifier avec précision les types de circulations spécifiques aux chutes de neige dans les Alpes-Maritimes. En effet, les sous-types de circulation inclus ne reflètent pas toujours les conditions propices à la neige dans cette région, en raison de la complexité topographique et de l'influence de la Méditerranée. Cela est cohérent avec d'autres recherches montrant que

les classifications atmosphériques généralistes peuvent ne pas capturer les dynamiques spécifiques des régions montagneuses, où l'effet orographique joue un rôle crucial (Sýkorová et al., 2020). Le concept d'effet orographique, qui décrit comment l'air humide se refroidit en montant le long des montagnes, produisant de la neige sur les versants au vent, est fondamental pour comprendre pourquoi des classifications spécifiques sont nécessaires dans les Alpes. Cette observation a conduit à la conclusion qu'il est nécessaire de développer une classification plus adaptée.

Nécessité d'une classification adaptée : la thèse propose que pour mieux comprendre et prévoir les chutes de neige dans les Alpes du Sud, il est crucial de développer une classification spécifique, intégrant des variables atmosphériques telles que l'humidité spécifique, la vitesse verticale, la hauteur de géopotentiel, la température, la composante méridionale du vent, qui ont montré une forte corrélation avec les précipitations solides. Cette nouvelle approche pourrait fournir des résultats plus précis et plus utiles pour les prévisions locales. Forts de ces constats, le troisième article a entrepris de développer une telle classification spécifique aux chutes de neige.

Résultats du troisième article.

Le troisième article représente une avancée significative dans l'analyse des précipitations solides, en développant une classification de la circulation atmosphérique nourrie par des variables corrélées aux chutes de neige, à partir des données de réanalyse ERA5 couvrant la période de 1950 à 2019 (saison de décembre à avril).

Méthodologie et développement de la classification : pour élaborer cette classification, il a été employé une combinaison de techniques statistiques avancées, telles que l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Ces méthodes ont permis de réduire la complexité des données tout en identifiant des groupes homogènes d'événements météorologiques favorisant les chutes de neige. Cette classification s'inscrit dans un besoin plus large identifié par la communauté scientifique pour des modèles régionaux plus précis. En particulier, des recherches récentes montrent que le réchauffement climatique entraîne des réponses très variables dans les régions montagneuses, notamment en termes d'augmentation des températures et de modifications des schémas de précipitation (Gutowski et al., 2020 ; Kim et al., 2022). L'introduction de méthodologies telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) représente ici un pas significatif vers une meilleure compréhension de ces dynamiques locales. Grâce à cette méthodologie rigoureuse, des circulations à neige ont pu être identifiées, ouvrant de nouvelles perspectives pour la compréhension des mécanismes météorologiques à l'œuvre dans la région.

Identification des circulations spécifiques aux chutes de neige : la classification développée a permis d'identifier des types de circulations spécifiques aux chutes de neige, tels que les circulations cycloniques et méridionales, qui sont particulièrement propices aux événements abondants dans les Alpes du Sud. Ces circulations sont caractérisées par des configurations atmosphériques complexes qui favorisent l'apport d'humidité et la formation de neige, même dans un contexte de réchauffement climatique. Cette classification n'est pas seulement un outil descriptif, elle a également été utilisée pour projeter l'évolution future de la fréquence d'occurrence des circulations à neige, un aspect crucial abordé dans le quatrième article.

Résultats du quatrième article.

Le quatrième article s'est focalisé sur les projections climatiques des types de circulations favorables aux précipitations solides jusqu'à l'horizon 2060 et 2100, en utilisant les modèles climatiques CMIP6. Ces projections sont cruciales pour anticiper l'avenir de l'enneigement dans les Alpes du Sud.

