



Université de Toulouse

MASTER 1 GÉOMATIQUE

« **Sciences Géomatiques en environneMent et Aménagement** »
(**SIGMA**)

<http://sigma.univ-toulouse.fr>

MÉMOIRE DE RECHERCHE

Évaluation de la fiabilité passée de l'enneigement des « stations de ski fantômes »

Florent LAIDIN

**Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Agronomie
et l'Environnement (INRAE)**

Maître de stage : Hugues FRANÇOIS
Enseignant-référent : Vincent THIERION

Avril / Août 2022



Remerciements

Je souhaitais tout d'abord remercier Hugues François pour m'avoir accompagné tout au long de ce stage. Merci pour tout ce que tu as pu m'apporter, tes conseils, ton expérience, mais également ton exigence.

Je cite également Frédéric Bray, qui m'a aidé et formé sur l'ensemble du volet Base de Données de l'étude et ce, avant même le début de mon stage !

Merci à Lucas Bérard-Chenu, pour ses conseils, sa disponibilité et l'ensemble des idées enrichissantes qu'il a pu m'apporter au cours de ces 5 mois.

Je remercie Vincent Thierion en tant qu'enseignant référent, pour m'avoir suivi au cours de ce stage.

Je tenais également à remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique SIGMA qui, tout au long de l'année a su être disponible et bienveillante à l'égard de notre formation en géomatique.

Enfin, merci à ma famille et notamment mes parents, qui ont eu la difficile tâche de relire ce mémoire.

Résumé

Le changement climatique pose aujourd'hui la question de la durabilité du modèle des stations de ski. Alors que près de 180 stations ont déjà fermé leur porte en France, l'explication de leur fermeture pourrait apporter des éléments de réponse pour l'avenir des stations encore ouvertes.

Si certaines causes de fermeture ont pu être évoquées et discutées à de nombreuses reprises, il n'en reste pas moins qu'elles sont inconnues pour beaucoup de stations, voire contradictoires. Cette étude a donc pour objectif de décrire précisément ces anciens sites touristiques et d'évaluer la fiabilité de leur enneigement. L'approche retenue implique la création d'une information spatiale et attributaire pour l'ensemble des sites fermés au travers d'une méthode mêlant des recherches sur l'historique des stations, et le croisement avec des bases de données spatialisées sur leurs remontées mécaniques respectives. À partir de ces données, la modélisation des conditions d'enneigement a pu être mise en place en prenant en compte plusieurs caractéristiques propres à chaque station comme la topographie du site mais également l'organisation spatiale des remontées mécaniques. Un indice de fiabilité calculé sur les périodes les plus cruciales pour la rentabilité des stations a ensuite été calculé. Son analyse selon une série temporelle de plusieurs décennies à l'échelle de 6 massifs présents au sein du territoire métropolitain, nous permet de connaître précisément les conditions d'enneigement rencontrées par ces stations fermées.

Mots-clés : Stations de sport d'hiver ; neige ; climat ; domaines skiables fermés ;

Abstract

Climate change now raises the question of the sustainability of the ski resort model. While nearly 180 resorts have already closed their doors in France, the explanation of their closure could provide elements of answer for the future of the resorts still open.

Although some of the reasons for closure have been mentioned and discussed on many occasions, the fact remains that they are unknown for many resorts, and even contradictory. The objective of this study is therefore to describe precisely these former tourist sites and to evaluate the reliability of their snowmaking. The approach adopted involves the creation of spatial and attribute information for all closed sites through a method that combines research on the history of the resorts, and cross-referencing with spatialized databases on their respective lifts. From these data, the modeling of snow conditions was able to be set up by taking into account several characteristics specific to each resort such as the topography of the site but also the spatial organization of the ski lifts. A reliability index was then calculated for the periods most crucial to the profitability of the resorts. Its analysis according to a time series of several decades on the scale of 6 massifs present within the metropolitan territory, allows us to know precisely the snow conditions encountered by these closed stations.

Keywords : Ski resort ; snow ; climate ; closed ski resort ;

Table des matières

Présentation de la structure d'accueil	1
Déroulement du stage.....	2
I. Introduction.....	3
II. État de l'art.....	5
2.1. Les stations de ski fermées dans la recherche scientifique	5
2.2. Les outils et méthodes de modélisation de l'enneigement des domaines skiables....	7
III. Objectifs, hypothèses de recherche.....	11
IV. Matériel et méthodes	12
4.1. Zone d'étude	12
4.2. Données disponibles.....	13
4.3. Digitalisation des remontées mécaniques.....	15
4.4. Modélisation des conditions d'enneigement : adaptation de la méthode Crosscut ..	21
V. Résultats	27
5.1. Données digitalisées.....	27
5.2. Caractérisation des stations de ski fermées françaises	29
5.3. Analyse de la fiabilité des stations de ski fermées : approche statistique et premières discussions	33
VI. Discussion	45
6.1. Quelles sont les stations de ski fermées françaises ?.....	45
6.2. Evaluation de la fiabilité de l'enneigement des stations fermées françaises	46
6.3. Limites et perspectives d'évolution	49
VII. Conclusion.....	50
Bibliographie	52
Annexes.....	55

Présentation de la structure d'accueil

L'INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'alimentation et l'Environnement) est une structure publique dédiée à la recherche. Celle-ci est en tant que telle assez récente puisqu'elle résulte de la fusion entre l'INRA¹ autrefois dédié à la recherche agronomique, et l'IRSTEA² dont faisait partie le centre de Grenoble, en 2020.

Les domaines de recherche de l'INRAE sont nombreux et divers. Au sein du centre de Grenoble, on trouve deux unités de recherche :

- L'ETNA (Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches) englobe les domaines de la prévention des risques naturels en montagne, c'est-à-dire l'évaluation des risques et l'aide à la décision au sein des politiques publiques. L'ETNA est une unité dont les expertises sont mises en place en France, et à l'étranger.
- Le LESSEM (Laboratoires Ecosystèmes et Sociétés en Montagne) est le second laboratoire du centre de Grenoble. Ce laboratoire regroupe de nombreux domaines d'expertise qui se croisent entre eux, avec des notions d'écologie et de sociologie appliquées aux espaces montagnards avec de l'aide à la décision notamment sur l'aménagement des territoires.

Le stage s'est déroulé au sein de l'unité LESSEM et plus précisément dans l'équipe ASTRRE (Approche Socio-Economique des Territoires). Les objectifs de cette équipe se concentrent autour de l'étude des interactions entre systèmes écologiques et socio-économiques, avec une attention particulière aux dynamiques spatio-temporelles et une zone d'étude privilégiée qu'est le massif alpin

Les objets d'étude sont nombreux. On retrouve comme grande thématique l'analyse des systèmes agro-pastoraux, enjeux économiques en région urbaine et rurale mais aussi la thématique du tourisme en montagne et de ce fait, l'étude des stations de sport d'hiver.

¹ Institut National de Recherche Agronomique

² Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

Déroulement du stage

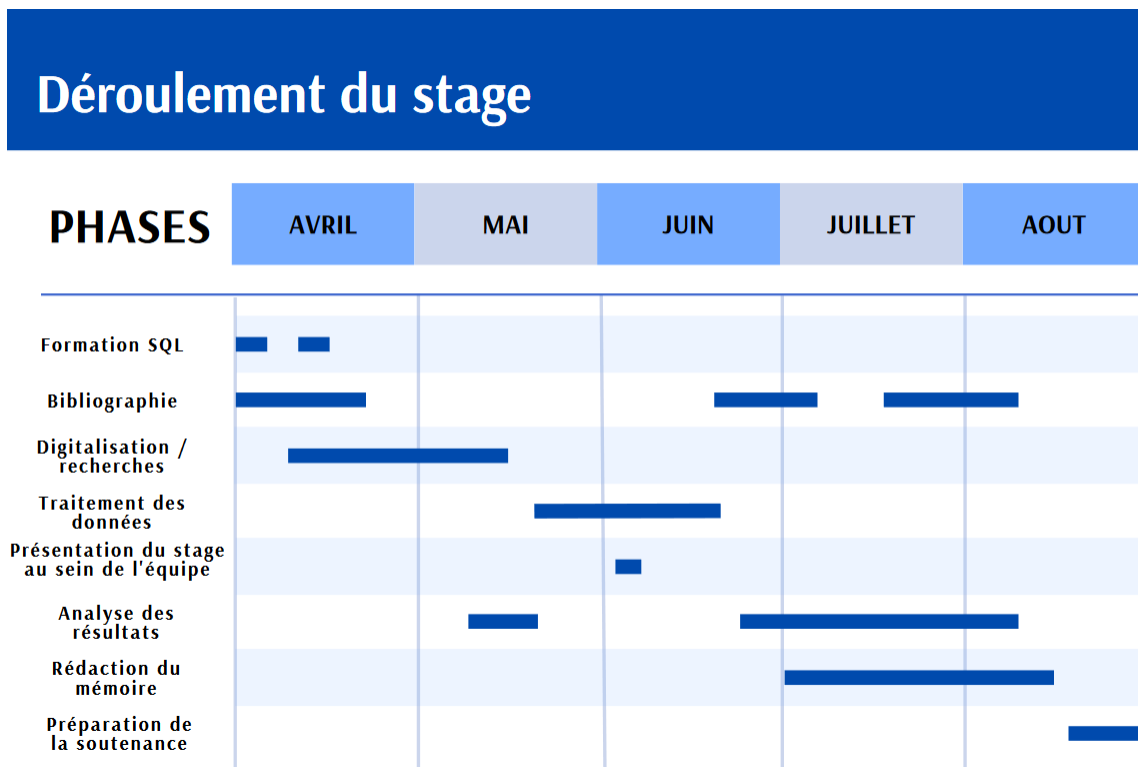


Figure 1: Diagramme de Gantt sur le déroulement du stage

Le stage s'est déroulé du 1^{er} Avril au 31 Août. Suite à une première phase de prise en main du sujet de l'étude et de recherches bibliographiques, les différents traitements de données ont pu se mettre en place. En parallèle, d'autres recherches bibliographiques et résultats intermédiaires ont pu être effectués jusqu'à l'analyse finale des résultats.

Pour ce qui est des autres missions et événements marquants de ce stage, j'ai pu participer à une formation SQL permettant une remise à niveau et un approfondissement de certaines notions. Une présentation du stage au sein de l'équipe de recherche (ASTRRE) fût réalisée au cours du mois de juin.

Je tenais également à souligner la participation au salon Mountain Planet à Grenoble au cours du mois d'Avril. L'occasion d'assister à différentes conférences organisées les thématiques liées au développement des stations de montagne et de l'activité du ski.

Des réunions régulières avec mon encadrant et parfois d'autres chercheurs ont pu rythmer ce stage. Celles-ci permettaient de discuter de l'avancement de l'étude et des éléments qu'il était possible d'approfondir, d'explorer.

I. Introduction

L'activité du ski en France est aujourd'hui un secteur essentiel au tourisme de montagne. Avec plus de 44,9 millions de journées skieurs vendues sur la saison 2019-2020 (Vanat, 2021), c'est aujourd'hui le troisième pays dans le monde le plus fréquenté pour la pratique des sports d'hiver. Des premiers villages-stations dans les années 1930 (Delorme, 2014) aux stations de troisième génération dans les années 1960 et l'arrivée du tourisme de masse, le ski français a pu connaître de profondes mutations. Alors que l'activité s'est progressivement positionnée vers un tourisme réservé à une classe sociale aisée (Bourdeau, 2008), les saisons hivernales sont devenues symboles d'un fort enjeu social et économique tant les espaces montagnards sont aujourd'hui dépendants de l'activité du ski et des sports d'hiver. On peut effectivement relever que plus de 120 000 emplois dépendent de l'ouverture des stations de ski (Domaines Skiables de France, 2020).

Alors même que cette activité illustre la dépendance des économies montagnardes vis-à-vis du secteur touristique, il est essentiel de souligner une certaine fragilité face à l'enjeu climatique.

Les stations doivent faire face à un défi de taille pour les prochaines décennies avec le contexte de changement climatique. Les conditions d'enneigement sont amenées à être de plus en plus difficiles avec une hausse de la température moyenne mondiale d'au moins 1 degré d'ici 2100 (IPCC, 2014) selon le scénario le plus optimiste (RCP 2.6). Les impacts passés des hivers anormalement chauds sur la fréquentation des stations ont déjà pu être mesurés (Steiger *et al.*, 2017) avec une baisse notable du nombre de séjours. Certaines stations situées à de faibles altitudes pourraient donc fermer leurs portes en raison du manque de neige. Et cela, malgré les investissements croissants des stations dans les systèmes de production de neige (Bérard-Chenu, 2021), dont le fonctionnement est également en grande partie piloté par les températures et la disponibilité des fenêtres de froid requises pour la production.

Dans ce contexte, le modèle d'aménagement des stations de sport d'hiver invite à la réflexion sur les dynamiques de développement économique et social des territoires de montagne.

En effet, si l'on regarde la place prise par la neige en tant que ressource pour ces sites touristiques, nous pouvons nous interroger sur la dépendance des stations vis-à-vis de cette ressource, fortement impactée par la hausse globale des températures. De ce premier constat, les conditions de sortie du tourisme de ski et leur possible transition constituent un enjeu stratégique pour envisager l'avenir des territoires concernés. Des stations de sport d'hiver de plus en plus importantes pourraient être en difficulté et se retrouver face au « point vertigineux » (Vlès, 2019), une situation où le fonctionnement du site touristique ne peut plus perdurer comme tel. Les stations se retrouvent alors face au choix de la fermeture brutale ou bien d'une transformation profonde des activités et effectuer une transition.

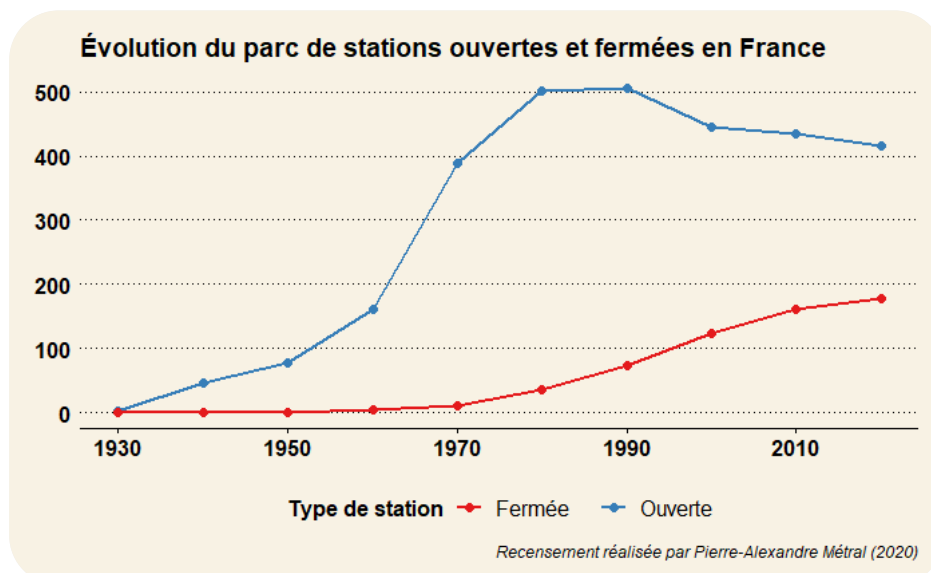


Figure 2: Comparaison du nombre de stations de ski françaises actives et fermées par décennie depuis les années 1930

Si l'on se réfère au recensement de P.A Métral³ sur le parc de stations ouvertes et fermées en France (2021), nous observons clairement une stagnation puis une légère baisse du nombre de stations ouvertes en France depuis le milieu des années 1990. On comptabilise aujourd'hui près de 180 stations qui ont fermées ayant fermé leurs portes. Ce chiffre doit néanmoins être pris avec précaution et qualifié en fonction de la taille des stations fermées comme nous y reviendrons par la suite. En outre, la figure 1 montre que la fermeture de certaines stations peut être concomitante et compensée, dans la même période, par un nombre d'ouverture stations suffisamment important pour soutenir la croissance du nombre de stations ouvertes jusque dans le milieu des années 1990.

Les causes de fermeture sont multiples. Si certaines explications sont avant tout des problèmes de rentabilité, de gestion, ou de concurrence entre stations (Métral, 2021), le manque de neige reste l'argument le plus souvent avancé pour expliquer la fermeture des anciennes stations de sport d'hiver alors même que celui-ci n'a pas fait l'objet d'une évaluation spécifique.

Ainsi, dans la mesure où les stations sont confrontées depuis leur construction aux aléas météorologiques, il convient de se demander comment l'étude des anciennes stations de ski pourrait nous permettre de mieux comprendre les mécanismes de fermeture face à des conditions d'enneigement caractérisées de difficiles. En ce sens, évaluer la fiabilité de l'enneigement de ces anciens sites touristiques pourrait apporter des éléments de réponse alors même que de plus en plus de stations de sport d'hiver s'interrogent sur la durabilité de leur modèle.

³ Données de recensement qui seront exploitées pour la suite de l'étude

II. État de l'art

2.1. Les stations de ski fermées dans la recherche scientifique

Bien que la fermeture des stations de sport d'hiver soit très souvent mise en avant dans les différents canaux médiatiques et ce, pour les conséquences économiques et sociales générées, ce sujet est à l'heure actuelle peu présent dans le paysage scientifique.

D'une manière générale, les anciennes stations sont étudiées du point de vue de leur possible reconversion et des traces laissées par l'activité du ski. Ce dernier élément peut se caractériser de manière physique dans le paysage avec l'apparition de friches sur ces anciens territoires touristiques. Astrade *et al.* (2021) ont pu montrer et décrire les différentes traces laissées par l'activité du ski, notamment dans la végétation environnante, tel que présenté sur la figure 3 ci-après. Selon leur étude, le fait de s'intéresser à l'enrichissement de ces anciens sites peut permettre de mieux comprendre les mécanismes et périodes de fermeture lorsque les témoignages sont manquants.

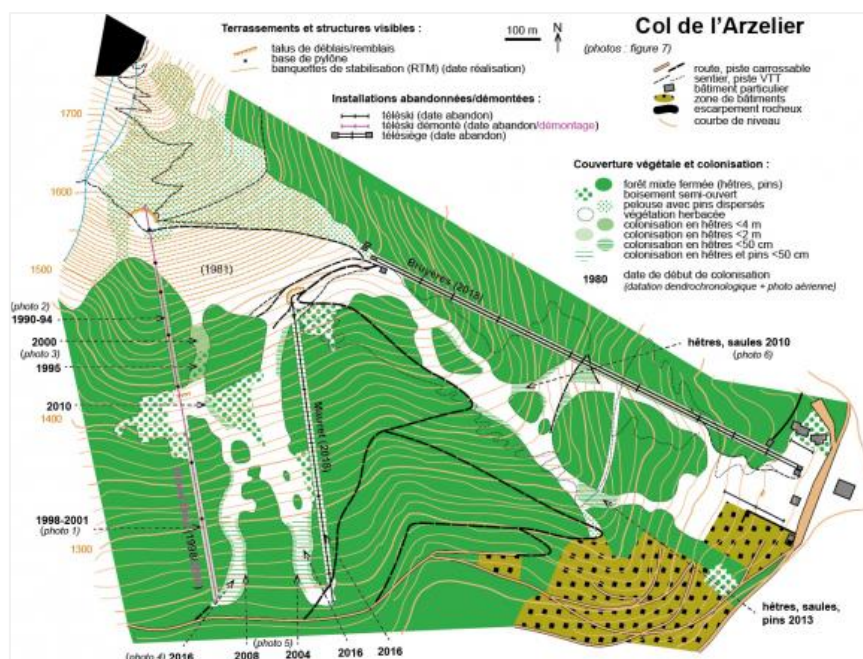


Figure 3: Extrait de Astrade *et al.* (2021) ; Illustration des différents indices de l'ancienne station du Col de l'Arzelier

En parallèle de ces traces physiques laissées par l'activité du ski, nous pouvons remarquer que celle-ci est également très présente dans la mémoire collective des populations ayant connu le site en activité (Gauchon, 2010). Ce caractère « quasi patrimonial » des stations et de leurs remontées est en effet d'une importance notable dans les études sur les anciens sites. P.A Métral nous parle ainsi d'une dimension symbolique qui incarnerait « l'ultime souvenir de l'époque du ski » (Métral, 2021) pour les habitants. Cela montre bien l'importance accordée aux stations de ski fermées françaises avec une fonction touristique et sociale très prégnante.

Un autre axe d'étude de plus en plus développé, directement lié avec les propos précédents, va être la transition de ces territoires anciennement attractifs pour leur station de ski. Bachimon *et al.* (2014) ont notamment travaillé sur cette transition pour l'ancienne station de St-Nizier-du-Moucherotte fermée dans les années 80 (Isère). Ils ont pu montrer les changements opérés pour ce village anciennement très touristique avec de nouvelles pratiques mais toujours un souvenir très ancré de l'ancienne station.

Cet exemple de St Nizier montre également les possibilités suite à l'abandon de l'activité du ski avec le développement de nouvelles pratiques touristiques. Ce renouvellement des pratiques touristiques n'est pas sans lien avec le contexte de périurbanisation d'un territoire particulièrement proche de l'agglomération grenobloise. On peut parler ici d'un « excursionnisme » (Bachimon *et al.*, 2014) pratiqué depuis la métropole vers cette ancienne station.

On ne comptabilise en France qu'un seul travail proposant un recensement systématique de l'ensemble des sites fermés sur le territoire national. Il s'agit d'une thèse en cours de P.A. Métral, doctorant au laboratoire PACTE à l'Université de Grenoble. P.A. Métral s'intéresse aux trajectoires de reconversion post-touristiques de ces anciens sites et s'attache à analyser finement ces anciens hauts lieux du tourisme dans leurs aires d'influence. Les objectifs de cette étude sont multiples. Si la meilleure visualisation des trajectoires communes des stations et de leurs mécanismes de transition constitue un premier point essentiel, d'autres réflexions sont développées. La dimension historique des anciens sites est également mise en avant via l'aspect patrimonial et celui du « marqueur » de territoires.

Ainsi, de plus en plus de travaux se portent sur « l'après » des stations de ski et non sur l'analyse des causes de fermeture de celles-ci. Ces thématiques sont pourtant liées puisque la compréhension des causes de fermeture peut mettre en exergue la résilience d'une station face à des aléas climatiques ou économiques. Sur ce dernier aspect, L. Bérard-Chenu (2021) a pu montrer les disparités importantes selon la taille des stations en termes d'investissement dans la production de neige pour pérenniser les saisons viables et l'activité du ski. Les grands domaines skiables vont pouvoir établir des stratégies d'investissements planifiées en opposition avec les plus petites stations qui investissent en réaction à des hivers difficiles.

Cela montre un écart en termes de marges de manœuvre des différentes stations pouvant influencer sur la fermeture des sites touristiques.

Cette résilience des stations face à des situations difficiles soulèvent la question des points de rupture dans le bon fonctionnement des stations, pouvant conduire à l'arrêt de leurs activités. Moscovici (2022) explique ici que certaines stations de sport d'hiver ne disposent plus des ressources nécessaires pour maintenir une balance économique équilibrée et durable et se retrouvent dans l'obligation de cesser leurs activités. Cela est à mettre en perspective avec les investissements publics dans l'exploitation des remontées mécaniques. Au-delà des difficultés économiques que rencontrent les stations lors d'hiver difficiles, leur impact sur le développement local peut devenir de moins en moins important, au point de ne plus justifier un investissement important dans l'exploitation du site (Pascal, 1993).

Il est important ici de souligner que si le manque de neige (induit par un contexte de changement climatique) est souvent mis en avant pour expliquer la fermeture de ces stations (Moscovici, 2022), d'autres facteurs sont envisagés, avec notamment le manque de rentabilité lié à la constitution des stations et à leur lieu d'implantation (difficultés d'exploitation, faiblesse du bassin de chalandise, etc.), ou encore la concurrence entre stations (Métral, 2021).

Nous noterons que la fermeture des stations est décrite selon des données qualitatives résultant d'entretiens avec les habitants, ou bien grâce à différents types d'archives. En ce sens, évaluer précisément l'enneigement et la fiabilité de ces anciennes stations pourrait permettre de compléter les différents travaux portant sur cette thématique, qui apparaît comme étant de plus en plus actuelle face au risque accru de fermeture pour les stations de sport d'hiver.

2.2. Les outils et méthodes de modélisation de l'enneigement des domaines skiables

La neige est une ressource naturelle complexe à modéliser sur le plan physique et à définir précisément. Outre le fait que celle-ci est décrite par des termes génériques de « précipitations solides » et d'agglomération de « cristaux de glace » (Météo France, 2020), elle présente des propriétés physiques très diverses selon les conditions atmosphériques et est sujette à des changements d'état fréquents (Vionnet et al., 2012). Cette ressource est vectrice de nombreuses interactions avec l'atmosphère notamment grâce à son fort albédo (Vionnet et al., 2012) influant sur la réflexion des rayonnements solaires et leur énergie vers l'atmosphère. La modélisation précise des quantités de précipitations neigeuses au sein des domaines skiables a donc été très développée et problématisée ces dernières décennies. Les méthodes de modélisation numérique du manteau neigeux dans l'histoire scientifique sont assez récentes et se distinguent selon deux approches.

2.2.1. Approche degrés-jours

La première d'entre elles est basée sur la logique degrés-jours. Cette méthode permet d'estimer la quantité de neige à la fois accumulée et fondue du manteau neigeux selon des données quotidiennes de température et de précipitations (Vionnet *et al.*, 2012). La première application se trouve d'abord être très reliée à l'hydrologie avec un modèle distribué de couverture neigeuse développé par Kleindiest (2000). Il met en place l'un des premiers modèles de couverture neigeuse en 2000 à partir d'une résolution spatiale d'un kilomètre. A partir de ces premiers résultats, le modèle SkiSim (Ski season Simulation model) est développé par Scott *et al.* (2003), considéré comme un des premiers modèles numériques pour mesurer l'enneigement des domaines skiables.

En prenant les données quotidiennes de températures et de précipitations sur les zones étudiées, SkiSim permet d'obtenir, pour chaque jour donné, une épaisseur de neige en centimètre sur une résolution spatiale de 100m. Les données météorologiques en entrée proviennent du modèle climatique LARS-WG. Un forçage du modèle selon différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre peut être appliqué au sein de celui-ci. La prise en compte des propriétés physiques de la neige n'est donc ici pas présente. Scott et al (2003) ont tout de même établi une densité du manteau neigeux égale à 300kg/m^3 en relation avec la densité d'une neige naturelle et damée.