Projections à l'horizon 2060 et 2100 de la fréquence de la circulation à neige STW : les projections climatiques jusqu'à 2060 et 2100 montrent une diminution significative (par rapport à la période de référence 1950-1979) de la fréquence de la circulation cyclonique du sud avec un creux sur l'Europe occidentale (STW), qui est particulièrement propice aux précipitations solides dans les Alpes-Maritimes. Selon le scénario SSP5-8.5, le nombre moyen d'occurrences de STW sur une décennie passe de 302 durant la période de référence (1950-1979) à seulement 91 d'ici 2100. Cette diminution est également observée dans les autres scénarios : une réduction de 30 % (211 occurrences) sous le scénario SSP1-2.6, une baisse de 41 % (177 occurrences) sous SSP2-4.5, et une réduction de 59.5 % (122 occurrences) sous SSP3-7.0 d'ici 2060. Ces projections indiquent une tendance générale à la baisse des circulations STW, ce qui signifie que les conditions favorables aux chutes de neige deviendront de plus en plus rares au fur et à mesure que le réchauffement climatique progresse. Cette diminution des circulations STW aura des impacts significatifs sur l'enneigement des massifs alpins, réduisant la quantité de neige disponible, avec des conséquences directes sur les écosystèmes et les activités économiques, notamment le tourisme hivernal.

Projections à l'horizon 2060 et 2100 de la température dans la classe à neige STW : les projections climatiques réalisées à l'horizon 2060 et 2100 montrent des tendances significatives (par rapport à la période de référence 1950-1979) en ce qui concerne la température dans la classe à neige STW (circulation cyclonique du sud avec un creux sur l'Europe occidentale). Les analyses basées sur les scénarios socio-économiques partagés (SSP) des modèles CMIP6 indiquent une augmentation notable des températures à 850 hPa lors de la présence de la STW. Sous le scénario SSP2-4.5, la température à 850 hPa est projetée d'augmenter de +2.2 °C d'ici 2060 et de +2.5 °C d'ici 2100. Dans le scénario le plus pessimiste, SSP5-8.5, cette augmentation est encore plus marquée, atteignant +3.2 °C d'ici 2060 et +4.6 °C d'ici 2100. Ces projections suggèrent une élévation significative de la limite pluie-neige, réduisant ainsi la fréquence et l'intensité des précipitations solides dans les massifs des Alpes-Maritimes. Ce réchauffement, en modifiant les conditions nécessaires à la formation de neige, pourrait entraîner des changements drastiques dans les régimes de précipitations hivernales, avec des conséquences directes sur les écosystèmes alpins et les activités économiques locales, notamment le tourisme hivernal.

CONTRIBUTION GLOBALE DE LA THÈSE A LA COMPRÉHENSION DE L'INTERACTION ENTRE CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE ET PRÉCIPITATIONS SOLIDES.

Cette section vise à mettre en perspective les apports de la thèse à la compréhension des dynamiques atmosphériques et de leurs impacts sur les précipitations solides dans les Alpes du Sud. En développant des outils d'analyse innovants et adaptés, les travaux ont considérablement enrichi le corpus des connaissances en climatologie, tant au niveau régional que global. Cette thèse contribue de manière substantielle à la compréhension des interactions entre la circulation

atmosphérique et les précipitations dans une région montagneuse particulièrement sensible au changement climatique. Elle s'inscrit dans un contexte où les montagnes du monde entier subissent des taux de réchauffement plus rapides que les autres régions, un phénomène souvent décrit comme le réchauffement dépendant de l'altitude (EDW - Elevation-Dependent Warming). Ce réchauffement accéléré exacerbe la variabilité des précipitations, ce qui a des conséquences profondes sur les régimes hydrologiques et les écosystèmes des régions montagneuses (EDW, 2015). Ces études montrent que les régions de haute altitude, comme les Alpes, sont particulièrement vulnérables aux changements climatiques en raison de leur réactivité accrue aux variations de température et de précipitations. Les impacts incluent des changements rapides dans la couverture neigeuse et glaciaire, une modification des cycles hydrologiques, et des effets potentiels sur les activités humaines comme l'agriculture et le tourisme (Rangwala and Miller, 2012). Ces éléments mettent en évidence la pertinence et l'importance de la recherche dans le cadre plus large de la compréhension des dynamiques climatiques en milieu montagneux, ainsi que l'urgence de développer des modèles climatiques régionaux précis pour anticiper et atténuer ces impacts.