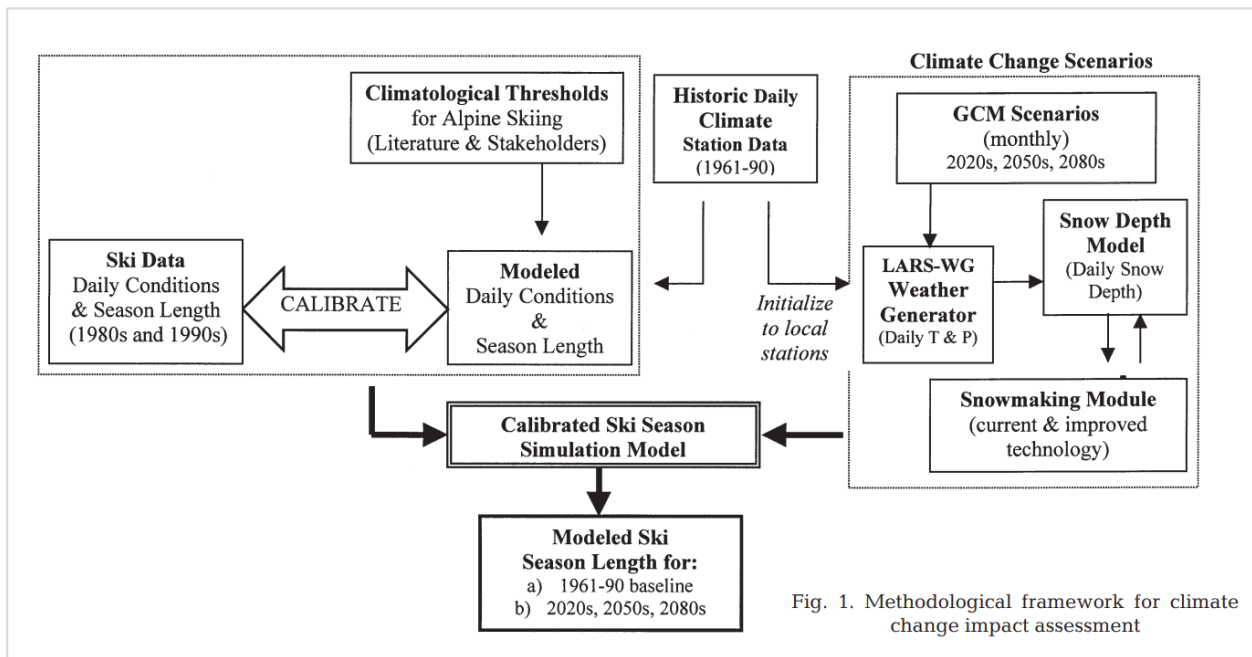


Figure 4: Fonctionnement du modèle SkiSim, figure extraite de Scott et al (2003)

Les validations de ce premier modèle numérique sur les stations nord-américaines ont pu montrer sa robustesse. Si l'on peut déjà observer un module prenant en compte les impacts de la production de neige sur les domaines skiables (figure 4), ce dernier a été précisé et complété dans d'autres études. Steiger *et al.* (2010) ont notamment précisé les conditions requises pour la mise en place d'enneigeurs, en accord avec les différentes pratiques de gestion observées dans les stations américaines mais également européennes.

Cela correspond à la fois aux conditions météorologiques nécessaires pour produire de la neige de culture (seuil de -5°C , vents forts...) mais également aux données temporelles. Ainsi, les heures de production de neige fournies par les exploitants, couplées aux données météo quotidiennes permettent d'obtenir une quantité de neige produite dans une journée et de préciser davantage l'enneigement selon les modes de gestion, mais toujours dans le cadre d'une modélisation degrés-jours sans tenir compte de l'impact du damage et des propriétés physiques particulières de la neige produite sur l'évolution du manteau neigeux sur pistes.

2.2.2. Approche physique : chaine de modélisation SAFRAN-Crocus

Le second type de modèle concerne les modèles numériques suivant une approche physique. Ceux-ci vont prendre en compte les spécificités du terrain, comme la pente, l'orientation, afin d'évaluer au mieux les quantités de neige au sol, mais également de nombreuses caractéristiques propres au manteau neigeux. C'est notamment le cas du modèle Crocus établissant les bilans de masse et d'énergie du manteau neigeux (Vionnet *et al.*, 2012). Initialement utilisé pour prévenir les risques d'avalanche, le modèle Crocus englobe les nombreux processus physiques directement liés à la neige, c'est-à-dire ses métamorphoses, son tassement, et de nombreuses variables supplémentaires.

L'impulsion initiale a pu être donnée suite à la résolution d'un ensemble d'équations (Brun *et al.*, 1989) sur les propriétés du manteau neigeux, permettant ainsi de mieux comprendre les phénomènes dont il est question.

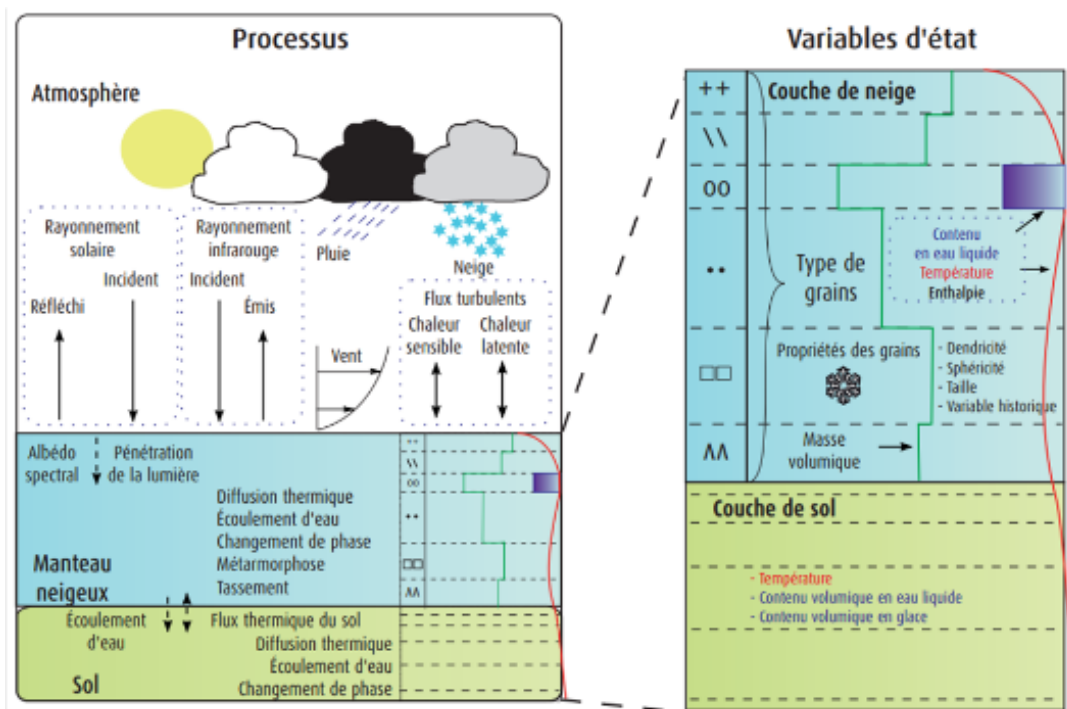


Figure 5: Figure extraite de Vionnet et al (2012), description des différentes propriétés de la neige prises en compte par le modèle Crocus

De même que le modèle SkiSim, Crocus a pu être enrichi et précisé suite à son premier développement dans les années 1990. Le modèle est aujourd'hui couplé avec un modèle prenant en compte les interactions sol-atmosphère « SURFEX ». Ce module complémentaire permet notamment une meilleure représentation des interactions entre le sol et le manteau neigeux. Le modèle Crocus se trouve d'abord être appliqué selon un usage opérationnel pour la prévision du risque avalancheux et cela au fil de la saison, en fonction des conditions d'enneigement et de leurs évolutions au regard de l'évolution des conditions météo.

Dans le cadre de notre étude sur les stations de ski fermées, nous pouvons souligner le fait que le modèle de manteau neigeux Crocus offre l'avantage d'avoir un regard rétrospectif sur l'enneigement des massifs depuis les années 1960, puisqu'il s'appuie sur les données issues de la réanalyse SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige)

Ce système météorologique combine à la fois les observations passées avec des méthodes d'interpolation pour simuler les quantités de neige au sol au sein d'unités géographiques appelées « massifs » (Durand *et al.*, 2012). Ces « massifs » SAFRAN correspondent à des localisations dont on considère les données météorologiques homogènes en ne dépendant seulement de l'altitude, de la pente, et de l'orientation. La réanalyse SAFRAN offre donc des données sur les conditions d'enneigement au sein de chacune de ces localisations et ce, à une résolution horaire et selon des tranches altitudinales de 300 mètres. Les années disponibles vont de 1958 à 2018 pour les Alpes et Pyrénées ou bien de 1961 à 2014 pour le cas des autres massifs (Vosges, Jura, Massif Central).

Le modèle Crocus associé à la réanalyse SAFRAN est donc intéressant du point de vue de l'étude des stations de sports d'hiver puisqu'il couvre ainsi toute la période depuis leur construction en masse jusqu'à la fin des années 2010.

Nous pouvons ajouter que la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus a pu être complétée par les travaux de Spandre (2016) avec l'implémentation des pratiques de gestion de la neige de culture. Les données météorologiques modélisées concernant ces nouveaux systèmes de production de neige (canons, ventilateurs) sont ainsi disponibles avec différents taux de couverture.

Enfin, les données météorologiques ont pu être utilisées pour modéliser l'enneigement des domaines skiables français, selon la méthode Crosscut (François *et al.*, 2016). Dans cette approche, des domaines skiables potentiels dits « enveloppes gravitaires » sont établis à partir du parc de remontées mécaniques présents sur chaque station. La donnée spatiale propre à chaque station est ensuite croisée avec les simulations du modèle SAFRAN-Crocus en prenant en compte des données socio-économiques de chaque station.

Dans le cas de cette étude, les données sur la fiabilité de l'enneigement des stations de ski fermées françaises seront étudiées selon la méthode Crosscut. Les données en entrée proviennent des simulations de la chaîne SAFRAN-Crocus. Cette méthode sera ainsi détaillée dans l'approche méthodologique retenue ([4.4](#)).

III. Objectifs, hypothèses de recherche

Comme nous avons pu le développer précédemment, cette étude a pour but de caractériser et évaluer la fiabilité passée des stations de ski fermées en France en s'intéressant à leur enneigement. Plusieurs hypothèses de départ, dont il s'agira de répondre au cours de cette étude, ont été avancées.

H1 : L'une des premières hypothèses au sujet de la fermeture des stations de ski est qu'elles se sont retrouvées face à des conditions de plus en plus difficiles au fil des saisons, et ce dans un contexte historique propre à l'activité du ski. Nous entendons par là le fort développement des stations de sport d'hiver avec le lancement du plan neige de dans les années 1960-1970. Ces anciennes stations auraient pu faire partie de cette opération d'aménagement sans pour autant être préparées à des conditions difficiles en termes d'enneigement.

H2 : La seconde hypothèse porte quant à elle sur les aspects structurels propres à chaque station. Ces anciens sites touristiques pourraient avoir fermé leur porte en raison d'équipements insuffisants pour la pérennité de l'offre touristique. Cela désignerait donc une taille et des infrastructures trop restreintes pour le bon fonctionnement des stations.

Il s'agira donc au travers de cette étude de tester et vérifier ces hypothèses, en s'attachant à isoler certains facteurs explicatifs des fermetures. Cela passera par une approche statistique appliquée à la question de possible seuils de fermeture, avec un regard sur la morphologie des stations de sport d'hiver fermées.

IV. Matériel et méthodes

La méthode de recherche utilisée se divise en trois grandes phases. Le premier objectif va être de recréer une information spatiale et attributive sur l'ensemble des stations fermées. Cela consiste à digitaliser les différents linéaires de remontées mécaniques qui constituaient ces stations et de retrouver certaines informations techniques sur ces remontées pour évaluer la capacité et l'importance des stations fermées.

Une fois cette information spatiale obtenue, il s'agira de traiter cette donnée pour permettre de modéliser les conditions d'enneigement pour chacun des sites fermés. Enfin, l'exploitation des résultats obtenus clôturera cette étude avec une description détaillée de la fiabilité de l'enneigement des stations de ski fermées françaises. Une attention particulière sera portée sur la mise en comparaison avec les stations encore actives pour mieux caractériser le type de stations étudié.

4.1. Zone d'étude

Pour cette étude, l'échantillon de stations désigne la majeure partie des sites fermés sur le territoire métropolitain français. L'activité du ski étant principalement montagnarde, la zone d'étude va correspondre aux 5 massifs français : les Alpes, le Jura, les Vosges, le Massif Central ainsi que les Pyrénées. Cette diversité en termes de zones géographiques permettra d'avoir une analyse à l'échelle des massifs et de déceler certaines différences ou ressemblances en termes de fiabilité de l'enneigement.

Dans un souci de meilleure analyse des résultats, nous pouvons d'ores et déjà dire que le massif des Alpes sera divisé en deux parties avec d'un côté les Alpes du Nord composé de la Savoie, Haute-Savoie, et de l'Isère, et de l'autre les Alpes du Sud avec le reste des départements alpins (Hautes-Alpes, Alpes maritimes...etc).

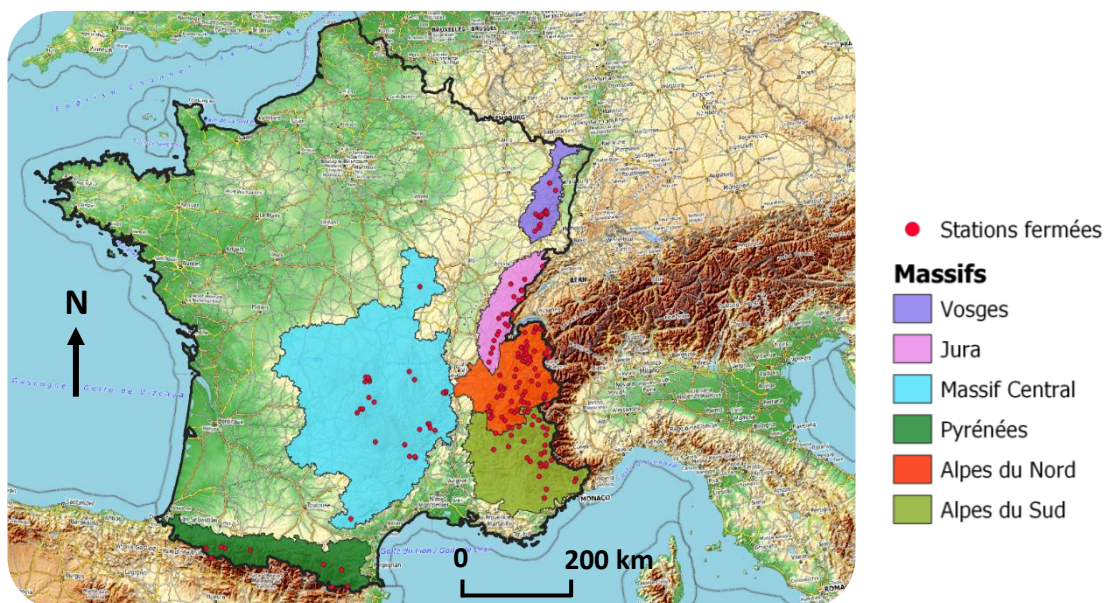


Figure 6: Répartition des stations de ski définitivement fermées au sein du territoire métropolitain ;
Source: BD STATIONFERMEE (Métral,2020), OpenStreetMap Topo

4.2. Données disponibles

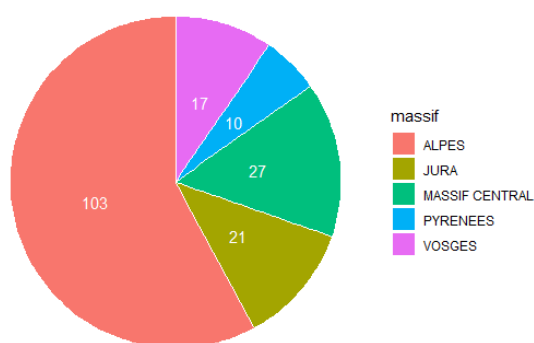
Les données utilisées dans cette étude peuvent se regrouper en plusieurs sous-ensembles. Il s'agira dans un premier temps de présenter les deux bases de données thématiques sur les stations ouvertes et fermées au sein du territoire national. Des bases de données spécifiques pour la représentation spatiale des stations et de leurs objets viendront compléter cette information. Le troisième type de données correspond à l'ensemble des données spatiales sur l'historique des stations avec notamment les nombreux flux WMS de l'IGN. Enfin, des données qualitatives complémentaires ont pu être récupérées lorsque cela était nécessaire pour la digitalisation des remontées mécaniques.

4.2.1. Bases de données thématiques

4.2.1.1. Base de données « STATIONFERMEE »

La donnée principale utilisée dans cette étude est la base de données « STATIONFERMEE » (Métral, 2021). Elle correspond au recensement d'une très grande partie des stations de sport d'hiver fermées en France et a été constitué par P.A. Métral, dont les travaux ont été présentés précédemment (2.1). Cette base de données propose différentes caractéristiques pour chacune des 178 stations recensées. On trouve notamment une localisation de chaque site sous forme de ponctuel, les dates d'exploitation, le nombre de remontées mécaniques mais également des informations sur l'altitude et des précisions qualitatives sur la fermeture des sites.

Répartition du nombre de stations par massif au sein de la BD 'STATIONFERMEES'



Typologie des stations au sein de la base de données 'STATIONFERMEES'

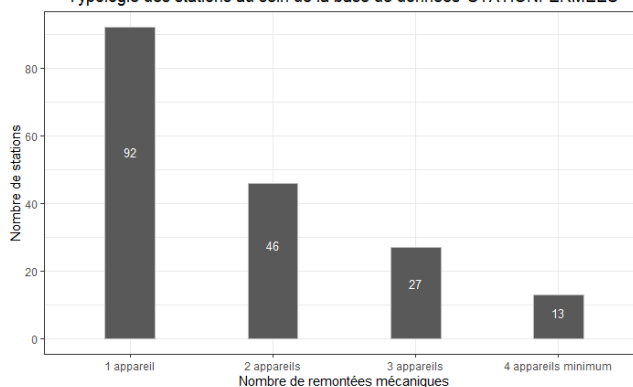


Figure 7: Analyse descriptive des stations de ski fermées françaises ; Source : BD « STATIONFERMEE » (Métral P-A., recensement 2020)

Afin de mieux connaître les stations étudiées, une rapide analyse descriptive a été réalisée (figure 6). Comme on peut le voir, les stations de ski fantômes sont pour une très grande partie des stations alpines (plus de 50%). Le reste étant réparti au sein des autres massifs avec une faible proportion des stations Pyrénéennes. Ce sont en général de petites exploitations touristiques avec 1 ou 2 remontées mécaniques. Seulement 13 stations de la base de données sont décrites comme ayant au minimum quatre remontées. Cela jouera donc un rôle indéniable dans l'analyse finale et sur les enjeux engendrés par la fermeture de ces stations. Quoiqu'il en soit, cette base de données sert de point de départ dans cette étude pour retrouver et analyser la fiabilité de chacun des sites qui y sont recensés.

4.2.1.2. BD Stations

La BD Stations est une base de données développée en 2012 au sein de l'IRSTEA de Grenoble. Cette dernière vise à comparer de manière homogène les stations de sport d'hiver françaises actuellement en activité et fût créée au terme d'un recensement précis des caractéristiques propres de chaque station. Nous entendons par là que les stations présentes dans cette base de données sont qualifiées en s'appuyant sur un ensemble de critères complémentaires à la fois quantitatifs et qualitatifs (durée d'exploitation, type d'exploitant, mode de gestion, moment de puissance total, dénivelé, altitudes, etc). Au même titre que la base de données « STATIONFERMEE », la BD Stations est centrale dans cette étude. Dans l'optique de mieux caractériser et étudier les anciennes stations de ski, cette base de données thématique servira de point de comparaison.

4.2.2. Bases de données spécifiques sur les stations de ski

Pour mener à bien cette étude, nous nous sommes également appuyés sur deux bases de données permettant de caractériser et décrire les remontées mécaniques : la BD CAIRN et la BD TOPO de l'IGN sur le transport par câble. Ces deux bases sont directement intégrées en tant que tables sur un serveur PostgreSQL.

4.2.2.1. Base de données CAIRN

La base de données CAIRN (Catalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales) recense une très grande partie des remontées mécaniques ouvertes ou fermées en France. Cette base de données résulte du travail du STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés), rattaché à l'administration de l'Équipement, en charge du contrôle des appareils et autorité compétente pour délivrer les autorisations d'exploitation correspondantes. Ainsi, cette base de données est théoriquement la plus exhaustive connue.

On y trouve de multiples informations sur le nom de l'appareil, la station à laquelle il appartient et la structure qui l'exploite. Mais le plus intéressant ici est l'ensemble des éléments techniques de la remontée, notamment la date de construction, le débit et le moment de puissance. L'enjeu sera donc de faire le lien entre cette base de données et les appareils digitalisés.

4.2.2.2. Base de données IGN Transport par câble

Une seconde source de données sur les remontées mécaniques peut être mentionnée, il s'agit de la BD TOPO IGN avec son volet transport par câble. Certaines stations ont fermé leurs portes récemment et les appareils sont donc toujours en place et en état de fonctionnement. Ils sont donc encore présents au sein de cette base de données. Cela permet donc d'avoir pour quelques appareils un tracé déjà effectué dont on peut récupérer la géométrie par jointure SQL.

4.2.3. Données spatiales historiques

Enfin, pour mener à bien le travail de digitalisation des différentes remontées mécaniques, des services WMS ont permis de mieux visualiser les tracés et notamment ceux de l'IGN. Étaient à disposition les orthophotos historiques de 1960-1975 et 2000-2005, ainsi que la BD ORTHO 20cm et le Scan Topo 25. Ces différentes sources ont servi à appuyer et illustrer les informations obtenues lors du travail de recherche sur les stations, et constituent le dernier outil permettant de repérer directement la localisation des appareils avant de digitaliser les linéaires de remontées mécaniques.

Ponctuellement, le service WMS d'Openstreetmap a pu être mobilisé car il contient des tracés de remontées mécaniques qui ne sont plus en service mais encore présentes dans la base de données.

4.2.4. Données qualitatives complémentaires

La dernière source qu'il convient de citer correspond aux différentes ressources internet utilisées pour retrouver les tracés des remontées mécaniques. En effet, plusieurs sites ont été particulièrement utiles et le premier d'entre eux est le site « stations fantômes » (<https://stationsfantomes.wordpress.com/>), réalisé par Vincent Simon. Ce site recense un très grand nombre de stations de ski fermées, avec des descriptions du site, des remontées et des tracés lorsqu'ils étaient connus ainsi que l'ensemble des sources utilisées pour chaque article. Le forum « remonteemecaniques.net » a également été très utile pour retrouver la trace d'anciennes remontées. Certains passionnés et locaux ont réalisé des « reportages » sur certaines remontées avec leur histoire et des discussions autour de ces appareils.

Dans une moindre mesure, d'autres ressources ont pu être mobilisées au cas par cas selon les stations. On peut parler notamment des archives départementales ou municipales qui ont pu permettre de retrouver des informations techniques telles que le débit théorique en montée ou le nom de certains appareils. Ce sont des informations qui sont essentielles pour la suite de l'étude comme nous le verrons un peu plus tard (4.3.3). Et puis, dans une optique de recherche de localisation des appareils, l'outil « Google StreetView » a également été utilisé avec les dates de fermeture, démontage. Ces différentes ressources ont permis de réaliser un travail d'archive pour retrouver l'ensemble des remontées mécaniques qui étaient abandonnées.

4.3. Digitalisation des remontées mécaniques

La digitalisation des remontées mécaniques constitue une première phase indispensable pour cette étude en créant une information spatiale pour l'ensemble des sites fermés. Suite à celle-ci, nous pourrions qualifier les appareils en collectant des informations supplémentaires sur les linéaires nouvellement digitalisés.

4.3.1. Recherches d'informations, travail d'archive

Pour chaque station fermée au sein de la base de données de recensement, un travail préparatoire a été effectué. En s'appuyant sur l'ensemble des ressources énoncées précédemment, l'enjeu est ici d'identifier et de répertorier un certain nombre d'informations permettant de décrire précisément la station. Le croisement de cette recherche documentaire avec la BD « STATIONFERMEE » constituera le support du travail de digitalisation.

Les informations jugées utiles vont porter dans un premier temps sur la localisation de la station en s'intéressant à son nom et sa commune. En parallèle, des éléments sur l'histoire et la création de la station sont récupérés avec les caractéristiques techniques de celles-ci. Nous entendons par là le nombre d'appareils présents, leur nom et altitudes respectives s'ils sont connus.

Il est important de préciser que certaines informations se trouvent être déjà présentes dans la base de données recensant les stations. Toutes les données récupérées dans cette recherche ne sont donc pas indispensables mais ont permis de se familiariser avec l'ensemble des échantillons et d'avoir un meilleur aperçu du fonctionnement et l'histoire de ces anciens sites touristiques.

Cette méthode de recherche documentaire sur les stations apporte des éléments de contexte et favorise ainsi non seulement la phase suivante de digitalisation mais également l'interprétation des résultats.

4.3.2. Traçage des linéaires de remontées mécaniques

Une fois les informations rassemblées pour une station considérée, la phase de digitalisation des remontées a pu débuter au sein d'un logiciel de SIG, en l'occurrence QGIS, couplé avec une base de données Postgis. Lors de cette première étape où l'on crée directement la donnée spatiale sur les stations de ski, trois scénarios principaux se sont présentés. Il convient de les détailler pour mieux comprendre la démarche adoptée dans cette étude :

- Fermeture récente du site

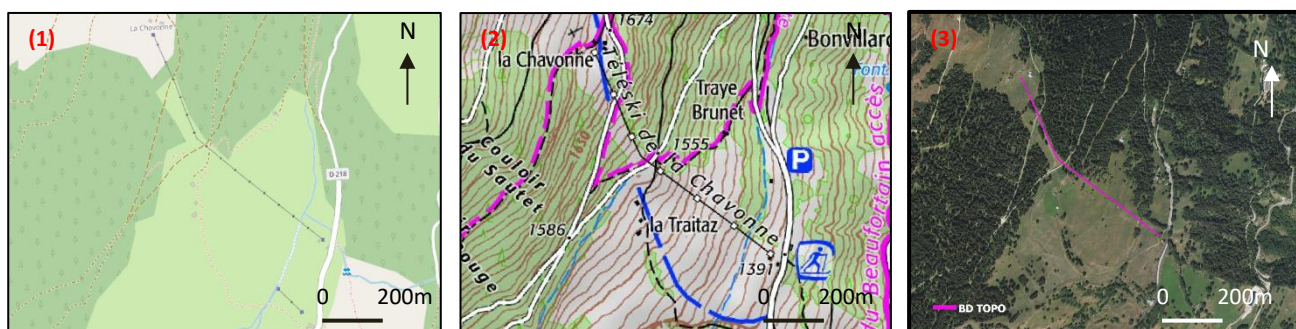


Figure 8: Comparaison des bases de données lors du repérage des remontées mécaniques fermées récemment : OSM (1), Scan 25 (2), BD TOPO (3), station de Granier-sur-Aime (Savoie)

Le premier cas de figure concerne les stations de ski fermées récemment, c'est-à-dire dans les années 2010. On retrouve alors facilement les traces des remontées mécaniques sur des sources telles qu'OpenStreetMap ou bien la BD TOPO. Dans ce cas présent, une rapide vérification sur une orthophoto récente est nécessaire pour s'assurer que la remontée est bien présente, avec notamment l'existence de pylônes, câbles. Dans la situation où le tracé est présent dans la BD TOPO, le seul report de son identifiant permet par la suite de récupérer la géométrie par jointure.

- Fermeture ancienne documentée

Le second scénario est le plus courant. La station traitée a fermé ses portes depuis plusieurs décennies mais le travail de recherche et le croisement des sources permet de retrouver le tracé des remontées. Concrètement, cela se traduit par une description précise des points de départ et d'arrivée de l'appareil, ou bien directement avec un tracé présent sur le site « stations fantômes » ou d'autres forums, comme décrits auparavant (4.2.4). Dans ce cas-là, la vérification se fait directement avec le scan 25 et les orthophotos disponible en WMS.

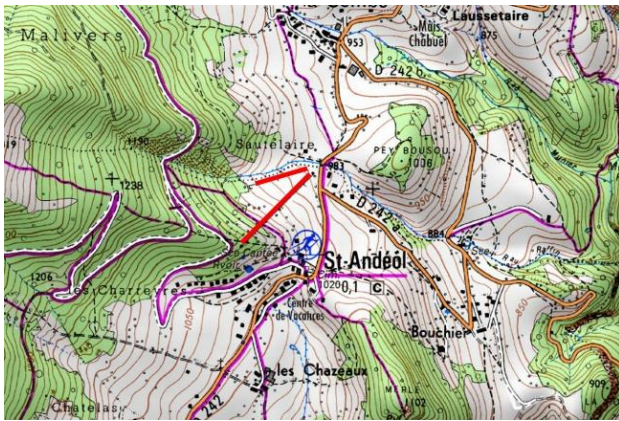


Figure 9: Localisation du tracé des remontées mécaniques sur le site "stations fantômes" et le forum "remontées mécaniques.net" pour les stations de St Andéol et Alex

Afin de digitaliser convenablement les anciennes remontées mécaniques, nous nous sommes appuyés sur plusieurs indices caractéristiques de ces appareils, visibles sur les différentes orthophotos. Les indices les plus visibles vont être dans un premier temps les trouées forestières et anciennes pistes de ski. On retrouve ces éléments sur un grand nombre de sites, leur emprise spatiale est suffisamment importante pour les repérer facilement. Dans la plupart des cas, ce sont des marques laissées dans le paysage pour de très nombreuses années (Astrade *et al.*, 2021).

Les autres indices, un peu moins visibles, se trouvent sous forme de ponctuels, avec notamment des vestiges de chalets au niveau des gares d'arrivée et de départ, ou bien des pylônes laissés en friche quelques années et visible sur les images historiques. Ce sont donc autant d'indices des anciennes activités du ski qu'il est possible d'identifier lorsque ceux-ci sont un peu isolés.

Pour compléter cette méthode de digitalisation, il est important de noter que les limites précises des anciennes remontées sont pour la plupart très peu visibles. De ce fait, l'approche retenue consiste à arrêter ou débiter le tracé selon certains espaces particuliers tels qu'un réseau routier, ou bien la lisière d'une forêt, d'un espace agricole.

Les grandes catégories d'indices sont illustrées sur la figure ci-dessous pour le cas des anciennes stations de St Andéol et de la Ruchère. D'autres exemples en annexe 1 complètent et illustrent l'approche utilisée pour la digitalisation.

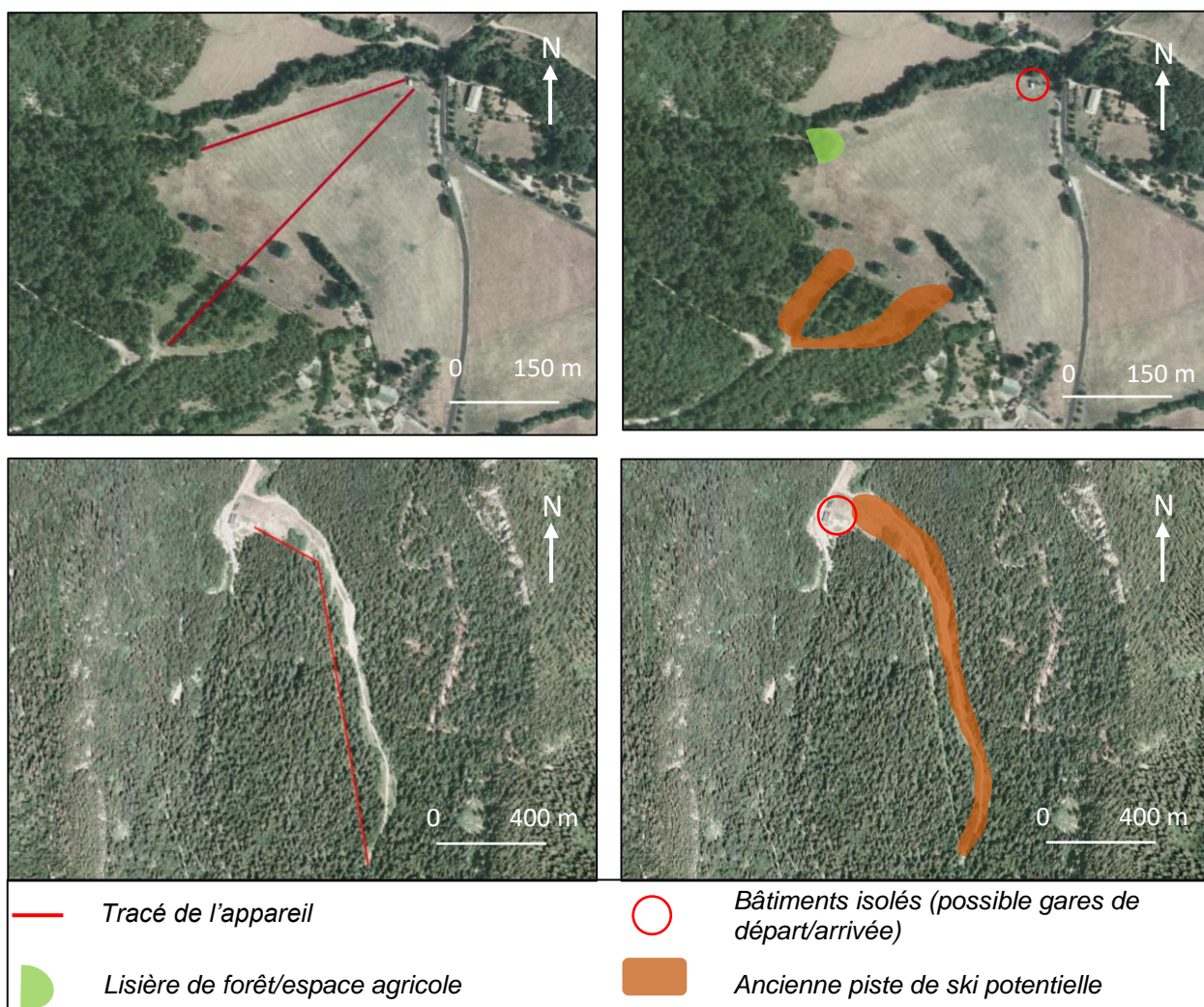


Figure 10: Illustrations des indices visibles permettant la digitalisation des remontées mécaniques ; Anciennes stations de St Andéol et de la Ruchère ; Photographies aériennes 2000-2005

- Fermeture et localisation du site peu documentées

Dans ce troisième et dernier cas de figure, on ne trouve que très peu d'informations sur la station fermée et la localisation précise des appareils est alors inconnue. Cela laisse donc deux options pour le traçage des linéaires. Si les quelques informations obtenues permettent d'avoir une idée assez précise de l'endroit de la remontée, avec par exemple des altitudes basses et hautes, un point de départ correctement décrit (village, route...), la digitalisation est alors possible. Cela s'effectue donc en fonction de la topographie de la zone d'étude et des indices visibles (espaces agricoles, bâtiments isolés). Dans le cas où les informations sont trop lacunaires ou bien avec des dates d'exploitation très anciennes, alors la station n'est pas traitée et est recensées comme telle.

Dès lors, il convient de préciser dès cette étape qu'une certaine approximation a été tolérée pour le traitement de certaines remontées mécaniques et notamment pour les deux derniers scénarios. L'objectif n'est pas ici de réaliser un travail de précision très fin, mais bien de reproduire une information spatiale fidèle aux anciens domaines skiables. Comme cela sera développé ultérieurement, la représentation des domaines spatiale des domaines skiables est pilotée par la résolution du MNT à 25m. Le fait de travailler sur une enveloppe globale, autorise une certaine tolérance dans la digitalisation des remontées mécaniques.

4.3.3. Liaison avec la base de données CAIRN

En parallèle de ce travail de digitalisation, la liaison de la donnée nouvellement créée avec la base de données du CAIRN (Catalogue Informatique des Remontées Mécaniques Nationales) constitue un objectif à part entière.

En effet, pour chacun des appareils, l'enjeu final se trouve dans l'obtention d'un ensemble d'informations sur ceux-ci pour connaître leur capacité de transport, le type d'appareil, et ainsi mieux caractériser le type de stations dont il est question. La variable la plus importante à obtenir est le moment de puissance, un indicateur de la capacité de transport de la remontée, résultant du produit entre son débit théorique en montée et son dénivelé.

$$\text{Moment de puissance (skieurs.km/h)} \\ = \text{débit théorique montée (skieurs/h)} * \text{dénivelé (km)}$$

Équation 1: Relation entre le moment de puissance, le débit théorique en montée et le dénivelé d'une remontée mécanique

Le moment de puissance constitue une donnée essentielle pour la suite des traitements puisqu'il permet d'établir l'importance des remontées mécaniques et, in fine, des stations, en agrégeant les différentes valeurs pour un même site. Pour cela, on s'appuie sur cette base de données CAIRN décrivant très précisément les appareils.

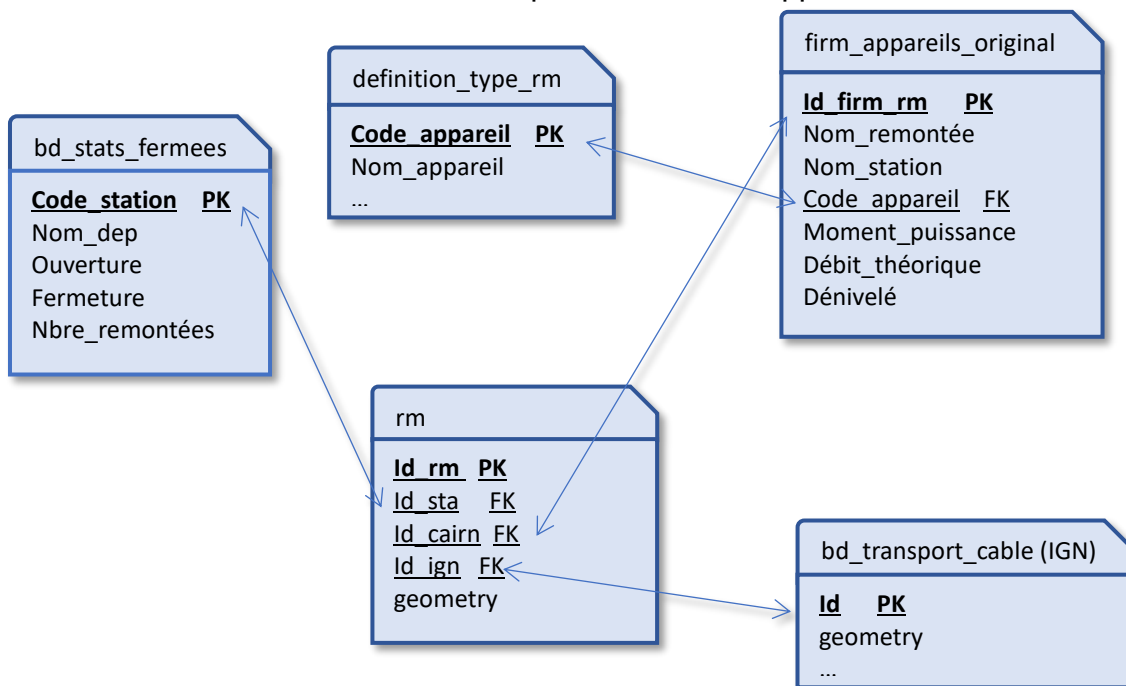


Figure 11: Modèle conceptuel des données utilisées lors de la digitalisation et recherche du moment de puissance

Comme on peut le voir sur le modèle conceptuel précédent, les données utilisées dans cette étude sont inter-reliées et contenues dans un SGBD, en l'occurrence PostgreSQL. Nous pouvons donc obtenir les caractéristiques de chaque appareil à condition de retrouver celui-ci dans la BD CAIRN. On se place ici dans un travail de « rétro-ingénierie », avec un appareil qui est existant dans notre jeu de données digitalisées (table **rm**), mais que l'on doit retrouver au sein du catalogue informatique des remontées (table **firm_appareils_original**), lui-même ne comportant pas d'information spatiale, mais retraçant l'ensemble des informations historiques collectées dès lors qu'un appareil a été mis en exploitation en France.

Cela passe par de nombreuses tentatives au travers de requêtes SQL pour retrouver la remontée. Les requêtes ont été exécutées selon un ordre précis en fonction des informations disponibles sur l'appareil.

C'est-à-dire que l'on recherche directement le nom de l'appareil s'il est connu, puis ensuite avec le nom des communes les plus proches, le nom de la station ou de l'exploitant. S'il n'y a toujours pas de résultats cohérents avec l'objet d'étude, alors des requêtes plus complexes sont utilisées. Celles-ci peuvent mêler le département de l'appareil, un intervalle d'altitudes ainsi que d'autres informations sur des dates de construction, comme visible ci-dessous. L'avantage de détailler plusieurs paramètres dans cette dernière requête va être de s'assurer que la remontée est présente ou non dans la base.

```
-- Recherche sur le nom de l'appareil
SELECT * FROM stations.firm_appareils_original
WHERE nom_firm_rm ILIKE '%soleil%'

-- Recherche d'un appareil sur le massif et la station
SELECT * FROM stations.firm_appareils_original
WHERE nom_station_firm ILIKE '%vaux%'
      AND nom_massif ILIKE '%jur%'

-- Requête détaillée
SELECT *
FROM stations.firm_appareils_original
WHERE constructeur_principal ILIKE %pomma%
      AND code_categorie_appareil ILIKE 'rfp'
      AND denivele BETWEEN 15 AND 50
      AND alt_sup < 1600
      AND alt_inf BETWEEN 1500 AND 1600
      AND longueur_developpee BETWEEN 300 AND 600
      AND annee_construction < 1985
```

Figure 12: Exemple de requêtes utilisées pour retrouver les anciens appareils dans le Catalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales (CAIRN)

La vérification des résultats s'opère en comparant les différentes caractéristiques présentes dans la table. Cela dépend également du nombre de résultats pouvant sortir après la recherche. Par exemple, on peut considérer qu'un appareil ayant des altitudes, une commune, des dates de construction et un type d'appareil similaire à l'appareil étudié est suffisant pour dire que c'est l'appareil recherché, et ce même avec des différences de nom s'il n'existe pas d'appareil similaire correspondant. Pour une station, il est parfois important d'avoir une connaissance globale de ses remontées avant de procéder à une affectation individuelle de chaque linéaire digitalisé en fonction de leurs caractéristiques plutôt que de rechercher une correspondance exacte entre les informations contenues dans la base et celles réunies dans la BD STATIONFERMEE).

En revanche si des paramètres sont trop éloignés des données que l'on dispose sur la station, alors l'identifiant n'est pas reporté pour l'appareil en question.

Ainsi, une partie conséquente des appareils n'a pas pu être retrouvée dans la base CAIRN. On comptabilise un peu moins de 30% des appareils digitalisés sans moment de puissance connu (cf 5.1). Cela en raison de l'ancienneté de certains appareils dont l'exploitation a été cessée avant la mise en place de la réglementation et des services en charge de leur fonctionnement, notamment le STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés).

Une approche théorique des moments de puissance a donc été mise en place en se basant sur les années de construction et le type d'appareil. La requête permettant ce calcul est visible en annexe 2.

4.4. Modélisation des conditions d'enneigement : adaptation de la méthode Crosscut

Une fois l'ensemble des remontées digitalisées, la phase de traitement a pu être effectuée pour calculer la fiabilité de l'enneigement des stations. On reprend ici une approche déjà existante dans le milieu scientifique avec la méthode Crosscut (François *et al.*, 2016), développée en partenariat entre l'INRAE et Météo-France. Cette approche permet de croiser les données spatiales des stations avec les simulations numériques d'enneigement du modèle Safran-Crocus. Elle permet également la prise en compte de certaines données socio-économiques sur ces sites. Dans cette méthode, l'ensemble des traitements est réalisé par des scripts python. Les grandes étapes sont décrites sur le schéma ci-dessous.

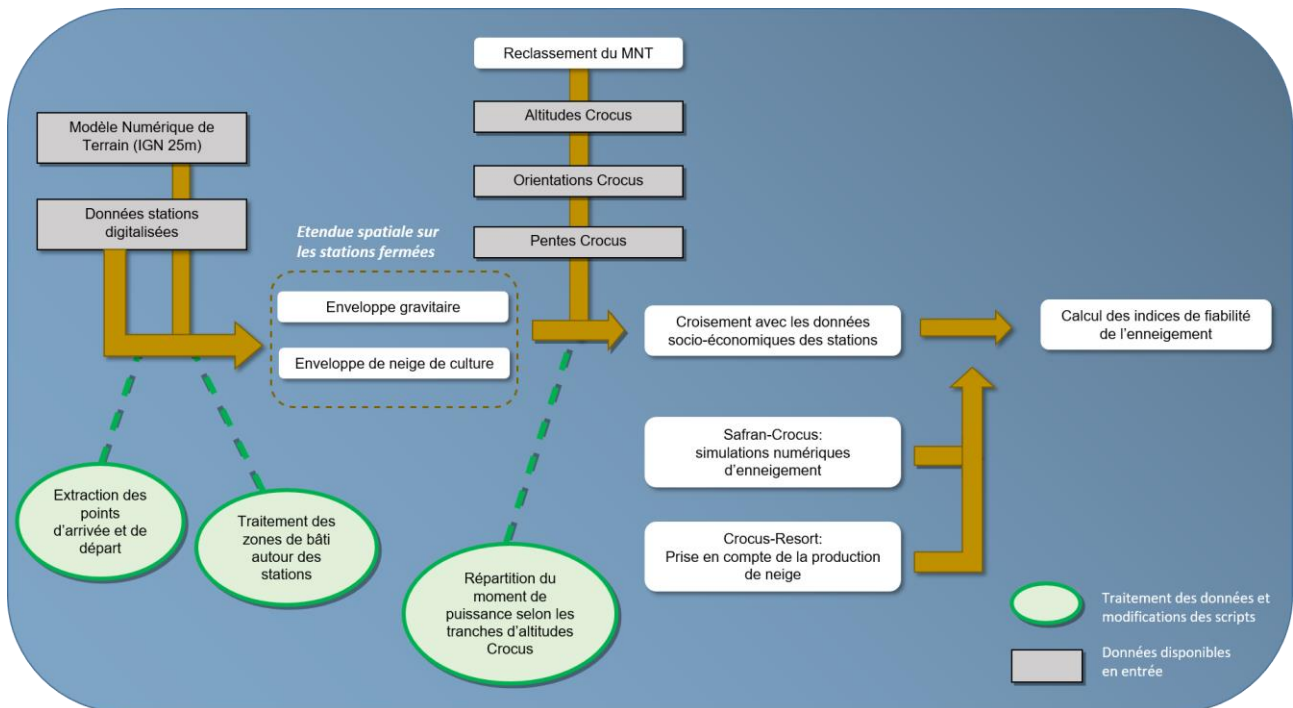


Figure 13: Adaptation de la méthode Crosscut, schéma produit à partir de François *et al.* (2016)

Suite au travail de digitalisation, l'objectif va être d'adapter ces données spatiales pour pouvoir utiliser cette méthode et ainsi obtenir pour chaque station des données sur la fiabilité de leur enneigement.

4.4.1. Mise en place d'une enveloppe gravitaire de domaine skiable

4.4.1.1. Préparation des données

Afin de définir et calculer pour chaque station un domaine skiable théorique, nous pouvons dans premier temps stocker la géométrie des points hauts et bas de chaque remontée. L'utilisation de l'extension spatiale de PostgreSQL « PostGIS » est ici l'option privilégiée pour préparer les données avant la phase de calcul. Une vue a alors été créée (figure 14) pour récupérer ces nouvelles géométries, de manière à ce que les données soient rafraichies en cas de modification directe sur les remontées digitalisées. Cela s'est effectué grâce aux fonctions « ST_StartPoint » et « ST_EndPoint » permettant d'obtenir les ponctuels des deux extrémités des linéaires. Ces dernières fonctionnant sur des géométries simples de type « Linestring », nous nous assurons de récupérer ce type de données pour chacun des linéaires avec la fonction « ST_Dump ».

```

CREATE VIEW staclosed.dump_points AS (

    SELECT ST_StartPoint((ST_Dump(rm_final.geom)).geom)
    FROM staclosed.rm_final

    UNION

    SELECT ST_EndPoint((ST_Dump(rm_final.geom)).geom)
    FROM staclosed.rm_final)

```

Figure 14: Requête utilisée pour stocker les points d'arrivée et départ des remontées mécaniques

A ce stade, on dispose pour chaque remontée des deux géométries, stockées dans le même champ « points » sans avoir la certitude que les points de départ et d'arrivée sont respectivement les points bas et hauts de l'appareil. Pour obtenir l'altitude de ces points, l'outil « Add Raster Values to Features » de l'extension SAGA a été utilisé.

A partir de ces données, une dernière table a été générée (annexe 3) pour obtenir pour chaque appareil, la géométrie des points d'arrivée et de départ avec leurs altitudes respectives et ce, au sein de champs distincts.

4.4.1.2. Calcul des enveloppes gravitaires

Suite à ce travail préparatoire des données digitalisées, nous pouvons dès à présent calculer les domaines skiables potentiels, décrits selon le terme d'enveloppes gravitaires (François *et al.*, 2016). Ces enveloppes correspondent à l'« ensemble des points accessibles depuis le haut d'une remontée et qui permettent de rejoindre le bas par gravité » (François *et al.*, 2016). Les enveloppes de chaque remontée mécanique sont alors agrégées pour former une enveloppe unique pour chaque station. Cette étape est cruciale pour obtenir pour chaque station, une étendue spatiale qui est potentiellement skiable depuis les anciens appareils.

Concrètement, la méthode de calcul des enveloppes gravitaires est basée sur la sélection des pixels du MNT considérée comme skiable et accessible depuis la remontée mécanique. Cette sélection est opérée par itération successive des pixels selon les deux points de chaque appareil. On prend en compte les 8 pixels voisins en prenant en compte l'altitude et la pente de ceux-ci.

Ainsi, les pixels sélectionnés pour les points hauts auront une altitude inférieure aux pixels précédent et inversement pour les points bas. Les pixels comprenant des pentes supérieures à 50° sont exclues puisqu'ils ne sont pas jugés comme potentiellement skiables. La prise en compte de l'étendue depuis le bas des remontées est essentielle afin de bien délimiter l'étendue spatiale du domaine car elles représentent la zone depuis laquelle il est possible de rejoindre le pied d'un appareil pour remonter sur le domaine. L'enveloppe gravitaire correspond ainsi au croisement des points accessibles depuis le haut et le bas des appareils, comme visible sur la figure 15. Pour construire l'enveloppe unique d'une station, l'ensemble des points accessibles depuis le haut et le bas sont fusionnées indépendamment les unes des autres et seule l'intersection de ces deux zones est conservée.

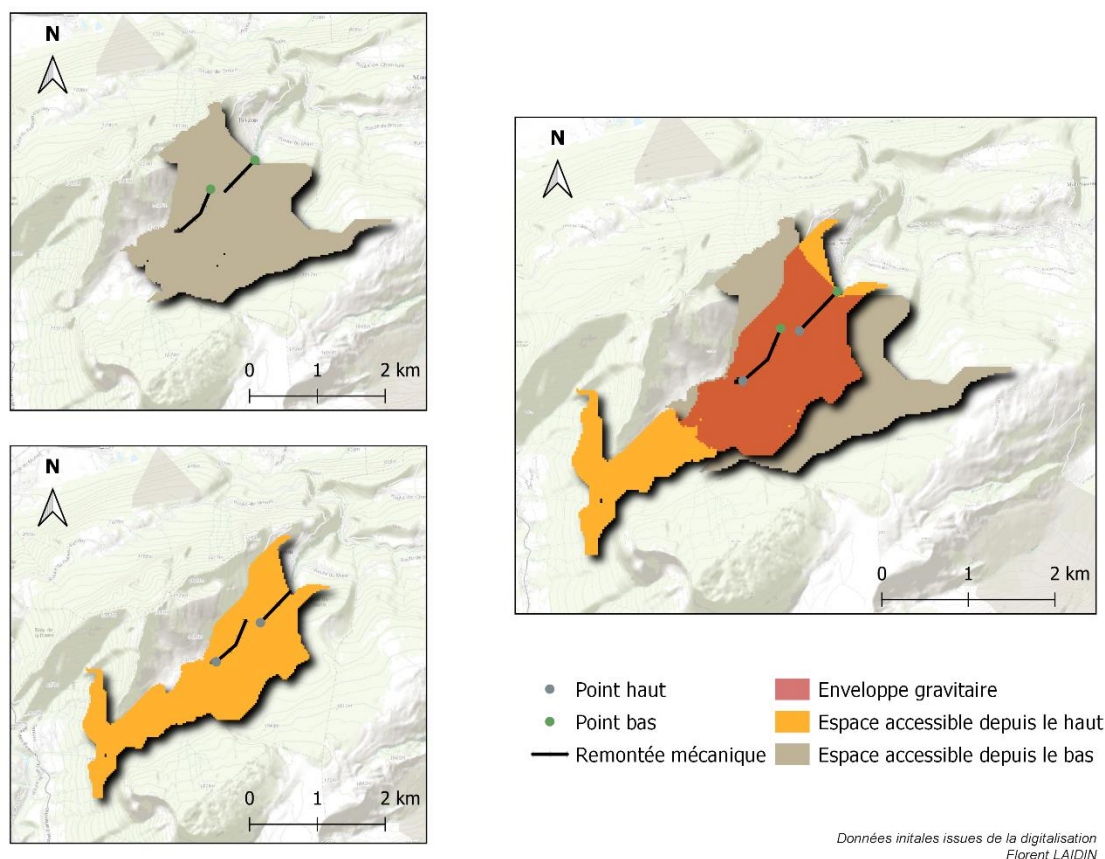


Figure 15: Illustration du principe de l'enveloppe gravitaire appliquée aux anciennes remontées de la station de Brizon (Haute-Savoie)

4.4.1.3. Calcul des enveloppes de neige de culture

En parallèle au calcul des enveloppes gravitaires, les zones potentielles de production de neige ont pu être établies. Les critères retenus proviennent de la thèse de Pierre Spandre (2016), portant l'intégration de la production de neige dans les modèles numériques d'enneigement. La modélisation est ici plus poussée permettant la localisation des enneigeurs et le taux de couverture en neige de culture de la station. Cette nouvelle approche, baptisée « Crocus-Resort », permet de projeter différents taux de couverture en production de neige sur un domaine skiable (Spandre, 2016).