Amélioration de la compréhension des interactions atmosphériques.

L'un des apports les plus significatifs de cette thèse réside dans l'amélioration de la compréhension des interactions entre les circulations atmosphériques à grande échelle et les précipitations locales. Cette recherche a démontré l'importance d'une approche régionale, montrant que les classifications globales comme celle de Hess et Brezowsky ne capturent pas toujours les spécificités locales, notamment dans une région aussi complexe que les Alpes du Sud. Pour parvenir à ces résultats, la thèse a mis au point des méthodologies spécifiques.

Développement de méthodologies spécifiques.

En utilisant des techniques telles que l'ACP et la CAH appliquées aux données de réanalyse ERA5, cette thèse a développé une classification novatrice qui capture mieux les nuances des circulations à neige. Cette approche méthodologique a permis d'obtenir des projections climatiques plus précises et pertinentes pour les décennies à venir. Le développement d'une classification spécifique pour les chutes de neige dans les Alpes du Sud s'inscrit dans un besoin plus large identifié par la communauté scientifique pour des modèles régionaux plus précis. En particulier, des recherches récentes confirment que le réchauffement climatique entraîne des réponses très variables dans les régions montagneuses, notamment en ce qui concerne l'augmentation des températures et les modifications des schémas de précipitation. En effet, les montagnes, souvent considérées comme des "hotspots climatiques", subissent un réchauffement plus rapide que les régions environnantes à plus basse altitude. Ce phénomène, connu sous le nom de réchauffement dépendant de l'altitude, exacerbe les variations climatiques locales, entraînant des changements significatifs dans la couverture neigeuse et la dynamique des précipitations.

Les précipitations dans les montagnes, bien qu'augmentant dans certaines régions en réponse au cycle hydrologique accéléré par le réchauffement, ne suivent pas toujours les tendances attendues en fonction de la hausse des températures. Cette variabilité accrue dans les

schémas de précipitation et de température a des conséquences importantes sur les écosystèmes montagnards, avec des risques accrus pour les glaciers, les réserves d'eau, et la biodiversité des hauts plateaux (Rangwala and Miller, 2012).

L'introduction de méthodologies telles que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) représente donc un pas significatif vers une meilleure compréhension de ces dynamiques locales. Ces avancées méthodologiques ont également des implications plus larges, contribuant à la climatologie régionale et mondiale. En effet, les résultats de cette thèse ne se limitent pas aux Alpes du Sud ; ils apportent également des enseignements précieux pour la climatologie mondiale. En effet, les méthodologies développées peuvent être appliquées à d'autres régions montagneuses, permettant ainsi d'étendre la compréhension des impacts du réchauffement climatique sur les environnements sensibles. Forte de ces contributions, cette thèse ouvre de nouvelles perspectives de recherche.

PERSPECTIVES DE RECHERCHES BASÉES SUR LES RÉSULTATS OBTENUS.

Les résultats obtenus au cours de cette thèse ouvrent plusieurs pistes de recherche, tant pour approfondir la compréhension des dynamiques climatiques dans les Alpes du Sud que pour élargir l'étude à d'autres régions. L'affinement de la classification des types de circulations pourrait s'inspirer de l'exploration des schémas atmosphériques observés dans d'autres régions montagneuses du monde, comme l'Himalaya ou les Andes, où les réponses climatiques peuvent différer en fonction de la topographie et de la latitude. De plus, l'intégration des dynamiques socio-économiques dans les projections climatiques, notamment en modélisant les impacts sur les ressources en eau et les activités humaines dans les régions alpines, est une voie de recherche cruciale pour les décennies à venir.

Affinement et extension de la classification de la circulation atmosphérique.

La classification développée dans cette thèse pourrait être affinée pour capturer encore plus précisément les variations régionales des circulations atmosphériques. En l'étendant à d'autres régions alpines ou à des chaînes montagneuses dans le monde, il serait possible de mieux comprendre les impacts différenciés du réchauffement climatique sur les chutes de neige. L'intégration de ces résultats dans des modèles socio-économiques constitue une autre perspective prometteuse.