L'ensemble des calculs est dans un premier temps basé sur la prise en compte du bâti. Le rôle des enneigeurs étant principalement d'assurer la continuité d'une pratique skiable depuis le haut des remontées jusqu'au village de la station (Spandre, 2016), les critères de sélection vont tout d'abord être établis selon la proximité entre les zones de bâti et les remontées mécaniques. Cela permet de se concentrer sur les zones propices à l'installation de systèmes de production de neige.

Pour ce faire, nous nous sommes appuyés sur la BD TOPO de l'IGN en important pour tous les départements concernés les zones de bâti indifférencié. Au regard du volume de données conséquent et dans un souci de rapidité des traitements, l'importation selon une méthode d'héritage a été opérée dans PostgreSQL. Celle-ci s'est effectuée au travers d'une fonction PLPG, visible en annexe 4. Pour chaque table de bâti des contraintes sont mises en place ainsi qu'une indexation spatiale, tout en affectant un héritage avec une table mère.

Une fois les données structurées dans cette table mère, le bâti associé à chaque station a été délimité dans un rayon de 300 mètres autour du bas des remontées mécaniques, puis par itération successives de 200m (en ne sélectionnant que des bâtiments qui n'avaient pas été sélectionnés précédemment).

Les entités restantes ont ensuite été qualifiées selon la méthode des tâches urbaines avec l'attribution d'un statut d'isolement pour les groupes composés de moins de 5 bâtiments (Spandre, 2016). A cela s'ajoute un dernier critère concernant le bâti. Il s'agit de l'altitude. Spandre *et al.* (2016) ont estimé que les « zones urbaines dont l'altitude excède 30% de l'altitude moyenne du village sont exclues ». L'altitude moyenne des stations a donc été calculée en regroupant pour chaque site l'altitude des bâtiments pondéré par leur surface développée (*i.e.* en tenant compte de leur hauteur, in François *et al.*, 2012).

Une fois ces traitements effectués, les données ont pu alimenter la chaîne de modélisation Crosscut. Ainsi, seules les remontées mécaniques à proximité du bâti nouvellement créé sont prises en compte pour le calcul des enveloppes de neige de culture. La méthode de calcul utilise les enveloppes précédemment calculées pour ces appareils pour faire une sélection des pixels correspondants aux pistes bleues et vertes équipées en priorité, soit avec une pente de pixel inférieure à 25°. La zone ainsi obtenue est ensuite dilatée ou érodée par sélection ou désélection des pixels voisins de ceux situés à la plus haute altitude jusqu'à obtenir une zone dont la surface est la plus proche possible d'un seuil fixé.

Néanmoins, ces données n'ont pas été exploitées dans la présente étude car l'absence de développement significatif de la production de neige pendant la période d'existence des stations étudiées n'en faisait pas une question prioritaire. Ces informations pourraient néanmoins être mobilisées pour des études ultérieures afin d'évaluer dans quelle mesure la production de neige aurait pu ouvrir des marges de manœuvre supplémentaires (*i.e.* limiter le nombre de fermeture) pour certains domaines skiables.

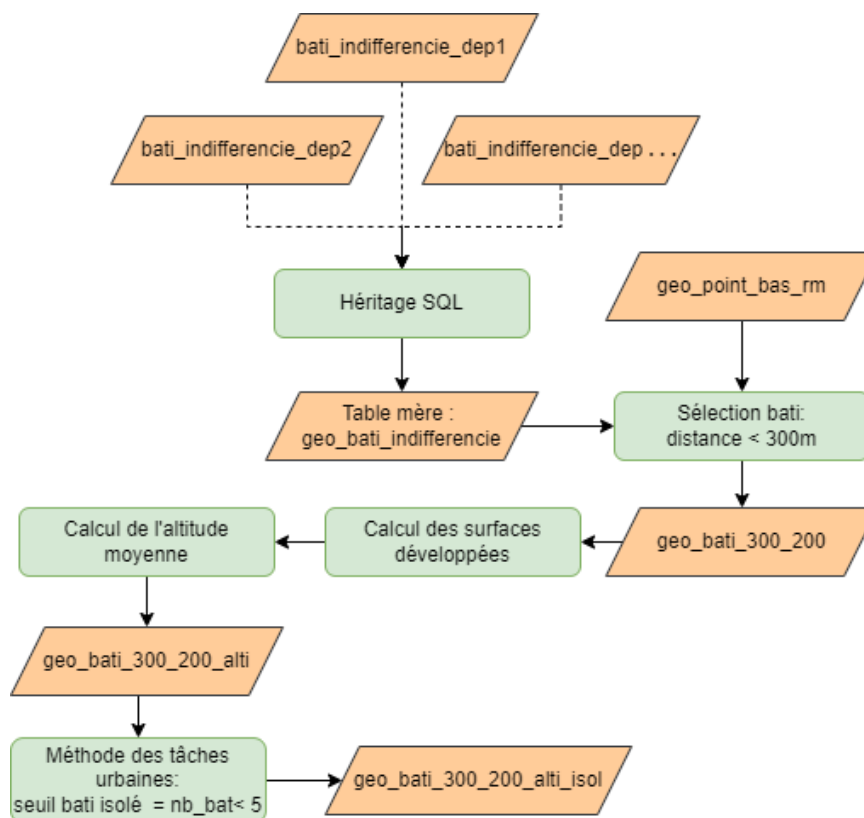


Figure 16: Diagramme de flux de la préparation et précision du bâti pour le calcul des enveloppes de neige de culture

4.4.2. Croisement avec les indicateurs socio-économiques des stations

Suite à la mise en place d'une étendue spatiale délimitée selon les critères précédents, il convient d'appliquer aux enveloppes gravitaires différentes informations sur les stations pour modéliser les conditions d'enneigement et surtout la fiabilité des stations (François et al., 2016). La variable qui nous intéressera le plus est le moment de puissance de chaque remontée.

Dans l'optique d'une utilisation du modèle de manteau neigeux SAFRAN-Crocus, le MNT a pu être reclassé selon les tranches d'altitude de 300 mètres décrites en [2.2.2](#). La pente ainsi que l'orientation ont pu être reclassées également selon les valeurs prises en compte par le modèle (annexe 5). Le moment de puissance de chaque remontée mécanique peut ainsi être réparti selon les tranches d'altitudes Crocus traversées par l'appareil.

En effet, il n'existe pas de lien direct entre les appareils recensés par l'IGN et celles répertoriées par le CAIRN. Par défaut, l'information spatiale utilisée pour décrire l'organisation de l'appareil a donc été l'altitude et le moment de puissance total ventilés en fonction des altitudes type de SAFRAN et de la part de chaque appareil au sein de ces tranches de 300m.

Cette attribution du moment de puissance est appliquée selon le dénivelé présent sur chaque tranche d'altitude. Concrètement, pour un appareil situé entre 1000 et 1300m, celui-ci se verrait attribuer une part très faible du moment de puissance sur la 1^{ère} tranche de 900m (750m-1050m) à l'inverse de la tranche de 1200m (1050m - 1350m) qui concentrerait plus de 80% du moment de puissance total. L'intérêt de cette démarche réside dans le fait que l'on prend en compte les appareils selon un gradient altitudinal. Un paramètre essentiel puisque les conditions d'enneigement de certains sites sont très hétérogènes selon le haut et le bas des stations, et impactent de ce fait la fiabilité des stations (François *et al.*, 2016).

Enfin, le moment de puissance est réparti entre les pixels en fonction de la part du moment de puissance totale de la station de manière à ce que la somme de l'ensemble des pixels soit égale à 100, soit 100% du moment de puissance total.

Il est important de préciser ici que la pente n'est pas prise en compte. Ce paramètre est jugé comme négligeable contrairement à l'altitude qui joue un rôle bien plus important dans l'enneigement des stations (François *et al.*, 2016).

4.4.3. Calcul des indices de fiabilité

Une fois les différentes opérations successives du MNT effectuées et le moment de puissance réparti au sein de l'enveloppe gravitaire selon les critères en entrée du modèle SAFRAN-Crocus. Le calcul final des indices de fiabilité peut être opéré. Pour cela, on retrouve pour chaque site l'ensemble des simulations disponibles. Celles-ci s'étendent de 1958 à 2018 pour les massifs Pyrénéens et Alpin, et de 1961 à 2014 pour le reste des zonages. A partir de ces simulations, nous avons des informations quotidiennes sur la quantité de neige pour chaque site. Cela nous a permis de calculer un indice de fiabilité quotidien qui peut être utilisé pour évaluer la fiabilité de l'enneigement sur différentes périodes de temps.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés au calcul de l'indice de fiabilité « vacances combinées » (Spandre, 2016). La rentabilité des stations étant principalement liée à la fréquentation durant les vacances scolaires de Noël (20 décembre - 5 janvier) et d'hiver (5 février - 5 mars), le fait de s'intéresser précisément à l'enneigement des anciens sites touristiques sur ces périodes est très pertinent de point de vue de leur fiabilité. Ainsi, pour une saison considérée et pour chacun des jours compris dans les vacances de Noël et d'hiver, la proportion du domaine skiable qui présente une quantité de neige d'au moins 100 kg/m² (équivalent en eau), est calculée. Nous ajoutons la valeur attribuée précédemment à chaque pixel (part du moment de puissance) s'il dépasse le seuil d'enneigement considéré comme skiable.

Une moyenne des indices quotidiens est ensuite calculée avec l'affectation de poids relatif à ces deux périodes. Les vacances de Noël ne représenteront que 17% de l'indice global contrairement aux vacances d'hiver comptant pour 83% de l'indice global annuel de la station (Spandre, 2016). Cette répartition a été arrêtée après comparaison avec les chiffres de fréquentation de stations en termes de journées-skieurs collectés par Domaines Skiabiles de France (DSF).

Nous obtenons à l'issue de ces calculs un indice annuel pour chaque station correspondant à la proportion du domaine skiable jugée fiable pour une saison considérée et cela, pour différents types de neige. En effet, on retrouve des indices concernant des enneigements de type naturel et avec l'impact du damage, mais aussi les quantités de neige selon les méthodes de production de neige. Ainsi on peut obtenir des indices de fiabilité selon la production d'équipements de type perche ou ventilateur, à différents taux de couverture.

Il convient de préciser dès lors que l'analyse de la fiabilité des anciennes stations de ski se fera principalement avec des valeurs de neige damée. Nous considérons ici que le damage, en tant que méthode de préparation des pistes, est une pratique existant dans les domaines depuis les années 1950-1960. Bien que de systèmes plus performants soient apparus plus tard, les pistes ont toujours été aplanies selon des méthodes plus ou moins efficaces. Ainsi, il ne serait pas pertinent d'évaluer la fiabilité de l'enneigement des domaines skiabiles des stations fermées en ignorant la contribution du damage, contrairement à la production de neige telle qu'abordée précédemment.

V. Résultats

La digitalisation des remontées mécaniques pour chaque station et le calcul des indices de fiabilité nous permettent de caractériser et évaluer la fiabilité de l'enneigement des sites fermés. Afin de contextualiser les résultats obtenus, une première présentation des données digitalisées a été réalisée. Nous nous attacherons ensuite à analyser le profil des stations fermées en les comparant avec les stations encore actives de la BD Stations lors d'une analyse descriptive. L'analyse des indices de fiabilité clôturera cette analyse.

5.1. Données digitalisées

Les premiers résultats qu'il convient de détailler correspondent à la phase de digitalisation. Une fois l'ensemble des stations traitées, il est important de présenter l'échantillon total dont nous disposons et comment il se caractérise.

	Nombre de remontées mécaniques	Nombre de stations
BD STATIONFERMEE	339	178
Digitalisation	311	163
Données exploitables	219	96 *

* : Nombre de stations avec l'ensemble des remontées ayant un moment de puissance connu

Tableau 1: Synthèse des données digitalisées

Sur l'ensemble de la BD STATIONFERMEE, 163 stations ont pu être digitalisées sur 178 recensées, avec 96 stations dont l'ensemble des appareils possède un moment de puissance connu. Pour ce qui est des remontées en tant que telles, 311 sont présentes dans le jeu de données final sur les 339 qui étaient indiquées dans le recensement. En effet, certaines stations ont des dates d'exploitation trop anciennes ou bien des informations de localisation trop lacunaires pour être retrouvées. D'autres stations n'ont pas été traitées en raison d'appareils de faible importance. On parle ici des appareils de type file neige ou tapis mécaniques, avec des longueurs inférieures à la centaine de mètres ; installations pouvant en outre être déplacées. Ces micro sites et appareils ont été exclus de l'étude.

219 appareils ont pu être retrouvés dans le CAIRN ou d'autres données d'archive et possèdent donc un moment de puissance connu. Ce qui signifie que 92 appareils ont été digitalisés sans avoir de moment de puissance connu.

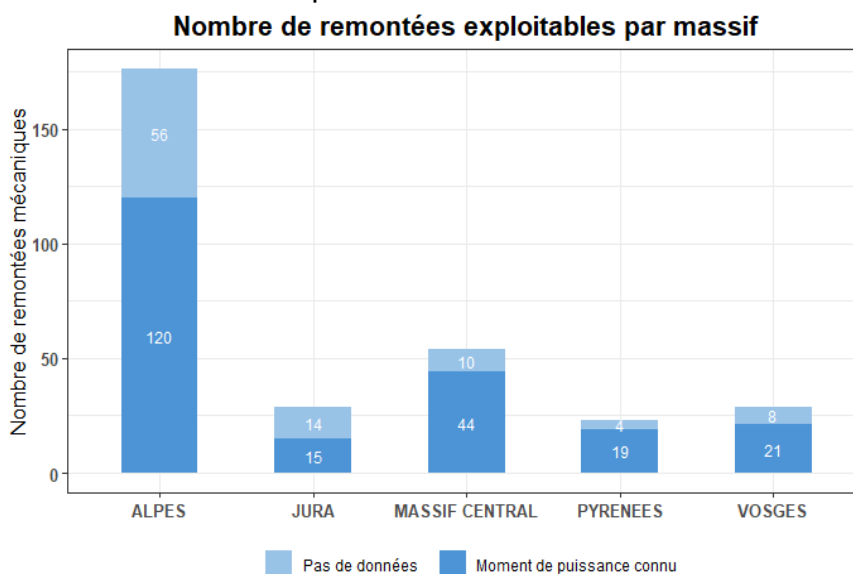


Figure 17: Bilan de la digitalisation au sein des massifs

Si l'on s'intéresse maintenant aux disparités géographiques entre les massifs, on retrouve la prédominance du massif Alpin qui concentre une très grande partie des appareils (176). De ce fait, c'est le massif qui possède le plus de remontées sans moment de puissance. Pour le reste des massifs le taux de remontées totalement exploitables est très satisfaisant, si ce n'est pour le Jura avec seulement une remontée sur deux. Pour ce massif, nous n'avons pas pu distinguer de raisons particulières sur cette présence partielle dans le CAIRN et autres sources de données. Les appareils étaient pourtant de taille similaire avec le massif voisin des Vosges.

L'absence d'informations précises et recensées des appareils est d'autant plus importante lorsque les stations sont des remontées mécaniques isolées ou des petits stades de neiges (deux appareils). Ce second histogramme ci-dessous vient illustrer ceci.

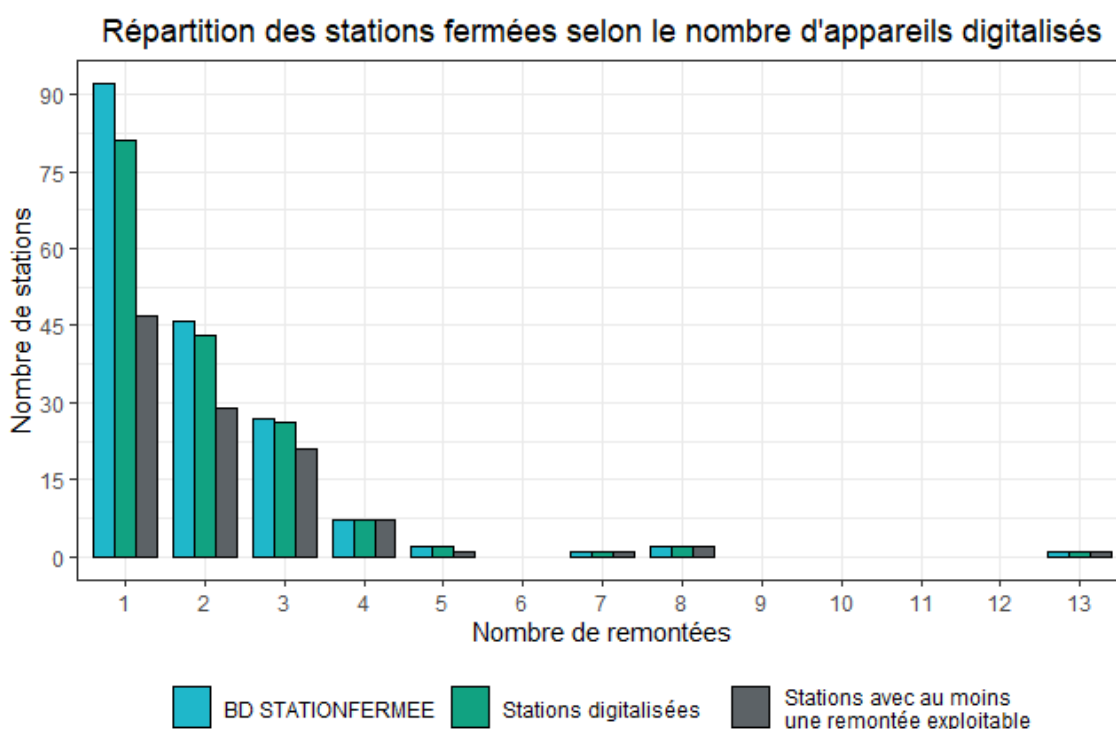


Figure 18: Caractérisation des stations ayant le moins de remontées présentes dans le CAIRN

Les deux types de stations prédominent dans l'échantillon global. Ce sont au sein de celles-ci que les remontées sont le plus souvent sans données. Pour le cas des stations de trois remontées ou plus on remarque qu'une très forte part des remontées est directement exploitable.

Ces premiers résultats sur la digitalisation nous montrent que l'ensemble des remontées n'a pas été digitalisé et cela, pour des informations manquantes ou un manque de pertinence dans le cadre de cette étude.

Il est essentiel de préciser que les appareils digitalisés n'ayant pas de moments de puissance connus (soit 92 appareils) ont tout de même été intégrés dans l'étude. Le moment de puissance de ces appareils a été estimé selon l'approche décrite en [4.3.3](#). Nous disposons ainsi d'un échantillon final de 163 stations de ski fermées et 311 remontées mécaniques exploitables.

5.2. Caractérisation des stations de ski fermées françaises

Nous pouvons à présent effectuer une analyse descriptive des stations de ski fermées françaises en s'intéressant notamment aux différences d'effectifs, d'altitudes mais également aux capacités de transport avec les stations encore ouvertes.

5.2.1. Analyse des effectifs

On comptabilise 225 stations présentes dans cette base de données contre 152 stations de ski fermées avec des indices de fiabilités connus, soit 9 de moins que celles digitalisées. Ces 9 stations n'ont pu être traitées en raison de l'absence de simulations d'enneigement. Leurs localisations n'entraient pas dans le modèle SAFRAN-Crocus et son maillage par zones.

Les stations fermées pyrénéennes sont les moins nombreuses avec seulement 10 sites répertoriés contre 28 stations ouvertes. En revanche, le Massif Central, avec 20 stations de ski fermées connus et exploitables, est le seul massif français à contenir moins de stations encore en activité, que de site l'ayant cessée.

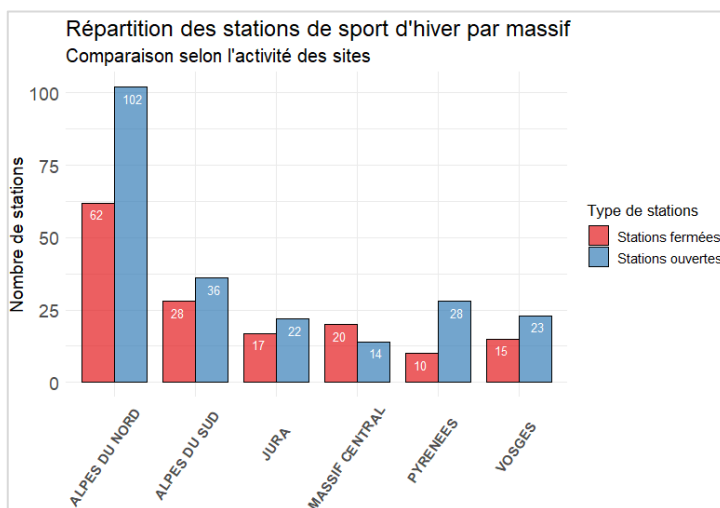


Figure 19: Comparaison des effectifs entre les stations ouvertes et fermées

Avec un total de 90 sites fermés, le massif alpin a été divisé selon les départements du nord (Isère, Savoie, Haute-Savoie) et Sud (Hautes Alpes, Alpes Maritimes, Alpes-de-Haute-Provence). Ce choix résulte autant de l'effectif important de stations que de la différence en termes de conditions d'enneigement entre les Alpes du Nord et les Alpes du Sud.

5.2.2. Analyse comparée des altitudes

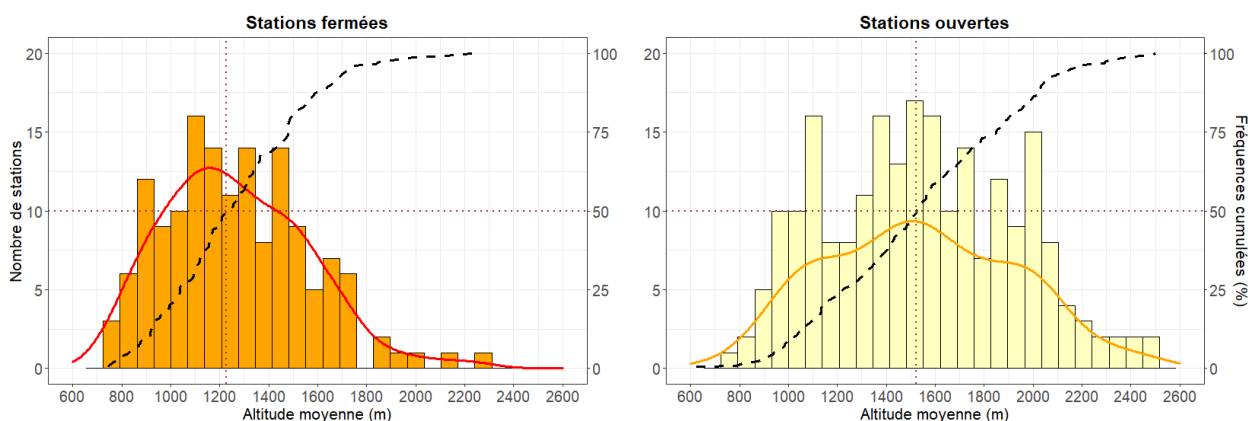


Figure 20: Répartition des stations ouvertes et fermées selon leurs altitudes moyennes

Pour ce qui est de l'altitude des sites fermés, facteur essentiel de l'enneigement, plusieurs éléments sont à noter. Une station fermée sur deux est à une altitude moyenne inférieure à 1300m et près de 80% sont à moins de 1500m d'altitude. Seulement quelques stations sont situées au-dessus de 1800m, ces dernières informations vont avoir une incidence sur l'enneigement de ces sites.

Le parallèle avec les stations ouvertes vient montrer l'écart dans la répartition altitudinale. Alors que les stations fermées sont centrées autour d'une valeur médiane de 1300 mètres d'altitude, cette dernière est égale à 1500m pour les stations encore actives. L'écart est donc significatif, en particulier lorsqu'on regarde où est située cette valeur sur les stations fermées. Alors que 4 stations sur 5 sont situées en dessous de 1500 mètres, la moitié des stations encore actives sont au-dessus.

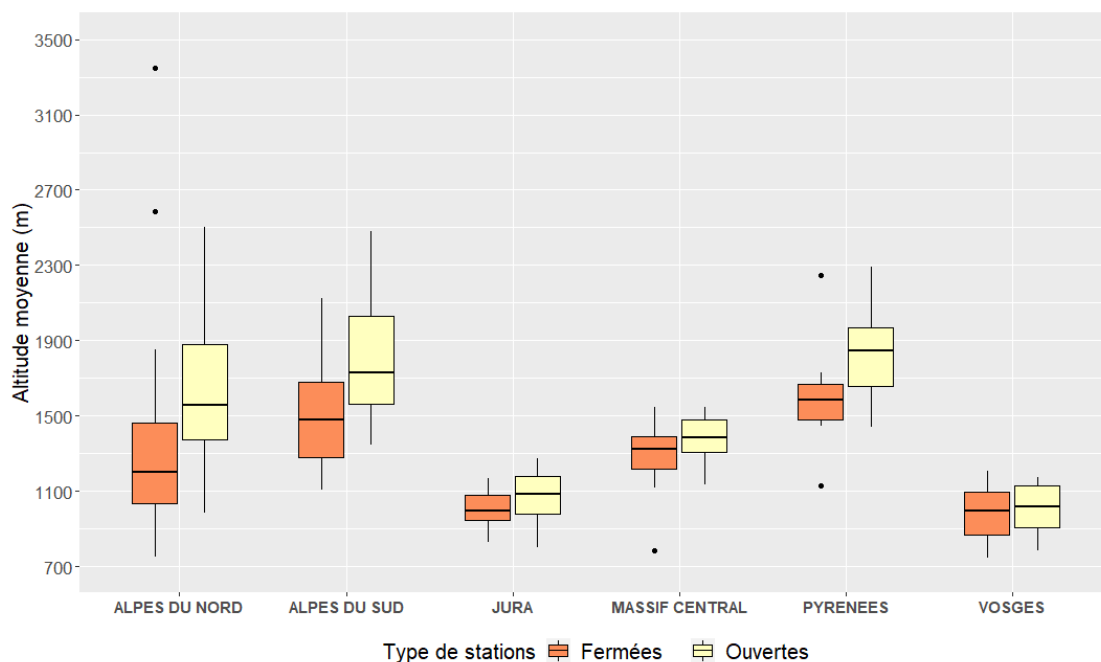


Figure 21: Distribution des stations selon les altitudes moyennes : analyse selon les différents massifs

Au niveau de l'analyse différenciée selon les massifs, on retrouve de très fortes similarités avec le Jura et les Vosges qui sont les deux massifs de moyenne montagne français. Les stations au sein de ces massifs n'excèdent pas les 1300m. Les Pyrénées concentrent les stations parmi les plus élevés autour de 1500m. Suite au premier parallèle avec les stations ouvertes, la dissociation selon les massifs nous permet de voir que les stations de ski fermées ne sont pas toutes inférieures en terme d'altitude. En effet, nous pouvons voir que pour les trois massifs du Jura, des Vosges et du Massif Central, les stations ouvertes et fermées sont plutôt situées à la même hauteur. L'écart le plus important se trouve être au sein des Pyrénées avec des stations actives bien plus hautes.

Enfin, nous pouvons observer sur cette analyse de dispersion 5 valeurs considérées comme aberrantes au sein des sites fermés. Aussi, au regard du reste de l'échantillon et du profil de la série statistique, le choix d'écarter, pour le reste de l'étude, les 3 valeurs extrêmes supérieures a été pris. Cela correspond aux deux stations alpines à plus de 2500m et une station Pyrénéenne au-dessus de 2200m. Leur enneigement peu représentatif des conditions du reste des individus de l'échantillon risquerait de rendre les analyses et leurs interprétations plus confuses.

5.2.3. Analyse des capacités de transport

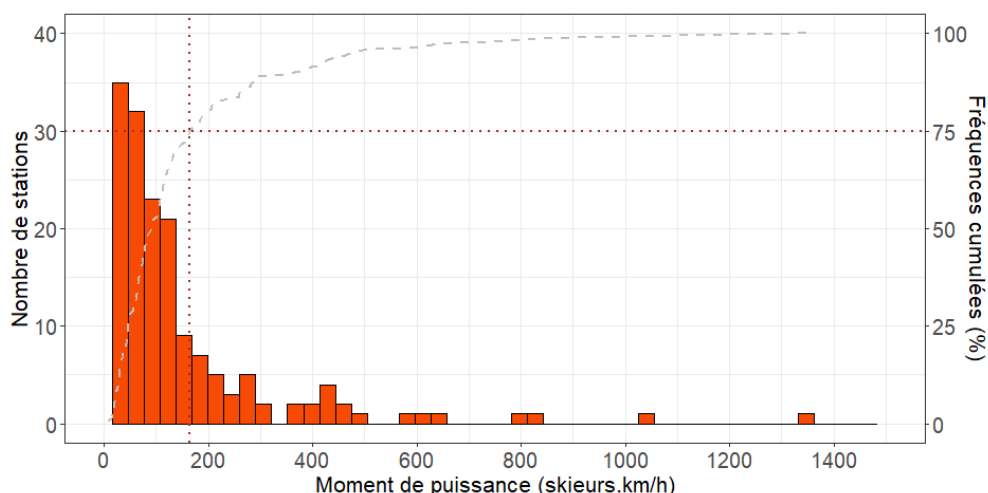


Figure 22: Répartition des stations de ski fermées selon la valeur totale du moment de puissance de leurs appareils

Une autre variable essentielle pour mieux visualiser le type de stations dont nous disposons est le moment de puissance. L'ensemble des stations possèdent des moments de puissance inférieurs à 1400 personnes.km/h. Par comparaison, la typologie des stations en fonction de la taille proposée par Domaines Skiabiles de France (DSF), en 4 classes (petite, moyenne, grande et très grande) s'appuie également sur le moment de puissance et la borne supérieure de la première classe prend la valeur de 2500 personnes.km/h. Nous ne sommes ici que face à des sites de petite, voire très petite taille dont, en outre, 8 stations sur 10 ont une capacité de transport inférieure à 200 personnes.km/h, et ce malgré l'exclusion de certains sites présents dans la BD STATIONFERMEE considérées comme anecdotiques.

Cette forte concentration de l'échantillon sur des valeurs très faibles nous permet d'avoir une idée plus précise du type de stations dont il est question. Nous pouvons tout de même analyser la distribution de cette variable « moment de puissance » en la comparant avec les stations encore ouvertes pour mieux contextualiser ce résultat.

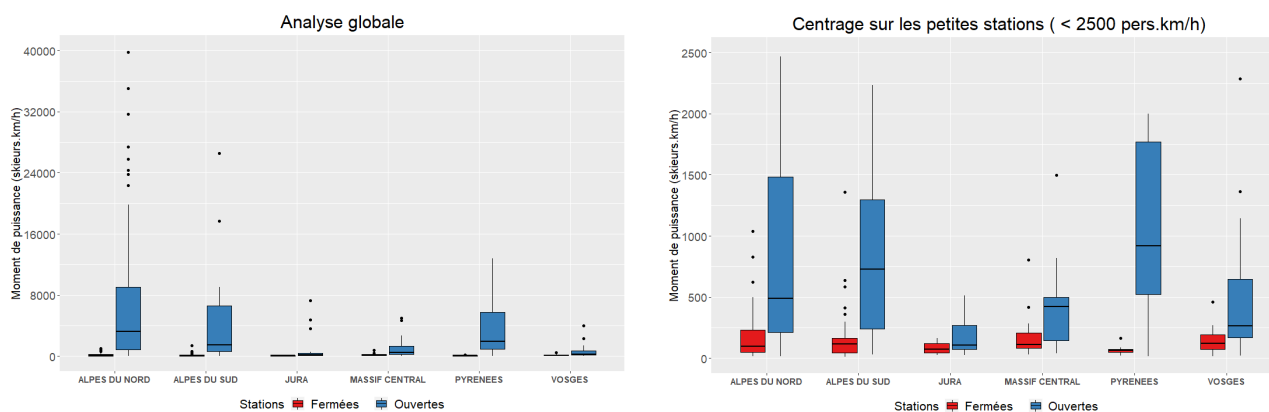


Figure 23: Comparaison des moments de puissance avec les stations ouvertes selon les massifs

Sur la figure ci-dessus, nous pouvons prendre conscience du rapport existant entre le moment de puissance des stations ouvertes et fermées. Outre les valeurs extrêmes des Alpes, synonymes de « méga stations », la première analyse ne permet pas de visualiser les anciens sites.

Un centrage sur les stations comprises entre 0 et 2500 personnes.km/h a donc été effectué selon la typologie utilisée par DSF. Les petites stations y sont définies comme ayant un moment de puissance « inférieur à 2500 personnes.km/h ».

La prise en compte des stations considérées comme petites vient compléter le constat précédent et l'écart en termes d'infrastructures de transport entre les deux groupes de stations étudiées.

5.2.4. Analyse des dates d'exploitations des stations fermées



Figure 24 : Répartition des stations selon leurs dates d'ouverture et de fermeture pour chaque massif

Au vu de la problématique initiale et sa composante historique, une analyse de la répartition des stations fermées selon leurs dates d'ouverture et de fermeture peut être effectuée afin de mieux situer leurs exploitations.

Globalement, on ne constate pas de différences notables en fonction des massifs. Un pic d'ouverture est toujours présent de 1960 à 1970 avec une intensité plus ou moins élevée. Une période qui n'est pas sans rappeler le plan neige (1964-1977), dont nous pourrions rediscuter par la suite.

Quant aux fermetures, les valeurs sont plus hétérogènes. Alors que certains massifs ont des années présentant de nombreuses fermetures (1990 pour le Massif Central), d'autres ont des fermetures étalées dans le temps, c'est le cas notamment du Jura et des Pyrénées. Nous retiendrons ici que les fermetures des stations débutent de manière générale à partir de 1990 jusqu'à la fin des années 2010.

L'analyse des durées d'exploitation de chaque site (disponible en annexe 6) a également pu montrer la longévité de ces stations. On ne retrouve que très peu de stations qui ont été exploitées moins de 10 ans. En règle générale ces anciens sites touristiques ont pu être actifs pendant de nombreuses décennies. Cela démontre ainsi que les anciennes stations de ski françaises n'ont pas fermé très rapidement après leur mise en service mais bien suite à plusieurs décennies de fonctionnement.

5.3. Analyse de la fiabilité des stations de ski fermées : approche statistique et premières discussions

Nous pouvons à présent étudier la variation interannuelle des indices de fiabilité sur la série temporelle disponible selon les simulations du modèle SAFRAN-Crocus et ce, en s'intéressant spécifiquement aux 6 massifs de l'étude. Compte tenu de la répartition altitudinale des stations au sein de chaque massif et de leur localisation relative, cette échelle a été retenue pour la présentation des résultats. Un indice spécifique a été calculé pour chacun de ces objets d'étude comme la moyenne des indices saisonniers de chaque station pondérée par leur moment de puissance.

Nous nous intéresserons tout d'abord à étudier ces indices selon le calcul d'une moyenne glissante sur une période qu'il conviendra de justifier. Il s'agira par la suite de caractériser de possibles périodes de rupture des indices selon une approche statistique. Dans un troisième temps, nous mettrons ces premiers résultats en perspective avec la fermeture des stations. Il s'agira enfin de s'intéresser aux conditions difficiles rencontrées par les stations afin de déceler de possibles trajectoires communes entre les massifs.

5.3.1. Visualisation de la variation des indices au travers d'un calcul glissant

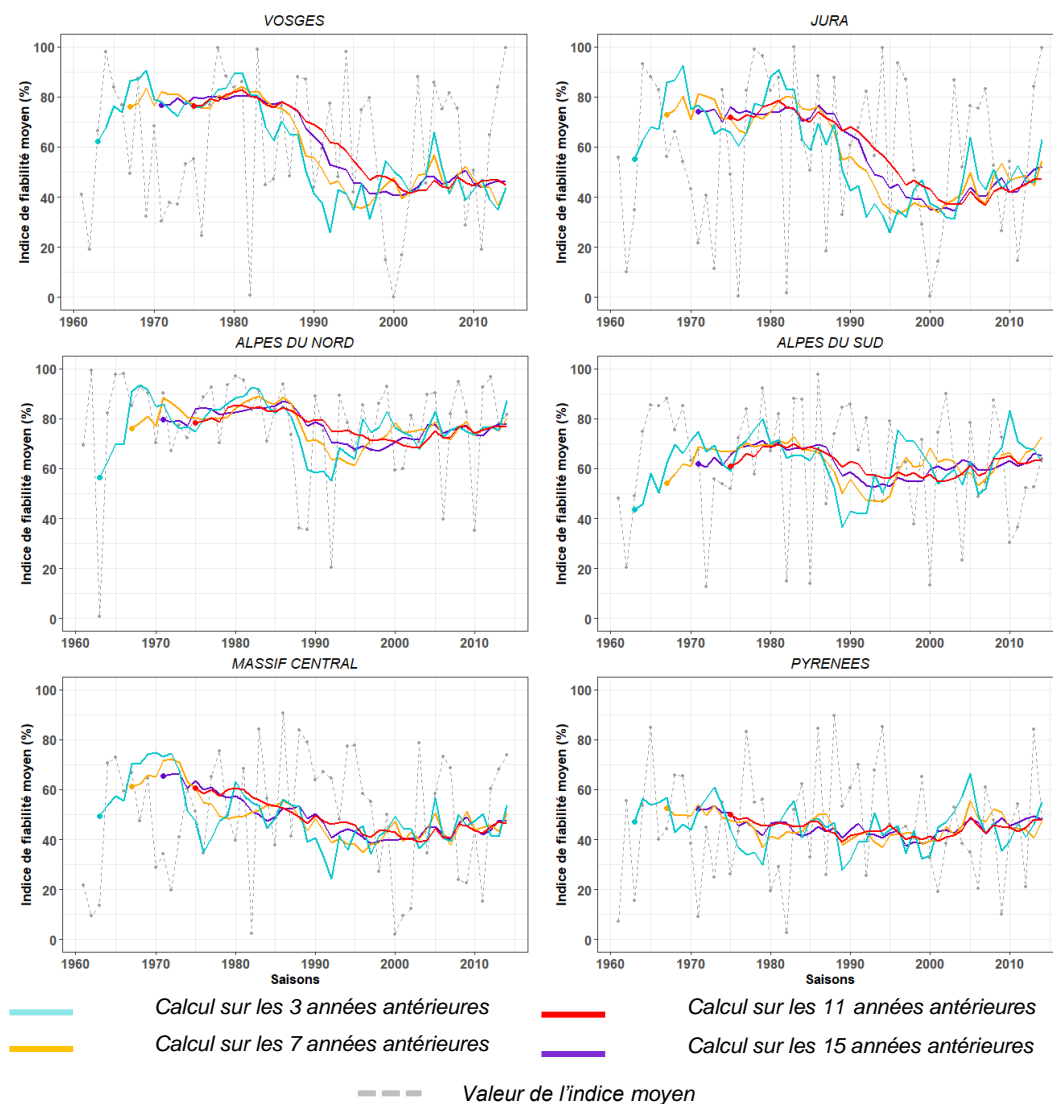


Figure 25: Calcul glissant de l'indice de fiabilité selon plusieurs périodes

Au vu de la forte variation interannuelle de l'enneigement et donc de l'indice moyen pour chaque massif (figure 25), l'identification de tendances s'appuie sur une fenêtre de temps glissante en ne prenant seulement en compte les années antérieures à l'année considérée. Nous estimons que seules les conditions passées peuvent amener à la cessation des activités. Le lissage de certaines valeurs peut permettre de déceler certaines périodes caractéristiques sur la fiabilité de l'enneigement de chaque massif. Le choix de la période pour le calcul glissant s'est effectué en deux temps. La première analyse de corrélation entre le nombre de stations fermées à l'année de référence correspondante et les différentes valeurs d'indice selon la taille de la fenêtre glissante (annexe 7) a pu montrer qu'aucune régularité ne se dégage quant aux conditions d'exploitation précédant la fermeture.

La figure 25 illustre l'approche qualitative retenue pour le choix de la fenêtre du calcul glissant selon le calcul de l'indice moyen sur 4 fenêtres temporelles séparées chacune de 4 ans.

Les moyennes glissantes de 11 et 15 ans ne débutent qu'assez tardivement dans la série temporelle (1971 et 1975), cela ne permet donc pas de comparer avec les sites ayant fermé avant la décennie 70. Le nombre conséquent d'années antérieures prises en compte dans le calcul vient aussi masquer certaines périodes intéressantes comme les indices moyens élevés du Massif Central avant 1975. Ensuite, le calcul de l'indice moyen sur une fenêtre glissante de 3 ans présente une variabilité qui reste importante sans que des tendances se dessinent de manière évidente. Cette fenêtre de 3 ans caractérise plutôt des courts épisodes, pics ou chocs au sein de la période.

Ainsi, nous nous attacherons à analyser les indices de fiabilité selon une moyenne glissante prenant en compte les 7 années antérieures à l'année considérée. Cette dernière période nous apparaît comme cohérente au vu de l'évolution des indices entre 1961 et 2014.

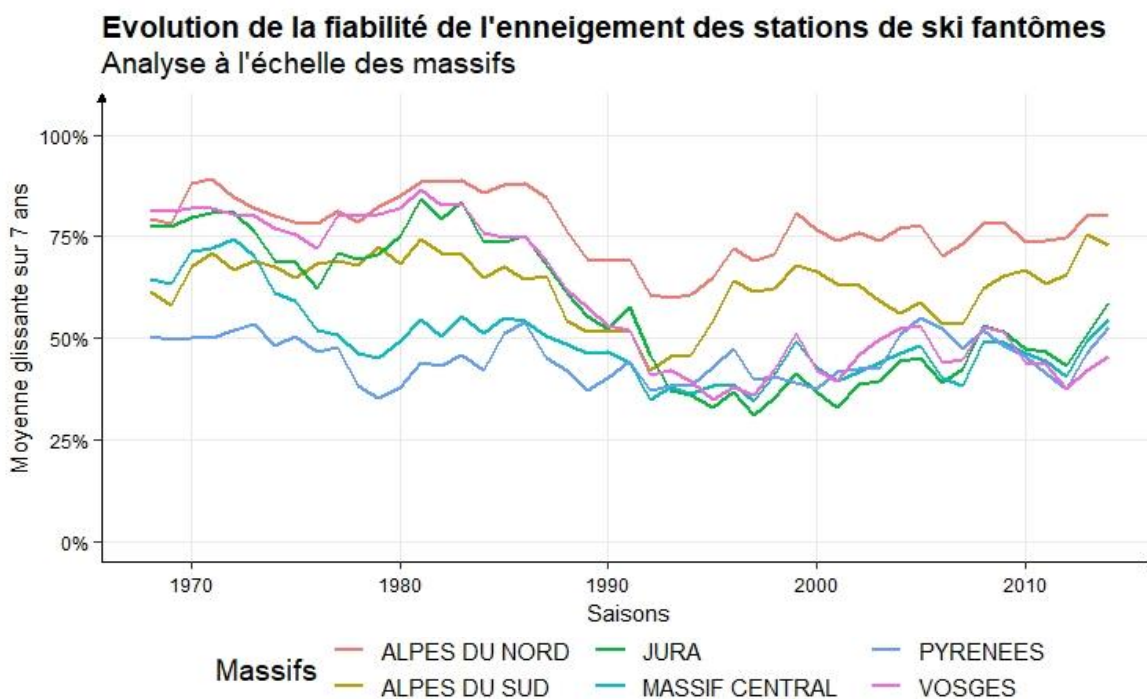


Figure 26: Evolution de la fiabilité des stations à l'échelle des massifs selon une moyenne glissante sur les 7 années antérieures à l'année considérée (1968-2014)

La figure 26 montre la forte dispersion des indices moyens entre les 6 massifs de l'étude. Si l'on retrouve les Alpes du Nord et du Sud avec des indices plus élevés entre 1990 et 2000, cela est bien plus contrasté sur les décennies présentes avec un indice équivalent pour les Vosges et le Jura, deux massifs de moyenne montagne qui ne sont pas très éloignés des Alpes. Sur la période 1968-1990, nous pouvons observer un gradient net entre les différents massifs partant des Pyrénées jusqu'aux Alpes du Nord.

Le cas des Pyrénées peut d'ailleurs surprendre puisqu'il fait partie des massifs avec les stations les plus élevées de notre échantillon (figure 21) et possède un indice moyen qui dépasse très rarement les 50%, soit la moitié du domaine skiable où l'enneigement est jugé comme non fiable sur les périodes de vacances scolaires.

Si l'on observe les courbes d'indice dans leur ensemble, nous constatons une période de rupture débutant dans les années 1980, notamment pour les Vosges et le Jura. Les indices de ces deux massifs chutent brutalement pour passer d'une fiabilité de 75-80% à moins de 50% après 1990.

Cette observation est moins nette pour d'autres massifs comme le Massif Central ou les Pyrénées. En revanche, ces deux massifs possèdent des caractéristiques communes dans la variation de leurs indices moyens. Les indices baissent à la fin des années 1970 pour passer en dessous des 50% de fiabilité. Ensuite, il est important de préciser que les indices moyens pour les 4 massifs non alpins (Vosges, Jura, Pyrénées, Massif Central) se confondent à partir de 1990 avec une remontée de la fiabilité des stations qui semblent se former sur la période 2000-2014.

L'observation de la forte baisse de l'indice pour les Vosges et le Jura et leur non-retour aux valeurs d'origine après la décennie 80 nous invite donc à réfléchir quant à la caractérisation statistique d'une période de rupture. Les massifs des Alpes du Sud Nord présentent une baisse très forte sur cette même période.

Dans ce sens, nous nous appuyons sur le test d'homogénéité de Pettitt (Pettitt, 1979). Il s'agit d'un test non paramétrique permettant de détecter s'il existe une rupture et un écart sur une série temporelle en comparant deux moyennes distinctes. Nous utiliserons ce test sur l'indice moyen de chaque massif mais également sur les valeurs glissantes exposées précédemment.

5.3.2. Caractérisation de périodes de rupture sur la fiabilité des stations de ski fermées (1961-2014) : utilisation du test de Pettitt

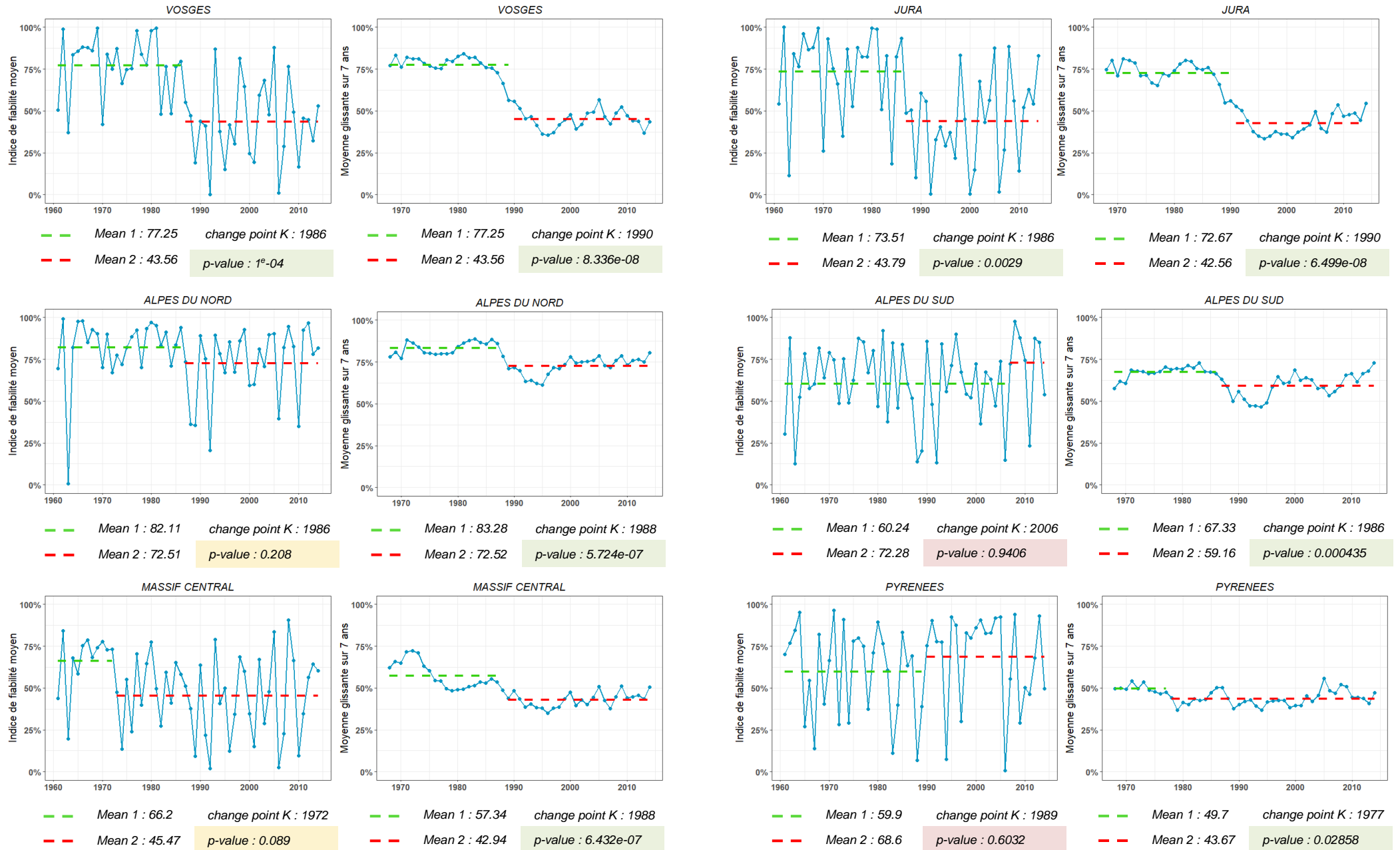


Figure 27: Test de Pettit appliqué aux stations de ski fermées françaises, comparaison selon l'indice moyen et la moyenne glissante

Comme pressenti sur l'observation de la figure 27, le test de Pettitt sur les indices moyens indique des périodes de rupture (*Point K*) communes pour le Jura, les Vosges ainsi que les Alpes du Nord avec l'année 1986. Ce point de changement est différent pour les 3 autres massifs étudiés avec des significativités (p-value) très hétérogènes.

En effet, le test de Pettitt s'avère significatif dans le cas d'une p-value inférieure à 0.05. Le cas des Alpes du Nord est donc à nuancer puisque celle-ci est égale à 0,21. Cependant, au vu du faible nombre d'entités statistiques étudiées (53 années), nous ne pouvons pas exclure trop rapidement certains résultats qui nous paraissent pertinents. Ainsi, le cas du Massif Central et des Alpes du Nord illustre tout de même des tendances sur la variation de la fiabilité de leurs stations. En revanche, les Alpes du Sud et les Pyrénées ont des p-value trop élevées pour analyser deux périodes distinctes.

Massif	Point K de changement estimé	p-value	Période	Indice moyen	Ecart-type (%)	Q20 (%)	Q50 (%)	Q80 (%)	Q80-Q20	% fermeture	Nombre de fermeture
Vosges	1986	1,00E-04	1961-1985	77,3	34,0	59,2	78,7	96,2	37,0	20,0	3
			1986-2014	43,3		20,5	38,0	72,3	51,8	80,0	12
Jura	1986	0,0029	1961-1985	73,5	29,7	53,7	84,8	95,4	41,6	17,6	3
			1986-2014	43,8		20,8	47,0	76,8	56,1	82,4	14
Massif Central	1972	0,0898	1961-1971	66,2	20,7	30,6	59,0	77,7	47,1	15,0	3
			1972-2014	45,5		15,6	43,2	67,3	51,7	85,0	17
Alpes du Nord	1986	0,2079	1961-1985	82,1	9,6	58,9	84,9	94,1	35,2	20,0	14
			1986-2014	72,5		41,8	66,5	87,2	45,4	80,0	46
Pyrénées	1989	0,6032	1961-2014	64,25	/	22,61	48,88	75,84	53,23	100	10
Alpes du Sud	2006	0,9406	1961-2014	66,51	/	25,53	52,53	82,29	56,76	100	28

Tableau 2: Synthèse du test de Pettitt, étude des quantiles selon les périodes considérées

A partir des points de changement estimés par le test, nous pouvons nous intéresser à la valeur des indices moyens et comparer les différents massifs (tableau 2). L'écart entre les indices moyens des deux périodes est égal à près de 30% pour le Jura et 34% pour les Vosges, soit une baisse de la fiabilité d'un tiers du domaine skiable. Alors que pour ces deux massifs de moyenne montagne, les indices de fiabilité se situaient à plus de 70% avant le milieu des années 80, on assiste à un changement des plus importants à partir de cette période.

Le calcul des quantiles vient confirmer cette rupture. Si l'on regarde la valeur du Q20, correspondant à l'année la plus difficile en terme d'enneigement sur les 5 dernières considérées, celui-ci est quasiment divisé par 3. Les conditions d'enneigement des anciennes stations ont donc radicalement changé.

L'écart entre le Q80 et le Q20 pour les deux périodes considérées illustre la différence entre les très bonnes conditions d'enneigement et les plus difficiles. Nous pouvons ainsi remarquer qu'à la dégradation de la fiabilité des stations vosgiennes et jurassiennes, s'ajoute une variation plus importante entre les bonnes années et les plus difficiles. La différence entre les écarts de chaque période est effectivement bien supérieure avec près de 15% pour ces deux massifs. Ainsi, les conditions baissent, mais nous pouvons voir que lorsqu'elles baissent, l'écart est plus important. Cela est également visible sur les courbes d'indice de la seconde période (figure 27)

Pour les Alpes du Nord, un changement semble se profiler à partir de l'année 1986 mais avec des écarts bien moins importants sur les deux périodes et une significativité du test qui appelle à la vigilance quant à ce résultat. Nous noterons tout de même qu'une chute des indices moyens est nettement visible sur les années 1985-1990. Suite à cela la variation de l'indice apparaît comme plus élevée avec un écart entre le Q80 et le Q20 diminuant de 10%.