Intégration des facteurs socio-économiques dans les modèles climatiques.

Les modèles développés dans cette thèse pourraient être enrichis par l'intégration de données socio-économiques, permettant ainsi de mieux évaluer les impacts du changement climatique sur des activités telles que le tourisme hivernal et la gestion de l'eau. Ces analyses offriraient des bases solides pour des recommandations politiques visant à atténuer les effets du réchauffement climatique.

RÉPONSES AUX QUESTIONS INITIALES.

Ce dernier paragraphe viendra clore les travaux de recherche en répondant aux questions fondamentales posées dans l'introduction de cette thèse. À travers une analyse approfondie des dynamiques atmosphériques et des précipitations solides dans les Alpes du Sud, ce paragraphe soulève également des perspectives préoccupantes concernant les effets du changement climatique, notamment l'assèchement du climat hivernal, qui pourrait entraîner de graves conséquences durant les périodes estivales, exacerbant les risques de sécheresse et d'insuffisance des ressources en eau. La neige, agissant comme un réservoir naturel, redistribue l'eau lentement au fil du temps ; sa réduction pourrait donc perturber ce processus essentiel et aggraver les tensions sur les ressources hydriques durant l'été.

Quelles sont les circulations atmosphériques spécifiques qui influencent les précipitations neigeuses dans cette région ? Dans les Alpes-Maritimes, les précipitations neigeuses sont principalement influencées par deux types de circulations atmosphériques spécifiques : Les circulations cycloniques méridionales qui sont caractérisées par une dépression centrée sur l'Islande, accompagnée d'anticyclones situés sur les Açores et la mer Noire. Cette configuration favorise le déplacement de masses d'air humide depuis la Méditerranée vers les Alpes du Sud, ce qui entraîne des chutes de neige abondantes. Les circulations cycloniques occidentales, qui sont souvent associées à des chutes de neige modérées. Ces circulations sont caractérisées par la présence de dépressions situées au nord-ouest de l'Europe, généralement sur l'Atlantique Nord, ce qui entraîne des flux d'air humide vers les Alpes.

Quels mécanismes synoptiques sous-tendent la formation des précipitations neigeuses ? Les mécanismes synoptiques à l'origine des précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes impliquent principalement l'interaction des masses d'air humide avec la topographie montagneuse. Lorsque l'air humide provenant de la Méditerranée est forcé de monter sur les reliefs alpins, il se refroidit, entraînant la condensation et la formation de neige si les températures sont suffisamment basses. La présence d'une dépression au-dessus de l'Islande, avec des anticyclones situés sur les Açores et la mer Noire, favorise ces conditions en dirigeant les flux d'air vers les Alpes du Sud.

Quel est l'impact des oscillations naturelles (NAO, AO) sur les régimes de précipitations neigeuses et les conditions climatiques locales ? Les oscillations naturelles, telles que la North Atlantic Oscillation (NAO) et l'Arctic Oscillation (AO), ont un impact significatif sur les régimes de précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes. Une phase positive de la NAO, par exemple, est généralement associée à des hivers plus doux et plus humides dans le nord de l'Europe, mais plus secs dans le sud, ce qui peut réduire la fréquence et l'intensité des chutes de neige dans les Alpes du Sud. De même, l'AO influence la position des systèmes de haute et basse pression, modifiant ainsi les schémas de circulation atmosphérique et, par conséquent, les régimes de précipitations neigeuses.

Peut-on identifier, à l'aide d'outils de clustering et des réanalyses ERA5, des types spécifiques de circulations atmosphériques propices aux précipitations neigeuses dans le territoire étudié ? Oui, des outils de clustering tels que l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) peuvent être utilisés avec les réanalyses ERA5 pour identifier des types spécifiques de circulations atmosphériques favorables aux précipitations neigeuses dans les Alpes-Maritimes. Ces techniques permettent de classer les jours en fonction de schémas de circulation atmosphérique similaires, en se basant sur des variables atmosphériques corrélées aux précipitations solides.

Comment la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses a-t-elle évolué de 1950 à 2019 dans le contexte du changement climatique contemporain ? Entre 1950 et 2019, la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses, notamment les circulations cycloniques méridionales (STW), a diminué de manière significative. Cette diminution est principalement due à l'expansion latitudinale de la cellule de Hadley, qui a poussé l'anticyclone des Açores plus au nord, augmentant ainsi la fréquence des circulations anticycloniques sèches et défavorables aux précipitations solides.

Les modèles de projection CMIP6 sont-ils suffisamment fiables pour anticiper les types de circulation à l'horizon 2100 ? Les modèles de projection CMIP6 sont considérés comme suffisamment fiables pour anticiper les types de circulation à l'horizon 2100, surtout lorsqu'ils sont utilisés en conjonction avec des réanalyses comme ERA5. Ces modèles permettent de projeter les évolutions futures des circulations atmosphériques sous différents scénarios socio-économiques (SSP), bien qu'il soit important de noter que leur fiabilité peut varier en fonction des variables spécifiques modélisées et des scénarios utilisés. Par exemple, ils montrent une tendance cohérente de diminution des circulations favorables aux précipitations solides (STW) et une augmentation des circulations anticycloniques sèches (WA).

Comment la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses évoluera-t-elle entre 2030 et 2100 en fonction des différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ? Entre 2030 et 2100, la fréquence des types de circulation favorables aux précipitations neigeuses (comme les circulations STW) est projetée à diminuer de manière significative, particulièrement sous les scénarios d'émissions élevés tels que SSP5-8.5. En revanche, la fréquence des circulations anticycloniques (WA), qui sont défavorables aux précipitations solides, est projetée à augmenter. Ces changements auront des implications importantes pour la couverture neigeuse et les activités économiques dans les Alpes-Maritimes, en particulier pour les stations de ski et la gestion des ressources en eau.

Comment évoluera la limite pluie neige à l'horizon 2100 ? Selon les projections de l'article 4, la limite pluie-neige est prévue de s'élever de manière significative d'ici 2100, en grande partie à cause de l'augmentation des températures au sein de la classe de circulation STW (circulation cyclonique du sud avec un creux sur l'Europe occidentale). Les scénarios climatiques, en particulier sous SSP5-8.5, prévoient une augmentation notable des températures à 850 hPa, atteignant jusqu'à +4,6 °C d'ici 2100. Cette hausse de température au sein de la classe STW entraînera une élévation de l'altitude où la neige peut se former, ce qui aura pour conséquence

CHAPITRE CONCLUSIF.

directe de réduire la fréquence et l'intensité des chutes de neige à des altitudes plus basses. En conséquence, de nombreuses zones qui, historiquement, recevaient de la neige sous ces circulations verront désormais davantage de pluie. Cette transformation affectera non seulement la couverture neigeuse saisonnière, mais aussi la disponibilité en eau, les écosystèmes, et l'industrie du tourisme hivernal dans les Alpes-Maritimes.

RÉFÉRENCES DU CHAPITRE CONCLUSIF.

Gutowski, W. J., and Coauthors, 2020: The Ongoing Need for High-Resolution Regional Climate Models: Process Understanding and Stakeholder Information. Bull. Amer. Meteor. Soc., 101, E664–E683.

Kim, G., Kim, J. & Cha, D.H., 2022: Added value of high-resolution regional climate model in simulating precipitation based on the changes in kinetic energy. Geosci. Lett. 9, 38. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00247-6>.

Mountain Research Initiative EDW Working Group, 2015: Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. Nature Clim Change 5, 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>.

Ombadi, M., et al., 2023: A Warming-Induced Reduction in Snow Fraction Amplifies Rainfall Extremes. Nature 619, 305–310. DOI:10.1038/s41586-023-06092-7.

Rangwala, I., Miller, J.R., 2012: Climate change in mountains: a review of elevation-dependent warming and its possible causes. Climatic Change 114, 527–547. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0419-3>.

Sýkorová, P., Huth, R., 2020: The applicability of the Hess–Brezowsky synoptic classification to the description of climate elements in Europe. Theor. Appl. Climatol. 142, 1295–1309. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03375-1>.