Enfin, le test d'homogénéité ressort un point de changement estimé à l'année 1972 pour le Massif Central. L'écart-type est effectivement important avec 20% de différence entre les deux périodes. La valeur des quantiles sur la période 1972-2014 est également sujette à de nombreuses discussions tant les valeurs apparaissent comme faibles. Le Q20, égal à 15,6% témoigne bien de conditions d'enneigement extrêmement rudes et difficiles.

5.3.2.1. Analyse du test de Pettitt sur les moyennes glissantes

En parallèle de l'analyse des indices moyens, le test de Pettitt a également été réalisé sur les valeurs glissantes de la période 1968 à 2014. La variabilité des indices moyens pour chaque saison étant relativement importante, caractériser une période de rupture sur des valeurs glissantes peut alors confirmer ou nuancer le test précédent.

Comme nous pouvons le voir sur la figure 27, les moyennes glissantes calculées sur les 7 années antérieures à l'année considérée réduisent drastiquement la variation interannuelle de l'indice de fiabilité. De ce fait, les périodes de changement sont modifiées pour le Massif Central, les Alpes du Sud avec une estimation dans la décennie 1980-1990. Pour ce qui est des Alpes du Nord, Vosges et Jura, le test permet de confirmer l'écart visible autour des années 1895-1990, bien que les valeurs précises du point K soient différentes.

Il convient de nuancer la valeur des p-value pour le test sur les moyennes glissantes. Comme nous l'avons vu, ce calcul réduit fortement toutes les variations interannuelles pour exprimer une tendance sur le plus long terme. Ainsi, le test fait ressortir des périodes caractéristiques qui apparaissent comme plus significatives bien que les valeurs indiquées soient elles-mêmes lissées.

De ce constat, le test statistique réalisé ici sur deux séries statistiques (indice moyen annuel, moyenne glissante sur les 7 années antérieures) nous permet d'affirmer l'existence de périodes de rupture pour certains massifs. Les Vosges et le Jura sont les plus significatifs avec un basculement vers des conditions d'enneigement moins favorables estimées autour de l'année 1985.

Bien que cet écart soit moins visible pour le Massif Central et les Alpes (Nord et Sud) voir inexistant pour les Pyrénées, nous estimons que la période 1961-1985 est une période dite de référence pour la fiabilité des stations en comparaison à 1986-2014 qui exprime des indices moyens plus faibles pour de nombreux massifs.

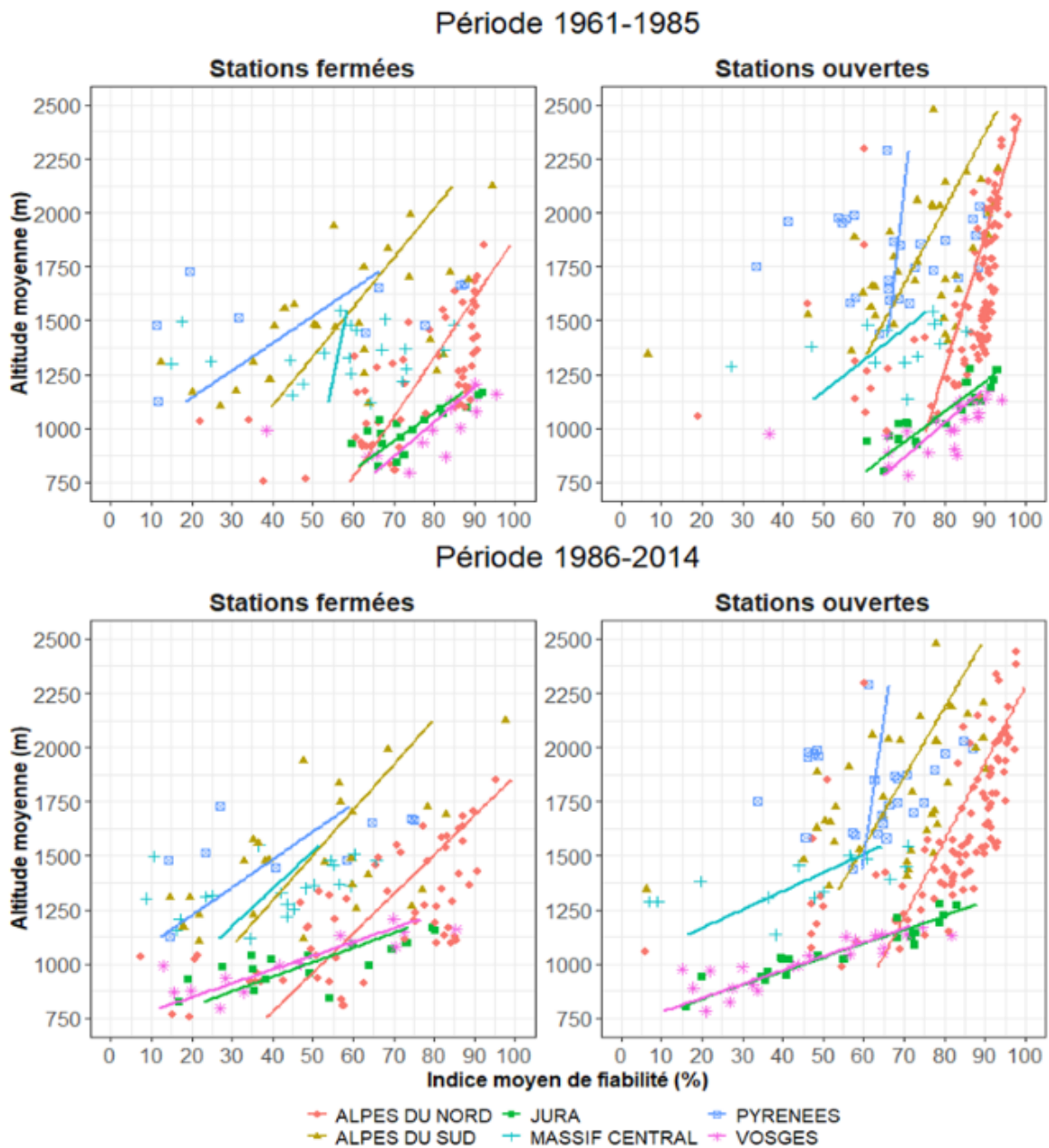


Figure 28 : Analyse de dispersion des indices moyens selon les périodes considérées et le type de station (ouvertes / fermées)

L'analyse de dispersion des indices moyens de chaque station sur les deux périodes confirme le profil similaire des stations Vosgiennes et Jurassiennes avec les Alpes du Nord sur la période 61-85. Suite à cette période, on distingue clairement ce basculement de la fiabilité des stations de moyenne montagne qui se retrouvent avec des valeurs d'indice bien plus faibles. La comparaison avec les stations ouvertes vient ici préciser notre propos, on constate un comportement similaire en tous points pour les stations vosgiennes et jurassiennes, qu'elles soient fermées ou encore ouvertes. Un résultat qui sera donc à discuter plus longuement par la suite (5.2).

Cette figure exprime aussi la différence entre les stations pyrénéennes et alpines du Nord aux mêmes altitudes mais qui semblent se confondre un peu plus avec les Alpes du Sud. L'indice moyen de ces deux massifs ne semble pas être fortement modifié sur les deux périodes concernées, comme nous avons pu le voir avec le test précédent (figure 27).

5.3.3. Fiabilité de l'enneigement et fermeture des stations

Suite à ces premiers résultats portant sur l'évolution de la fiabilité au fil des saisons et à la caractérisation d'une période de rupture de cette fiabilité, nous pouvons nous intéresser plus précisément aux dates de fermeture des stations pour chaque massif.

5.3.3.1. Comparaison de la fiabilité des stations avec leurs dates de fermeture

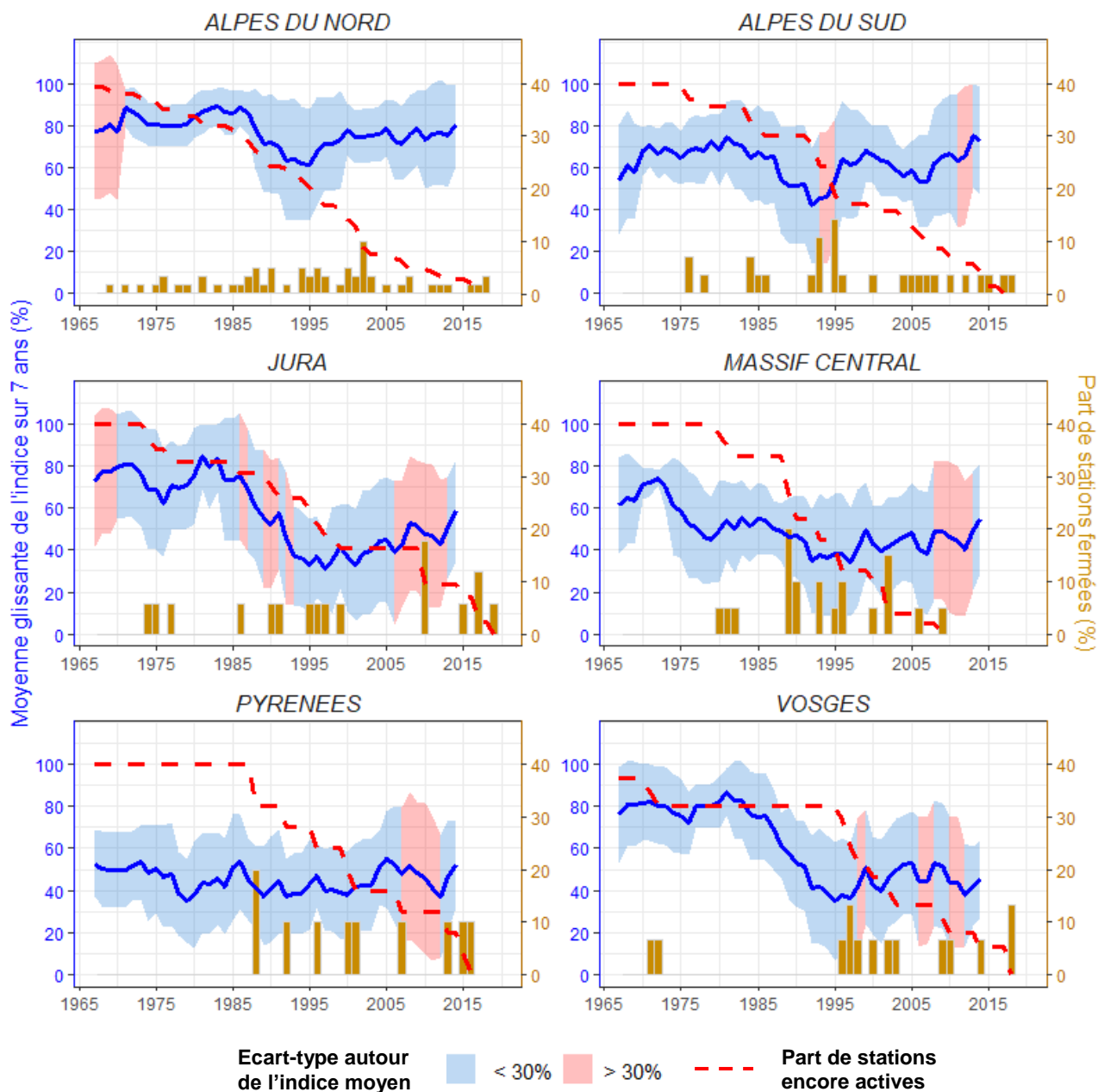


Figure 29 : Evolution du nombre de fermetures des anciennes stations françaises; comparaison avec la valeur glissante de l'indice moyen

La figure 29 nous permet de visualiser les fermetures de chaque station dans le contexte de la fiabilité moyenne pour chaque massif.

Dans un premier temps, nous pouvons observer un nombre de fermeture plus important pour les deux massifs alpins sans visualisation de périodes plus significatives que d'autres et ce même pour les années de baisse de l'enneigement entre 1980-1990.

Les Alpes du Sud présentent tout de même des parts de stations fermées assez conséquente en 1995 avec une baisse de 30% du nombre de stations actives dans cette période.

Pour ce qui est des deux massifs de moyenne montagne (Vosges et Jura), on constate certaines différences dans la répartition des fermetures des stations, bien que les deux massifs présentent un groupe de fermeture autour de l'année 1975. Les fermetures sont assez étalées sur plusieurs années dans le cas du Jura, à contrario des Vosges où celles-ci se concentrent après l'année 1995. En effet, le nombre de stations actives chutent de 40% en moins de 10 ans.

Si l'on remet ces fermetures dans le contexte de l'enneigement des massifs, on a des fermetures qui apparaissent dans la continuité de la dégradation des conditions au sein du massif jurassien. L'écart-type autour de l'indice moyen dépasse également les 30% pour certaines années nous indiquant une variation de l'indice.

Pour les Vosges, un maintien des activités de nombreuses années après la baisse de la fiabilité des stations en 1986 (figure 29) est nettement visible. Cela nous invite à discuter prochainement cet aspect sur les questions d'inertie des stations face aux conditions difficiles et également aux modes de gestion pouvant être différents selon ces deux massifs (6.2), et ainsi influencer sur la poursuite (ou non) des activités.

De nombreuses stations du Massif Central ont fermé leur porte dès 1990 où l'on comptabilise près d'une station sur trois ayant cessée son activité sur les années 1990-1991.

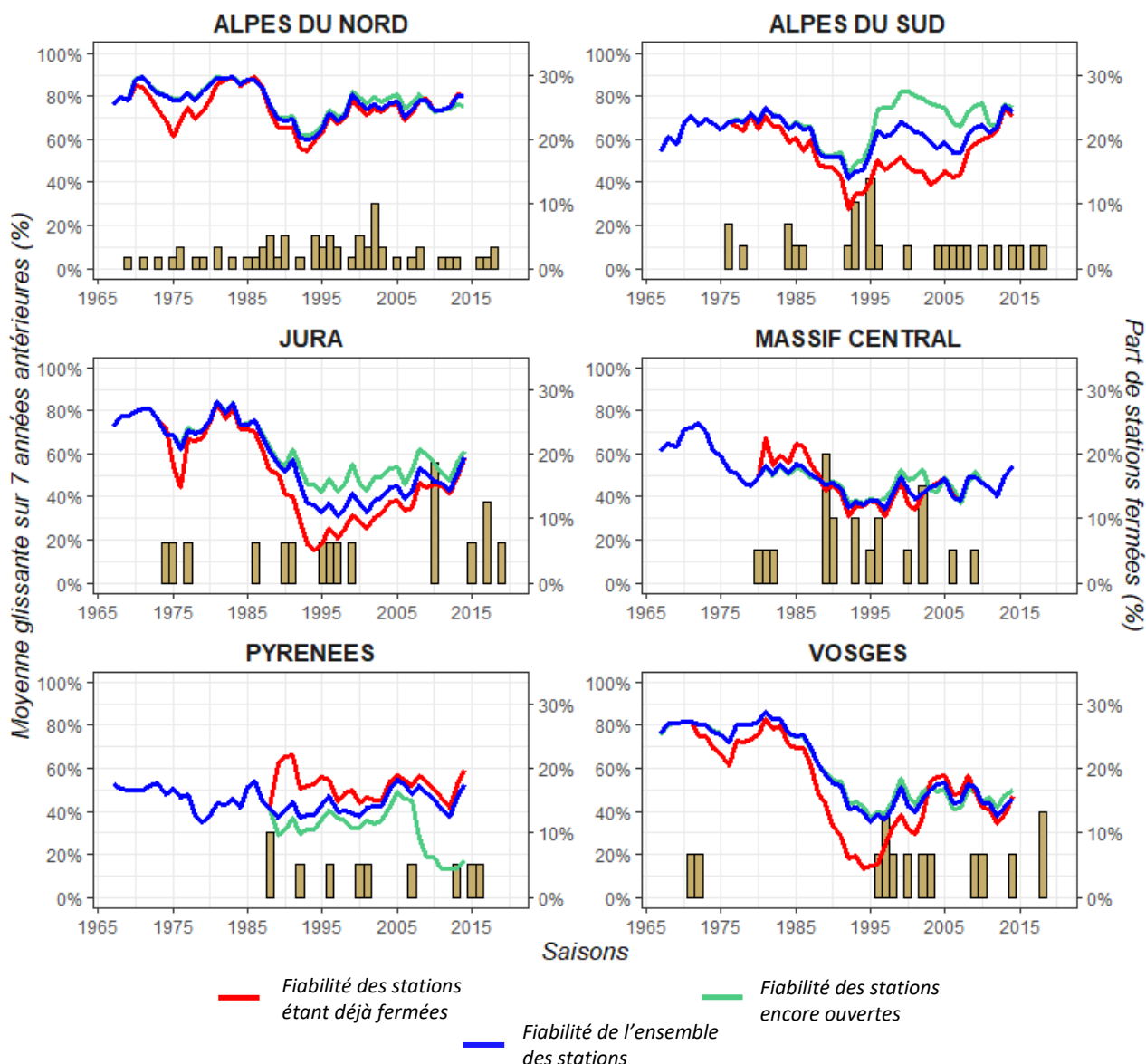
C'est également à cette période que l'on commence à avoir moins de 50% du domaine skiable jugé comme viable, l'indice moyen passant régulièrement sous les 50% à cette date-là. Cela fait d'ailleurs écho à nos premières observations lors du test de Pettitt où l'on pouvait distinguer, pour ce massif, deux périodes de baisses significatives avec d'abord une forte baisse en 1975 puis plusieurs années consécutives de baisse de l'indice moyen lors des années 90.

Le cas du massif Pyrénéen est assez difficile à interpréter et ce en raison du faible nombre de stations fermées dans l'échantillon initial. Il ne semble pas y'avoir de périodes de fermeture plus importante que d'autres.

Enfin, nous pouvons souligner que la variation de l'indice moyen semble augmenter à partir des années 2000, avec plusieurs années dont l'écart-type dépasse les 30%.

5.3.3.2. Analyse dynamique de la fiabilité des stations

Afin de décrire au mieux la fermeture des stations, une analyse dynamique de leur fiabilité a pu être effectuée. Pour chaque saison considérée, la moyenne glissante des indices stations est calculée pour l'ensemble des stations mais également selon deux groupes distincts. En effet, nous prenons en compte d'un côté les stations qui ont fermé leurs portes avant ou pendant l'année considérée et de l'autre les stations qui étaient encore actives à cette année. Le calcul est ainsi réitéré pour chaque saison en comptabilisant chaque nouvelle fermeture au fur et à mesure.



Pour l'ensemble des massifs exceptés les Pyrénées, les stations progressivement fermées ont rencontré des enneigements moins favorables que les stations encore ouvertes. Il est néanmoins important de souligner que pour le cas du massif et des Vosges et du Jura la fiabilité des stations fermées prend en compte un nombre très limité de stations (3 stations pour le Jura et 2 pour les Vosges). La fermeture massive des stations vosgiennes après 1995 montre cependant que l'enneigement des stations fermées est toujours inférieur que celui des stations encore ouvertes.

Ce constat est encore plus visible pour le Jura : au fur et à mesure des fermetures, la fiabilité des anciens sites suit celle des sites encore ouverts avec un écart parfois conséquent autour de 10% au début des années 2000.

Pour les Alpes du Sud, le nombre conséquent de stations (28) donnent plus d'importance à cette analyse dynamique. Pour ce massif en particulier nous pouvons souligner que depuis les premières stations fermées dans les années 1970, l'enneigement de ces sites a toujours été inférieur aux sites encore ouverts.

5.3.4. Caractérisation des conditions d'enneigement difficiles

L'analyse des conditions difficiles d'enneigement est notre dernier axe pour tester et vérifier si les stations de ski fermées ont réellement connu des saisons plus difficiles que leurs homologues.

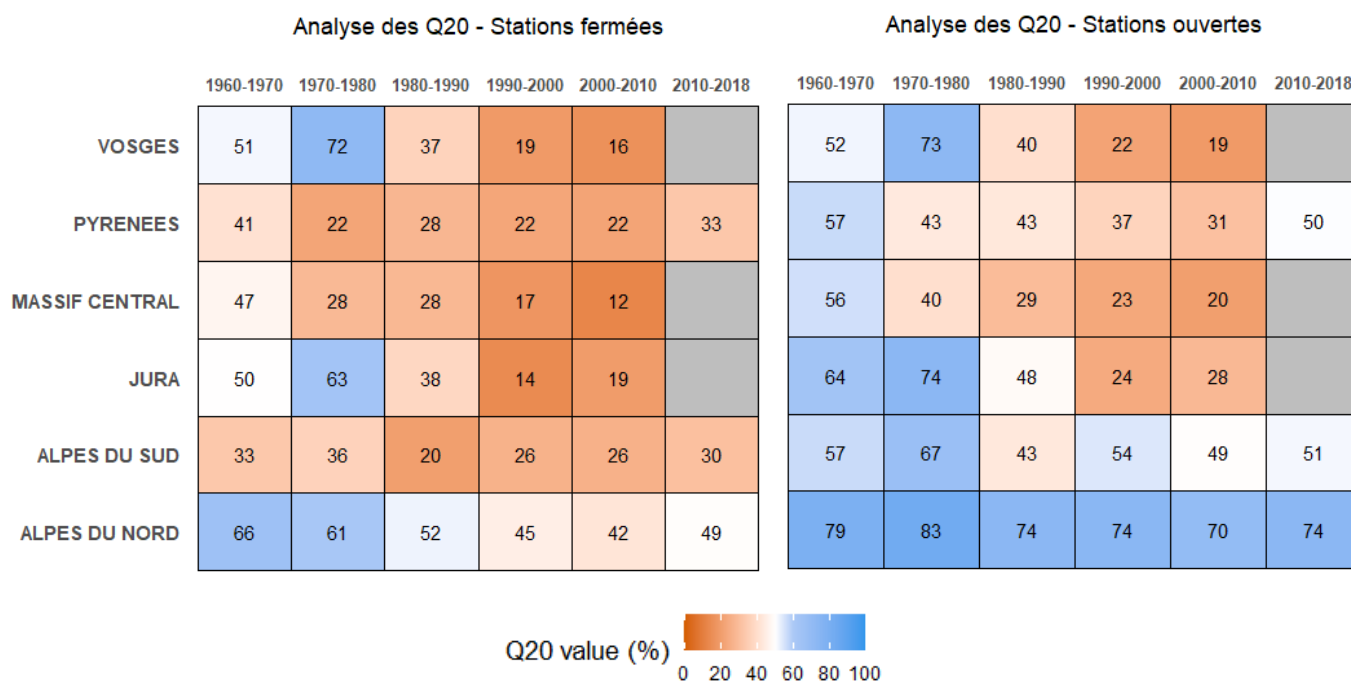


Figure 31: Analyse des conditions d'enneigement difficiles, comparaison des valeurs de Q20 entre les stations fermées et celles encore ouvertes

La figure 31 permet la comparaison des 20^{èmes} quantiles de l'indice de fiabilité de l'enneigement pour chaque décennie et chaque massif. Ce Q20 nous indique les conditions d'enneigement difficiles typiques d'une année sur 5.

Ainsi, on retrouve les écarts déjà observés lors du test de Pettitt sur les périodes 1961-1985 et 1986-2014 (tableau 2). Lorsqu'on regarde les Q20 des stations fermées du Jura et des Vosges on distingue deux groupes bien distincts séparés par la décennie 80-90 entre des valeurs supérieures à 50% avant et inférieures à 20% suite à cette décennie.

En revanche, ce constat est le même pour les stations encore ouvertes avec des valeurs de Q20 extrêmement faibles. Ainsi, ces deux groupes de stations ont connu des conditions d'enneigement similaires. Si les deux périodes ne sont pas visibles pour le Massif Central nous pouvons clairement voir une chute dans les années 60-70 du Q20 avec une baisse progressive de celui-ci jusqu'en 2010. Là encore, les stations ouvertes présentent le même profil avec des valeurs légèrement plus élevées.

Ces différentes observations rejoignent nos premiers résultats sur les altitudes similaires entre les stations fermées et ouvertes des massifs de moyenne montagne et interrogent donc sur le fait que certains sites soient encore actifs et d'autres fermés depuis déjà plusieurs années.

Des écarts bien plus conséquents entre stations fermées et ouvertes sont visibles pour les deux massifs alpins et plus particulièrement les Alpes du Nord avec des écarts sur le Q20 de près de 30% à partir des années 90. Ce massif compte effectivement de très nombreuses stations de haute altitude, parmi les plus fréquentées du territoire.

Enfin, ces résultats nous invitent à une dernière étude, sur la fréquence à laquelle les stations ont pu rencontrer des conditions difficiles par rapport à la période dite de référence (1961-1985) que nous avons pu établir précédemment.

Massif	Q20 référence (1961-1985)	Q20 (1986-2014)	Nombre d'années avec un indice moyen inférieur au Q20 référence Période : 1986-2014	Taux de retour
Vosges	59,2%	20,5%	21	75%
Jura	53,7%	20,8%	17	60,7%
Massif Central	30,6%	12,1 %	9	32,1%
Alpes du Nord	59,0%	42,7%	7	25%
Pyrénées	31,1%	19,9%	6	20,7%
Alpes du Sud	29,6%	22,3 %	5	17,9%

Tableau 3: Comparaison des conditions d'enneigement difficiles aux deux périodes identifiées dans l'étude

En s'appuyant sur la valeur du Q20 de la période 1961-1985, nous avons pu déterminer le nombre d'années où l'indice moyen était inférieur à cette valeur, synonyme d'hiver difficile. Ainsi, sur la période 1986-2014, on comptabilise 21 années avec un indice moyen inférieur au Q20 de référence pour les Vosges et 17 années pour le Jura. Nous avons donc pour les Vosges près de 3 années sur 4 où les conditions d'enneigement s'avèrent moins bonnes que les années les plus difficiles sur la période antérieure. Ce constat est similaire pour le Jura avec quasiment 61% de la période totale disposant d'une fiabilité moyenne inférieure au Q20 de référence.

Pour les 4 autres massifs, la comparaison avec la période de référence n'exprime pas autant cette dégradation de la fiabilité des stations. Néanmoins, le taux de retour du Q20 pour le Massif Central reste important avec un indice moyen inférieur sur près d'une année sur trois. Les valeurs de Q20 sont quant à elles toutes inférieures sur la période 1986-2014 sans exception.

Cet axe de recherche sur les 20^{èmes} quantiles et leur calcul sur plusieurs plages temporelles a donné lieu à une analyse à l'échelle de chaque station, notamment pour les massifs comprenant un nombre de stations assez faible (lisibilité de l'information). Les résultats sont visibles en annexe 8. Dans le cas du Massif Central, on peut visualiser un décalage entre la fermeture des sites et l'altitude moyenne des stations.

VI. Discussion

6.1. Quelles sont les stations de ski fermées françaises ?

L'analyse descriptive des stations fermées et leur comparaison avec les sites encore ouverts (5.2) met en évidence des caractéristiques propres à ces anciens sites touristiques. L'étude des données altitudinales vient préciser les disparités existantes selon les massifs et le statut des sites (ouvert/fermé). Avec une altitude médiane de 1200m pour les sites fermés dont très peu se situent à plus de 1700m, nous pouvons dès lors affirmer que les stations fermées sont très majoritairement des stations de moyenne montagne. À titre de comparaison, les stations sont plus hautes pour la plupart des massifs avec une altitude médiane supérieur au troisième quartile des stations fermées pour les Alpes ou encore les Pyrénées.

Le cas des Vosges, du Jura et du Massif Central est tout de même à nuancer avec des valeurs d'altitude assez similaires pour les deux groupes de stations. Nous pouvons ici supposer que l'implantation des stations tient compte des conditions climatiques dans les limites du gradient dont elles disposent. Les massifs de moyenne montagne ne permettent ainsi pas forcément un étalement altitudinal important contrairement aux 3 autres massifs où les stations qui ferment leurs portes sont, a priori, plus exposées au risque d'enneigement, du fait de leur plus faible altitude que celles qui poursuivent encore leur activité.

À ce constat d'un décalage des altitudes pour certains massifs, s'ajoute une répartition des moments de puissance sur des valeurs extrêmement faibles. Près de 8 stations sur 10 contenues dans cette étude possède une capacité de transport inférieure à 200 skieurs.km/h, soit plus de dix fois moins que le seuil fixé par DSF (Domaines Skiabiles de France) pour considérer une station comme petite.

Ces résultats apportent des premiers éléments de réponse à notre hypothèse H2 sur les facteurs structurels de ces anciennes stations de ski françaises. Au-delà du fait que les stations de ski fermées se trouvent à des altitudes relativement basses, leurs équipements semblent très limités au travers de cette étude des moments de puissance. Ce sont des stations comprenant seulement une ou deux remontées mécaniques dans la plupart des cas. Pourtant, l'aménagement potentiellement limité de ces micro-stations ne semblent pas influencer de manière directe sur leur fermeture lorsque l'on s'intéresse aux dates et durées d'exploitation.

Comme nous avons pu le voir, ces stations ont pu être ouvertes pendant plusieurs décennies pour la majeure partie d'entre elles. Cela invite donc à regarder avec précaution la question des événements ponctuels qui ont pu contribuer à la fermeture sans pour autant l'expliquer pleinement. Cet événement pouvant intervenir dans un contexte d'exploitation éprouvé pendant plusieurs saisons de sports d'hiver. Avec de telles durées d'exploitation, nous soulignons ici le fait que les sites étudiés ne sont pas des sites touristiques qui auraient été construits dans les années 1960-1970 et laissés à l'abandon rapidement après leur ouverture. Au contraire, ces installations ont duré dans le temps.

Cela est d'ailleurs un point qui ressort du travail d'archive et de collecte d'informations lors de la phase de digitalisation. De très nombreuses stations sont en réalité des petites installations familiales, pouvant fonctionner par intermittence selon la main d'œuvre disponible lors des saisons hivernales.

Nous pouvons reprendre l'expression de Delorme (2014) pour décrire la plupart de ces sites comme des « village stations », qui étaient autant destinés à divertir les habitants et dynamiser les communes proches, qu'à rechercher une rentabilité importante.

Cependant, nous devons rappeler ici que l'exploitation de telles stations, aussi petites soient-elles, nécessitent des coûts d'entretien très importants et des normes à respecter, de plus en plus strictes au fil des années. Ces anciennes stations nécessitent donc, à leur échelle, des retombées économiques importantes pour leur bon fonctionnement.

Ainsi, les premiers résultats de cette étude nous montrent que les facteurs structurels ne peuvent expliquer à eux seuls la fermeture des stations en raison de manque de moyen pour assurer une activité pérenne. Si les équipements de ces sites sont limités, leur longévité au fil des années nous invite à réfléchir sur les autres facteurs qui auraient pu avoir une incidence de manière plus fréquente sur le bon fonctionnement des stations.

En ce sens, nous pouvons maintenant nous intéresser à l'évolution de la fiabilité de l'enneigement de ces stations.

6.2. Evaluation de la fiabilité de l'enneigement des stations fermées françaises

6.2.1. Variation annuelle de la fiabilité des anciennes stations françaises

Les premiers résultats de l'analyse des indices moyens ont pu mettre en évidence la variabilité importante de la fiabilité de l'enneigement des stations fermées au fil des saisons et ce, pour l'ensemble des massifs.

Le calcul des moyennes glissantes (sur les 7 années antérieures) a alors permis de mieux visualiser les tendances sur plusieurs saisons mais également les écarts existants entre les massifs. Nous avons par exemple pu constater des écarts conséquents entre les massifs pyrénéens et du Massif Central et le reste des massifs sur les premières décennies disponibles (1960-1980). Ces deux massifs ne comptant pas parmi les plus bas de l'étude, nous pouvons rappeler qu'ils sont soumis à des influences météorologiques différentes des massifs de l'Est de la France.

On retrouve cette similarité entre les massifs de l'Est avec des indices de fiabilités à des niveaux très élevés seulement jusqu'à la décennie 80-90. Sur cette période, le calcul des moyennes glissantes nous permet de visualiser à la fois une dégradation des conditions d'enneigement pour les Alpes et un basculement pour le cas des Vosges et du Jura. Pour ces deux massifs de moyenne montagne on assiste effectivement à un changement total des conditions qui ne reviennent quasiment plus à leur niveau initial.

Ce décalage a ainsi pu être caractérisé au travers d'un test statistique significatif pour ces deux massifs entre deux périodes séparées par l'année 1985. L'étude comparée de la fiabilité des stations entre la période 1961-1985 et 1986-2014 (tableau 2) a permis de quantifier l'écart entre les deux périodes avec une moyenne de l'indice inférieur de 30% pour ces deux massifs. Cela représente près d'un tiers du domaine skiable dont l'enneigement était jusqu'alors considéré comme fiable qui ne l'est plus après les années 1990. De plus, il s'est révélé qu'à la forte baisse des conditions d'enneigement sur cette période, s'ajoute un écart plus important entre les bons et mauvais hivers. Nous avons donc, dans le cas des Vosges et du Jura, des stations confrontées à une plus forte variabilité interannuelle de l'enneigement.

L'analyse des conditions d'enneigement difficiles démontre bien la dégradation qu'ont connu ces sites touristiques de moyenne montagne. Alors que lors de leurs premières années d'exploitation la moitié du domaine skiable était tout de même doté d'un enneigement jugé fiable, cette proportion passe à seulement un cinquième du domaine après 1985.

Cette période fait d'ailleurs écho au changement de contexte de gestion des stations. À partir de cette date, la gestion des sites échoie directement aux collectivités dans le cadre de la Loi Montagne, elle-même inscrite dans le contexte plus général de la Décentralisation. Les collectivités sont ainsi chargées de gérer les stations au moment même où celles-ci commencent à faire face à de nombreux hivers très difficiles.

Pour le cas des autres massifs, un tel changement de conditions similaire aux Vosges et au Jura n'est pas observable, bien que certains résultats nous indiquent des baisses conséquentes de la fiabilité de l'enneigement des stations. C'est notamment le cas du Massif Central dont le résultat du test de Pettitt sur l'indice moyen a pu révéler un écart conséquent (20%) de l'indice moyen après l'année 1972. Les résultats pour les Alpes du Nord sont aussi sujets à discussion. Si la baisse de l'indice dans la décennie 80-90 ne semble pas se poursuivre les années suivantes, cela peut être dû aux altitudes bien plus élevées que celles des massifs des Vosges et du Jura. La dégradation des conditions est donc atténuée par des stations de hautes altitudes.

Cette étude ne démontre pas de périodes caractéristiques pour les Alpes du Sud et les Pyrénées mais souligne un comportement parfois similaire. Nous entendons par là que ce sont les deux massifs les plus élevés de l'échantillon et présentent pourtant une très forte variation interannuelle de l'indice de fiabilité. À cela, nous faisons l'hypothèse que les conditions météorologiques sont moins favorables pour les stations concernées, avec de fortes influences méditerranéennes. Cela se voit d'ailleurs si l'on regarde les altitudes des sites encore ouverts, avec des altitudes bien plus élevées que les stations fermées pour ces deux massifs.

Cette chute de l'indice de fiabilité observée lors de la décennie 1980-1990 apportent des premiers éléments de réponse à notre hypothèse de départ ([H1](#)) sur le possible durcissement des conditions. Cela est maintenant à mettre en relation avec la fermeture des stations.

6.2.2. Mise en relation avec la fermeture des stations

Ces premiers éléments peuvent maintenant être abordés en regardant le comportement des stations et notamment leurs dates de fermeture.

Le fort échantillon de stations pour les massifs alpins ne permet pas de déceler de périodes de rupture spécifiques.

En revanche, nous avons pu identifier un regroupement de fermetures dans le cas du Massif Central au début des années 1990. Cela représente donc un certain décalage avec la période de chute en 1972. Néanmoins, le Massif Central est le massif dont les stations ferment globalement le plus tôt et le plus rapidement avec l'ensemble des stations fermées dès 2010. C'est d'ailleurs le massif dont la baisse significative des indices arrive le plus tôt. Si aucun lien n'est fondé entre cette chute de l'indice dans les années 1970 et la fermeture des sites, l'étude de la variation de l'indice de ce massif à partir de 1990 pourrait s'avérer intéressante.

Ce décalage entre la période de rupture et la fermeture des sites est également visible pour le massif Vosgien. Suite à la baisse constatée dès les années 80, on ne comptabilise des fermetures qu'à partir de 1985, soit plus de 10 ans après.

Ce résultat nous amène à évoquer une certaine inertie des stations face à la dégradation constatée des conditions. Alors que l'indice moyen baisse brutalement les stations ont tout de même continué à être exploitées de nombreuses années dans des conditions difficiles, voire très difficiles.

Le cas du Jura diffère dans le sens où le nombre de fermetures est plus progressif dans la période de chute de l'indice. Bien que les conditions d'enneigement et la taille des stations soient similaires pour ces deux massifs, la différence dans leur comportement face aux conditions difficiles interroge sur leurs modes de gestion. Le maintien des activités du ski peut en effet être dû à des choix politiques locaux mais également aux types de structures gérant les installations. Dans ce sens, le massif vosgien diffère du Jura avec une part plus importante de stations gérées par des organismes privés. Certains exploitants pourraient avoir maintenu leurs activités et ce malgré des années difficiles dans l'espoir de retrouver des conditions similaires à la période 1961-1985. À ces questionnements, les résultats de l'étude ne peuvent apporter d'éléments de réponse claire.

La comparaison de la fiabilité de l'enneigement avec les stations encore ouvertes (présentes dans la BD Stations) met cependant en évidence la part importante des politiques locales dans le choix de maintenir ou non l'activité. Nous avons pu démontrer dans cette étude que les stations vosgiennes et jurassiennes encore actives ont connu des conditions d'enneigement identiques aux sites aujourd'hui fermés. De ce constat, plusieurs explications sont possibles.

Les sites encore ouverts auraient pu être privilégiés pour l'installation en systèmes de production de neige pour pouvoir poursuivre une activité pérenne. Une autre explication serait que les sites aujourd'hui fermés étaient alors moins bien desservis et moins bien équipés. L'analyse des moments de puissance (figure 23) met cela en exergue avec des stations qui restent tout de même plus importantes en termes de capacité de transport des skieurs. Ce constat est similaire pour le Massif Central et ainsi pour les 3 massifs de moyenne montagne.

Les stations ouvertes alpines et pyrénéennes disposent de conditions d'enneigement bien meilleures que les sites ayant fermé. Ce sont en effet des stations bien plus importantes, mieux équipées et situées à des altitudes élevées.

Ainsi, en réponse à notre première hypothèse de départ, les différents résultats de cette étude ont mis en évidence une dégradation des conditions d'enneigement dans le cas des stations de moyenne montagne des Vosges et du Jura dans le milieu des années 1980. Suite à cette période, la fiabilité de l'enneigement des stations n'est jamais revenue à son niveau initial au moment de l'ouverture des différents sites (1960-1970). Face à ce changement de conditions, l'activité des stations a pu être plus ou moins impactée selon les choix adoptés par les exploitants en priorisant certains sites plutôt que d'autres.

6.3. Limites et perspectives d'évolution

Cette étude sur les stations de ski fermées est limitée de par le faible nombre d'objets d'étude pour certains massifs. À cela s'ajoute les quelques stations écartées pour diverses raisons (taille minimale, trop ancienne, etc) lors du travail de digitalisation, mais également les stations dont les simulations du modèle SFRAN-Crocus n'étaient pas disponibles pour leur localisation.

Ainsi, certains résultats sont à prendre avec précaution, notamment les Pyrénées avec seulement 9 stations dans l'échantillon final. Pour les Vosges et Jura, disposant de près de 15 stations fermées, on peut estimer que l'échantillon est tout de même conséquent lorsqu'on compare avec les stations encore ouvertes.

Ensuite, les simulations d'enneigement du modèle SAFRAN-Crocus permettent une analyse assez restreinte pour les zones qui ne font pas partie des Alpes ou des Pyrénées. En effet, nous avons à disposition les années communes allant de 1961 à 2014 pour les 6 massifs étudiés. L'année 2014 empêche donc d'étudier correctement les conditions d'enneigement pour les stations ayant fermé après cette date. Il en est de même pour l'année 1961 qui apparaît comme déjà un peu tardive pour Le Massif Central dont l'indice moyen chute dès 1972. Le calcul de quantiles et autres indicateurs est donc de ce fait limité sur une courte période.

Suite aux résultats de cette étude, plusieurs axes nous semblent intéressants à développer pour des études futures.

Tout d'abord, bien que le travail de digitalisation et de recherche d'informations sur les stations ait pu être effectué pour de très nombreux sites, il est important de souligner l'absence de données pour certaines stations fermées. Un travail d'enquêtes sur certaines stations pourrait venir compléter ces résultats en recueillant directement des témoignages sur ces anciennes activités du ski, les causes de fermeture et la localisation exacte des appareils.

La fiabilité de l'enneigement étant l'objet d'étude principal de ce travail, nous pouvons dès lors évoquer comme perspective d'évolution l'étude des autres facteurs pouvant intervenir dans la fermeture des stations.

Par exemple, une analyse de proximité spatiale pourrait permettre d'étudier notamment les aspects concurrentiels entre stations. En effet, certaines stations pourraient avoir fermé leur porte suite à l'implantation d'un site proche, mieux équipé et plus accessible diminuant progressivement la rentabilité du site historiquement implanté. Dans le même type d'analyse, nous pouvons également aborder l'analyse spatiale prenant en compte la population totale autour d'un site, dans l'optique de caractériser l'isolement de certaines stations. Cela pourrait permettre de mieux comprendre la fermeture des stations pyrénéennes du fait de l'isolement, un facteur rencontré fréquemment lors du travail de recherches pour digitaliser les remontées mécaniques.

Enfin, ce travail pourrait être complété en intégrant les pratiques de gestion de la neige de culture. Cela permettrait de visualiser à quel point ces sites auraient pu (ou non) poursuivre une activité avec une fiabilité élevée en mesurant leur capacité de résilience lors des années difficiles.

VII. Conclusion

L'étude de la fiabilité passée de l'enneigement des stations de ski fermées françaises est, en tant que telle, une première. L'approche adoptée, à la fois qualitative (recherches sur chaque station), et quantitative (modélisation des conditions d'enneigement), vient compléter les travaux déjà réalisés sur ces anciens sites touristiques. Au croisement de nos hypothèses de départ, nous avons dans un premier temps décrit précisément quelles étaient ces stations de ski « fantômes », et dans un second temps évaluer la fiabilité de celles-ci à l'échelle des 6 massifs établis dans l'étude.

L'analyse descriptive des anciens sites touristiques, en comparaison directe avec les stations ouvertes, a pu montrer l'écart existant à la fois en termes d'altitudes mais aussi en termes de taille, d'importance, entre les deux objets d'étude. Sur ce dernier point, l'analyse des moments de puissance agrégés pour chaque station exprime clairement cet écart. Les stations de ski fermées sont pour la plupart de très petites installations à tel point que les termes de « remontées mécaniques isolées » ou « stades de neige » (Métral, 2021) seraient plus appropriés pour la majeure partie d'entre elles. À cela, nous pouvons souligner la longévité de la plupart des stations exploitées avec des durées d'exploitation de plusieurs décennies excluant l'idée que ces stations aient fermer rapidement après leur ouverture. Ces stations ont connu de nombreuses années d'activité.

Suite à cette caractérisation des stations de ski fermées, la fiabilité d'une part conséquente de l'échantillon global de stations fût calculée des années 1960 aux années 2010.

La variabilité importante des conditions d'enneigements selon chaque massif a pu être mise en évidence. Outre les Alpes du Nord, on constate des écarts conséquents entre chaque année et ce dès les premières simulations du modèle SAFRAN-Crocus (années 1960).

La rupture de la fiabilité de l'enneigement des Vosges et du Jura a pu être démontrée et quantifiée avec un point de changement au milieu des années 1980. Ces deux massifs de moyenne montagne ont subi des dégradations progressives au cours de cette décennie pour basculer sur une période 1990-2014 avec des conditions d'enneigement devenant critiques.

Ces stations de moyenne montagne, alors limitées de par leur petite taille et dont les activités sont essentiellement fondées sur la neige, ont dû faire face à un durcissement des conditions. Dans ce contexte de difficultés fréquentes liées à l'enneigement, nous constatons que la plupart de ces stations ont fermé dans les années 90-2000 avec des capacités de résilience variant selon les sites.

Ces résultats apportent donc de nombreux éléments de réponse à notre problématique initiale. Le cas de ces deux massifs de moyenne montagne démontre une nouvelle fois l'influence du changement climatique sur le fonctionnement des stations avec un basculement vers des conditions d'enneigement qui ne reviennent plus à leur niveau initial. Dans ce contexte, nous pouvons nous interroger sur la durabilité des stations ouvertes. Si des stations vosgiennes et jurassiennes sont encore actives, l'implantation de ces sites à de telles altitudes pourraient montrer certaines limites face à des hivers encore plus difficiles dans les prochaines décennies.

Le parallèle avec les stations ouvertes situées à des plus hautes altitudes est délicat, de par la différence nette en termes d'altitudes et d'équipements (production de neige), nous pouvons tout de même souligner que des périodes similaires de dégradation des conditions d'enneigement sont à prévoir dans les prochaines décennies.

Enfin, ce travail de recherche sur les stations fermées offre une meilleure visibilité sur le profil de l'ensemble des stations fermées françaises ainsi que sur leurs conditions d'enneigement passées. La digitalisation des anciennes remontées mécaniques fournit une information spatiale et attributaire fidèle au fonctionnement de ces anciens sites touristiques. Cela laisse la perspective d'études supplémentaires et notamment la prise en compte des pratiques de gestion de la neige de culture pour mesurer leurs impacts sur les hivers difficiles.

Bibliographie

Astrade L., Forget M., Gauchon C., Girault C., Meynet C., Trajectoires géographiques et paysagères de friches sportives en montagne, *Projets de paysage* [En ligne], 25 | 2021, mis en ligne le 31 décembre 2021, URL <http://journals.openedition.org/paysage/24515> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/paysage.24515>

Bachimon P., Bourdeau P., Corneloup J., Bessy O., « Du tourisme à l'après-tourisme, le tournant d'une station de moyenne montagne : St-Nizier-du-Moucherotte (Isère) », *Géocnfluences*, 2014.

Brun E., Martin E., Simon V., Gendre C. and Coléou C., An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *J. Glaciol.*, 35(121), 333-342, 1989.

Berard L., Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : la place de la production de neige. *Géographie*. Université Grenoble Alpes, 2021. Français. (NNT : 2021GRALH018). (tel-03555501)

Delorme F., « Du village-station à la station-village. Un siècle d'urbanisme en montagne », *In Situ* [En ligne], 24 | 2014, mis en ligne le 22 juillet 2014, consulté le 23 août 2022. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/11243> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/insitu.11243>

Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., M'érindol, L., Lesaffre, B., 2009. Reanalysis of 44 yr of climate in the french alps (1958–2002) : Methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *J. Appl. Meteor. Climat.* 48, 429–449. doi :10.1175/2008JAMC1808.1.

François H., De la station ressource pour le territoire au territoire pour la station. Le cas des stations de moyenne montagne périurbaines de Grenoble. *Géographie*. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français. (tel-00185781)

François H., George-Marcelpoil E., Fablet G., Bray F., Achin C., Torre A., Barre J-B., Atlas des stations du massif des Alpes, 2012

François H., Bray F., Barré J-B, Fablet G., George-Marcelpoil E.. Constitution d'une base de données sur les stations de sports d'hiver: construction d'une information spatiale de référence. SAGEO, Nov 2014, Grenoble, France. pp.1, 2014. (hal-02606095)

François H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil, E., « Croisement des simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver », 2016.

Gauchon C., *Tourisme et patrimoines : un creuset pour les territoires ?*. *Géographie*. Université de Savoie, 2010. (tel-00559370)

George-Marcelpoil E., Achin C., François H., Spandre P., Morin S., Verfaillie D., « Changement climatique et stations de montagne alpines : impacts et stratégies d'adaptation », *Sciences Eaux & Territoires*, INRAE, 2019.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. URL : <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/>.

Kleindienst, H., 2000. Snow hydrological models as tools for snow cover assessment and water resources management. Ph.D. Thesis, University of Bern, Switzerland.

Metral P-A., « Les trajectoires de reconversion post-touristiques des stations de ski fermées françaises », *Géocarrefour*, 95/2 | 2021.

Moscovici, D., « Ski Resort Closures and Opportunities for Sustainability in North America », *Land* 2022, 11, 494. <https://doi.org/10.3390/land11040494>

Pascal, R, Problèmes structurels des stations de moyenne montagne, Paris, Ministère de l'équipement, des transports et du tourisme, 1993.

Pettitt, A. N., "A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem." *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)* 28, no. 2 (1979): 126–35. <https://doi.org/10.2307/2346729>.

Scott, D., 2003, Climate change and tourism in the mountain regions of North America, 1st International Conference on Climate Change and Tourism, Djerba.

Spandre P., Observation et modélisation des interactions entre conditions d'enneigement et activité des stations de sports d'hiver dans les Alpes françaises. *Sciences de la Terre*. Université Grenoble Alpes, 2016. Français. (NNT : 2016GREAU034). (tel-01563278)

Spandre P., François H., Morin S., George-Marcelpoil E., « Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises », *Revue de géographie alpine*, 103-2 | 2015. URL: <http://rga.revues.org/2840>; DOI: 10.4000/rga.2840.

Steiger R. Scott D., Abegg B., Pons M. & Aall C., A critical review of climate change risk for ski tourism, *Current Issues in Tourism*, 2017, DOI:10.1080/13683500.2017.1410110

Steiger R., The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria, 2010, *Climate research*, n° 43, p. 251-262.

Vanat L., International Report on Snow & Mountain Tourism, 2021, Laurent Vanat consulting. <https://www.vanat.ch/RM-world-report-2021.pdf>

Vionnet V., Brun E., Morin S., Boone B., Martin E., Faroux S., Le Moigne P., « Le modèle de manteau neigeux Crocus et ses applications », *La Météorologie*, n°76, Février 2012.

Vlès V., Hatt E., Des stations de ski et d'alpinisme confrontées aux enjeux de la transition : changement énergétique et écologique, évolution touristique, requalification urbaine. Le tourisme hivernal – clé de succès et de développement pour les collectivités de montagne ? *L'Harmattan*, pp.177-198, 2019, Collection GRALE, 978-2-343-18700-6. (hal-02090875)

Table des figures

Figure 1: Diagramme de Gantt sur le déroulement du stage	2
Figure 2: Comparaison du nombre de stations de ski françaises actives et fermées par décennie depuis les années 1930	4
Figure 3: Extrait de Astrade et al (2021) ; Illustration des différents indices de l'ancienne station du Col de l'Arzelier	5
Figure 4: Fonctionnement du modèle SkiSim, figure extraite de Scott et al (2003)	8
Figure 5: Figure extraite de Vionnet et al (2012), description des différentes propriétés de la neige prises en compte par le modèle Crocus.....	9
Figure 6: Répartition des stations de ski définitivement fermées au sein du territoire métropolitain ;	12
Figure 7: Analyse descriptive des stations de ski fermées françaises ; Source : BD « STATIONFERMEE » (Métral P-A., recensement 2020)	13
Figure 8: Comparaison des bases de données lors du repérage des remontées mécaniques fermées récemment : OSM (1), Scan 25 (2), BD TOPO (3), station de Granier-sur-Aime (Savoie).....	16
Figure 9: Localisation du tracé des remontées mécaniques sur le site "stations fantômes" et le forum "remontées mécaniques.net" pour les stations de St Andéol et Alex	17
Figure 10: Illustrations des indices visibles permettant la digitalisation des remontées mécaniques ; Anciennes stations de St Andéol et de la Ruchère ; Photographies aériennes 2000-2005.....	18
Figure 11: Modèle conceptuel des données utilisées lors de la digitalisation et recherche du moment de puissance.....	19
Figure 12: Exemple de requêtes utilisées pour retrouver les anciens appareils dans le Catalogue Informatisé des Remontées mécaniques Nationales (CAIRN)	20
Figure 13: Adaptation de la méthode Crosscut, schéma produit à partir de François et al. (2016).....	21
Figure 14: Requête utilisée pour stocker les points d'arrivée et départ des remontées mécaniques.....	22
Figure 15: Illustration du principe de l'enveloppe gravitaire appliqué aux anciennes remontées de la station de Brizon (Haute-Savoie)	23
Figure 16: Diagramme de flux de la préparation et précision du bâti pour le calcul des enveloppes de neige de culture	24
Figure 17: Bilan de la digitalisation au sein des massifs	27
Figure 18: Caractérisation des stations ayant le moins de remontées présentes dans le CAIRN.....	28
Figure 19: Comparaison des effectifs entre les stations ouvertes et fermées	29
Figure 20: Répartition des stations ouvertes et fermées selon leurs altitudes moyennes	29
Figure 21: Distribution des stations selon les altitudes moyennes : analyse selon les différents massifs.....	30
Figure 22: Répartition des stations de ski fermées selon la valeur totale du moment de puissance de leurs appareils	31
Figure 23: Comparaison des moments de puissance avec les stations ouvertes selon les massifs.....	31
Figure 24 : Répartition des stations selon leurs dates d'ouverture et de fermeture pour chaque massif	32
Figure 25: Calcul glissant de l'indice de fiabilité selon plusieurs périodes	33
Figure 26: Evolution de la fiabilité des stations à l'échelle des massifs selon une moyenne glissante sur les 7 années antérieures à l'année considérée (1968-2014).....	34
Figure 27: Test de Pettit appliqué aux stations de ski fermées françaises, comparaison selon l'indice moyen et la moyenne glissante	36
Figure 28 : Analyse de dispersion des indices moyens selon les périodes considérées et le type de station (ouvertes / fermées).....	39
Figure 29 : Evolution du nombre de fermetures des anciennes stations françaises; comparaison avec la valeur glissante de l'indice moyen	40
Figure 30: Analyse dynamique des stations selon leur statut (ouvert/fermé) à chaque saison considérée ...	42
Figure 31: Analyse des conditions d'enneigement difficiles, comparaison des valeurs de Q20 entre les stations fermées et celles encore ouvertes	43
Tableau 1: Synthèse des données digitalisées	27
Tableau 2: Synthèse du test de Pettitt, étude des quantiles selon les périodes considérées	37
Tableau 3: Comparaison des conditions d'enneigement difficiles aux deux périodes identifiées dans l'étude	44
Équation 1: Relation entre le moment de puissance, le débit théorique en montée et le dénivelé d'une remontée mécanique	19

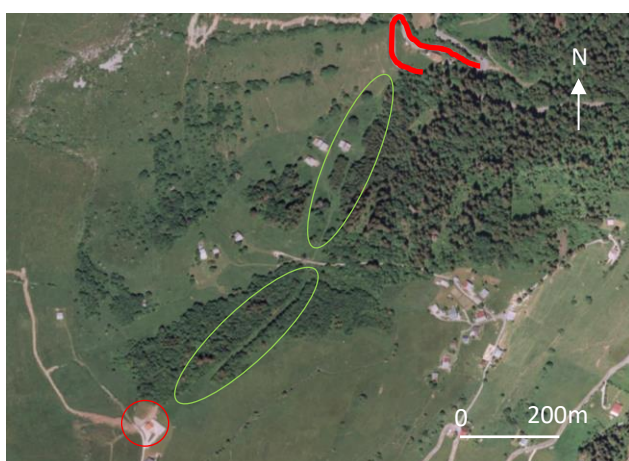
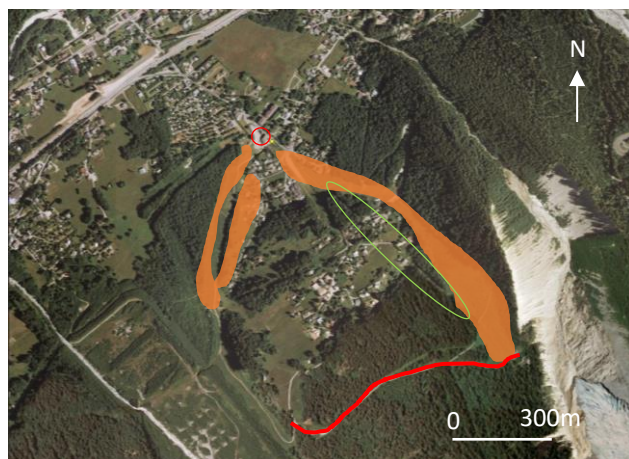
Annexes

Listes des annexes

Annexe I : Exemples complémentaires sur la digitalisation des remontées mécaniques...	56
Annexe II : Requête SQL permettant d'estimer le moment de puissance des appareils avec les données du CAIRN.....	57
Annexe III : Requête SQL permettant de dissocier les points d'arrivée et de départ des remontées mécaniques avec leurs altitudes respectives.....	58
Annexe IV : Fonction PLPG permettant l'héritage des tables de bâti départementales sur une table mère.....	59
Annexe V : Reclassement du MNT selon les valeurs d'entrée de la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus.....	60
Annexe VI : Analyse des durées d'exploitation des stations de ski fermées.....	61
Annexe VII : Corrélation entre les indices calculés selon différentes périodes glissantes et la part de stations fermées.....	62
Annexe VIII : Analyse des Q20 pour les massifs non alpins.....	63

Annexe I

Illustrations complémentaires sur les indices visibles lors de la digitalisation des remontées mécaniques



Tracé de l'appareil

Trouée forestière

Axe routier principal ou secondaire

Bâtiments isolés (possible gares de départ/arrivée)

Ancienne piste de ski potentielle

Photographies aériennes 2000-2005, Services WMS IGN

Annexe II

Requête SQL permettant d'estimer le moment de puissance des appareils non présents dans le CAIRN

```
CREATE TABLE staclosed.approche_mp AS (
WITH tab1 AS (
    SELECT
        id_rm, id_sta, moment_puissance, type_app, longueur, denivele_mnt,
        fermeture AS annee_fermeture,
        ouverture AS annee_ouverture, nbre_rms

    FROM staclosed.rm_alti_points

-- jointure avec la BD stations pour récupérer des informations supplémentaires
(ouverture, fermeture, nb de rms)
    JOIN staclosed.bd_stats_fermees
    ON bd_stats_fermees.code_station = rm_alti_points.id_sta
)

SELECT id_rm,
    round(avg(debit_theorique_montee)) AS debit_moyen,
    tab1.denivele_mnt,
    round(avg(debit_theorique_montee) * (denivele_mnt::numeric/1000),2) AS
moment_puissance
FROM tab1

-- jointure sur le type d'appareil correspondant
JOIN stations.firm_appareils_original
ON tab1.type_app = firm_appareils_original.code_categorie_appareil

WHERE
    tab1.moment_puissance IS NULL -- sélection des rms sans moment de puissance,
    AND debit_theorique_montee > 1 -- éviter les valeurs nulles
    AND annee_construction BETWEEN (annee_ouverture - 5) AND (annee_ouverture + 5)

GROUP BY id_rm, denivele_mnt
ORDER BY id_rm
```

Annexe III

Requête SQL permettant de d'obtenir les points d'arrivée et de départ des remontées mécaniques avec leurs altitudes respectives

```
CREATE TABLE staclosed.rm_alti_points AS (  
  
-- Récupération des valeurs d'altitudes de départ et d'arrivée de chaque linéaire  
WITH tab1 AS (  
SELECT id_rm,  
       MIN(altitude) AS min_alti,  
       MAX(altitude) AS max_alti  
FROM staclosed.alti_points  
GROUP BY id_rm),  
  
-- Récupération de la géométrie et de l'altitude des points de départ  
tab2 AS (  
SELECT  
    tab1.id_rm,  
    min_alti,  
    geom AS geom_min  
FROM tab1, staclosed.alti_points  
WHERE tab1.id_rm = alti_points.id_rm AND tab1.min_alti = alti_points.altitude),  
  
-- Récupération de la géométrie et de l'altitude des points de départ  
tab3 AS (  
SELECT  
    tab1.id_rm,  
    max_alti,  
    geom AS geom_max  
FROM tab1, staclosed.alti_points  
WHERE tab1.id_rm = alti_points.id_rm AND tab1.max_alti = alti_points.altitude)  
  
    SELECT  
        tab3.id_rm, min_alti,max_alti,  
        geom_min,geom_max  
    FROM tab3  
    JOIN tab2 ON tab3.id_rm = tab2.id_rm  
  
ORDER BY id_rm);  
  
-- Ajout d'une contrainte de clé primaire sur l'id_rm  
ALTER TABLE staclosed.rm_alti_points  
    ADD CONSTRAINT Pk_rm_alti_points PRIMARY KEY (id_rm);  
  
--Ajout de nouveaux champs dans la table  
ALTER TABLE staclosed.rm_alti_points  
    ADD type_app varchar(10),  
    ADD moment_puissance double precision,  
  
-- Mise à jour du type d'appareil sur la table_rm_copie  
UPDATE staclosed.rm_alti_points  
SET type_app = rm_final.type_appareil  
FROM staclosed.rm_final  
WHERE rm_alti_points.id_rm = rm_final.id_rm;  
  
-- Mise à jour du moment de puissance  
UPDATE staclosed.rm_alti_points  
SET moment_puissance = ROUND(rm_final.moment_puissance)  
FROM staclosed.rm_final  
WHERE rm_final.id_rm = rm_alti_points.id_rm;
```

Annexe IV

Fonction PLPG permettant l'héritage des tables de bâti départementales sur une table mère

```
DECLARE
i varchar;
query text;
tab_loop varchar[];
tab_dep varchar;

BEGIN

query:='
WITH a as(
  SELECT table_name FROM information_schema.tables
  WHERE table_name ILIKE 'geo_bati_indifferencie_%' and table_schema = 'public')
SELECT array_agg(substring(table_name,24,2))::varchar
FROM a';
EXECUTE QUERY INTO tab_loop;

FOREACH tab_dep IN ARRAY tab_loop

  LOOP

query:='
ALTER TABLE public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'
ALTER COLUMN gid TYPE varchar;

ALTER TABLE public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'
ADD CONSTRAINT chk_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_gid CHECK (gid LIKE
'''||tab_dep||'%');
ADD CONSTRAINT chk_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_srid CHECK (st_srid(geom) =
2154);

ALTER TABLE public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' inherit
public.geo_bati_indifferencie;

CREATE INDEX idx_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_gid ON
public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' (gid);

CREATE INDEX idx_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_id ON
public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' (id);

CREATE INDEX idx_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_zmin ON
public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' (z_min);

CREATE INDEX idx_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_zmax ON
public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' (z_max);

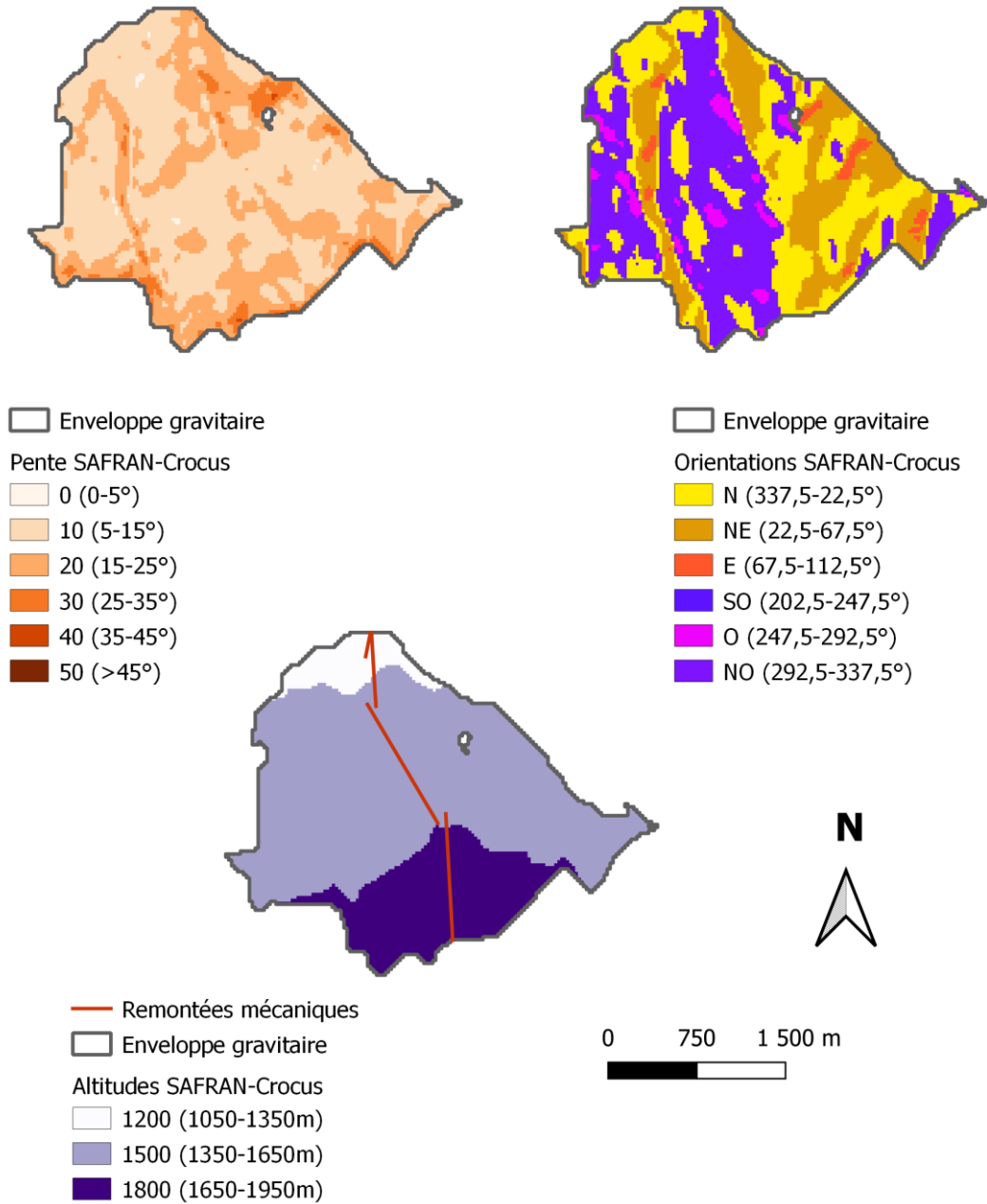
CREATE INDEX idx_geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||'_geom on
public.geo_bati_indifferencie_'||tab_dep||' USING gist (geom);

';
EXECUTE query;
END LOOP;

RETURN 'OK';
```

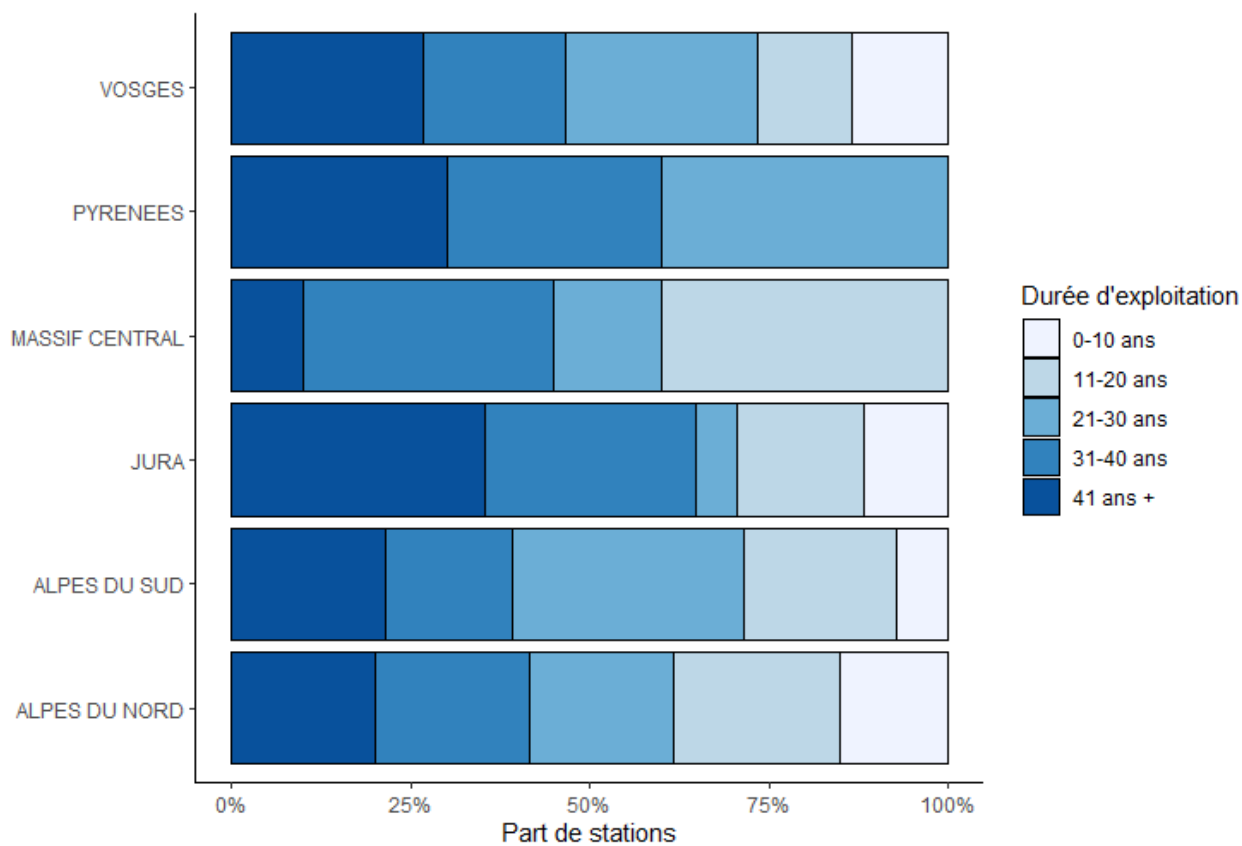
Annexe V

Reclassement du MNT selon les valeurs d'entrée de la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus, ancienne station de Jausiers (id n°561, Alpes-de-Haute-Provence)



Annexe VI

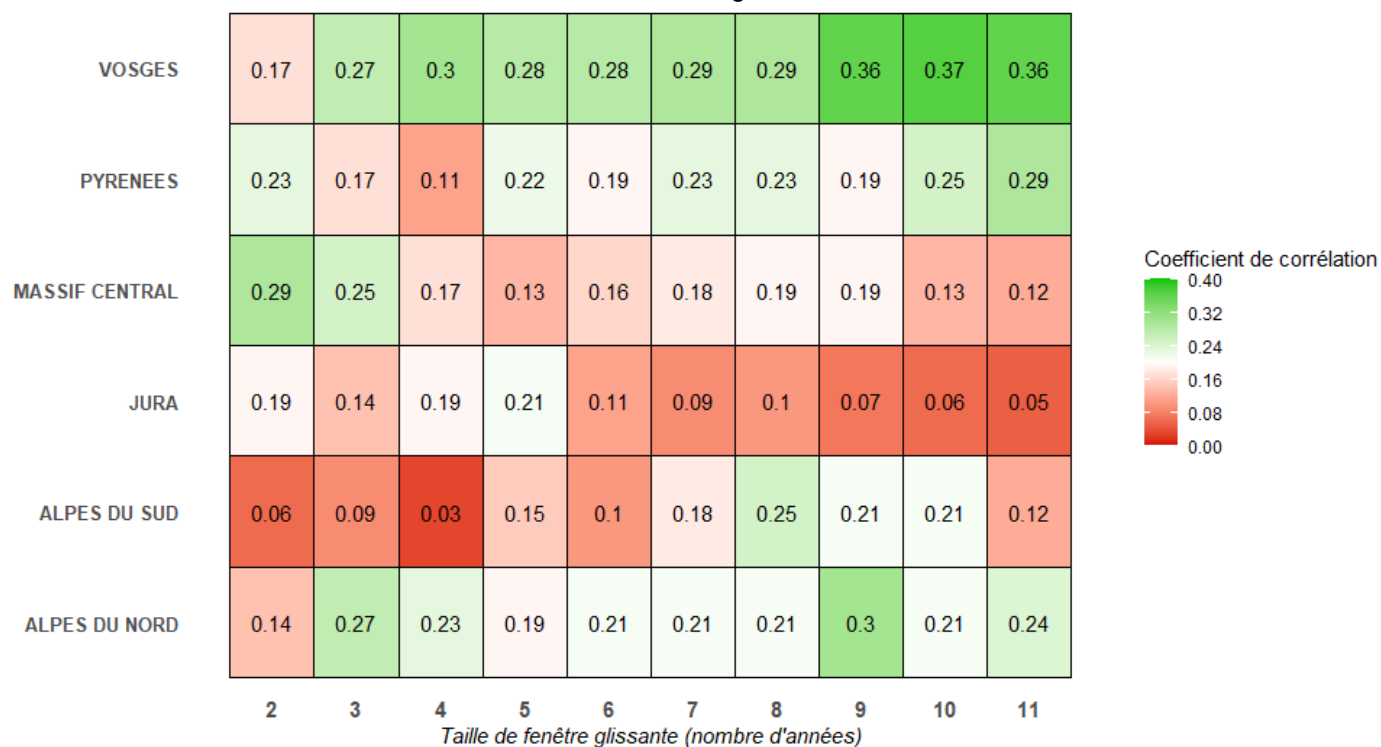
Analyse des durées d'exploitation des stations de ski fermées



Annexe VII

Corrélation entre les indices calculés selon différentes périodes glissantes et la part de stations fermées

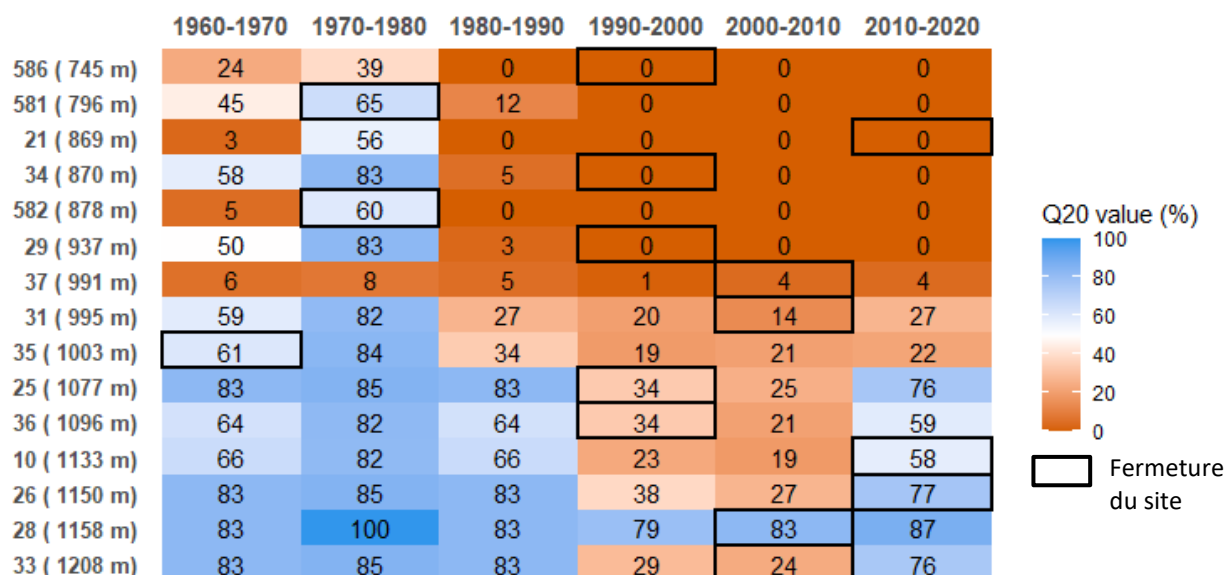
Analyse de corrélation entre le nombre de stations fermées et les indices de fiabilité calculés selon différentes fenêtres glissantes



Annexe VIII Analyse des Q20 pour les stations des massifs non alpins

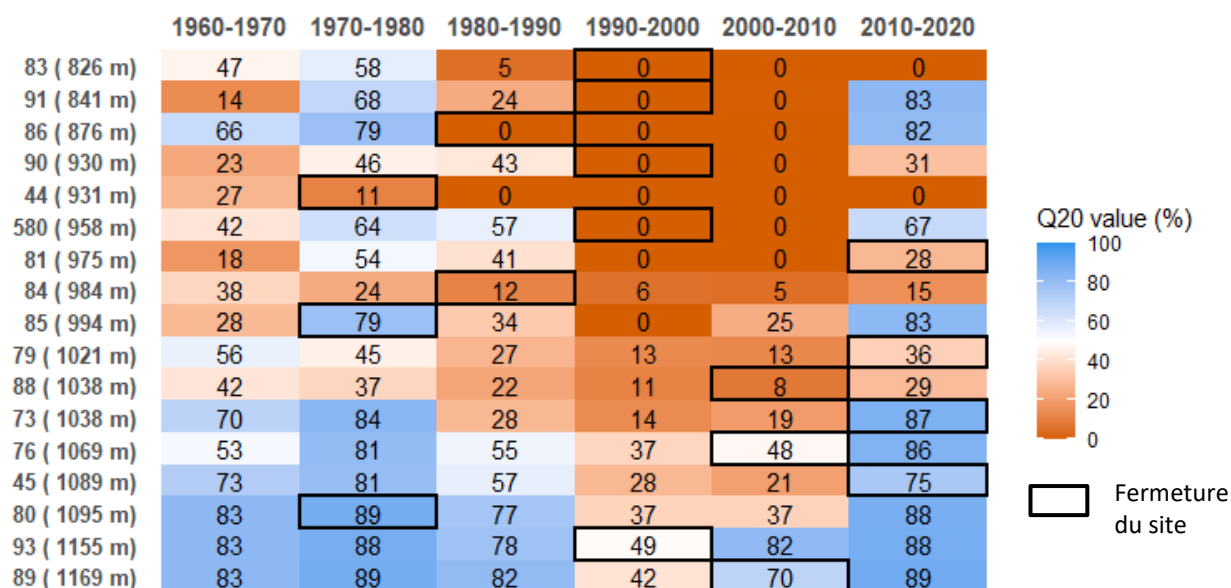
Conditions d'enneigement difficiles par décennie

Neige damée - Stations fantômes : VOSGES



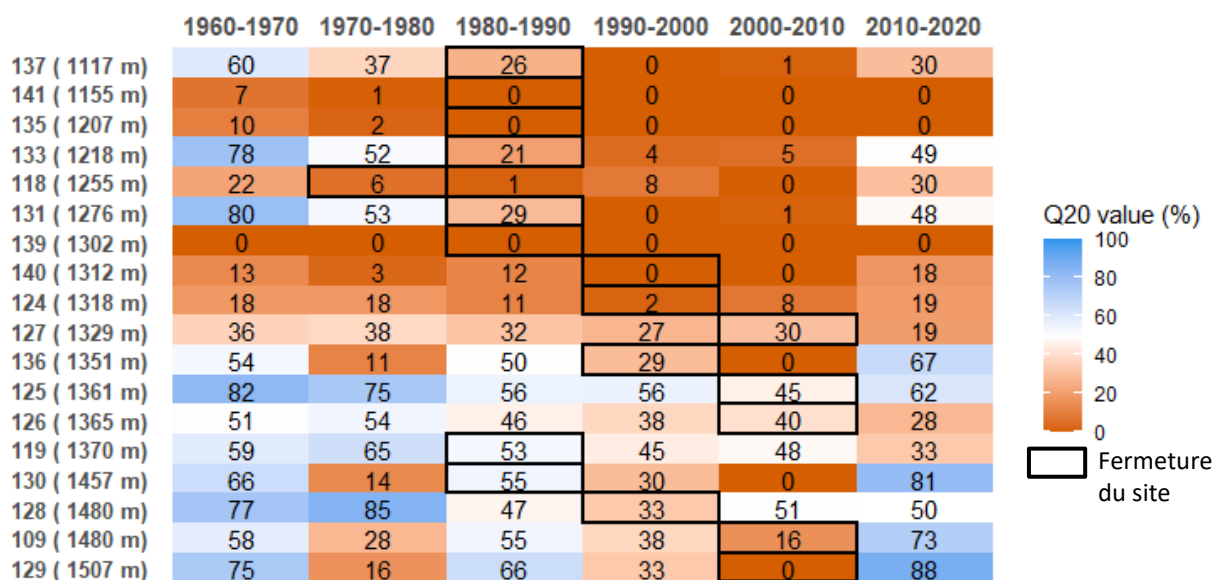
Conditions d'enneigement difficiles par décennie

Neige damée - Stations fantômes : JURA



Conditions d'enneigement difficiles par décennie

Neige damée - Stations fantômes : MASSIF CENTRAL



Conditions d'enneigement difficiles par décennie

Neige damée - Stations fantômes : PYRENEES

