



ÉTUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA STATION DE LA CLUSAZ

Méthodologie et terminologie

Fiches station



7 avril 2023

Table des matières

1	MÉTHODOLOGIE ET TERMINOLOGIE	2
1.1	Objectifs et enjeux de l'étude	3
1.2	Projections climatiques	3
1.3	Modélisation de l'enneigement	5
1.4	Représentation des domaines skiables	6
1.5	Indicateurs nivo-météorologiques	6
1.6	ClimSnow : note méthodologique	8
2	LA CLUSAZ : résultats et analyses	9
2.1	LA-CLUSAZ	10
2.2	ANALYSES ET PRÉCONISATIONS	30
3	ANNEXE : résultats par secteur	36
3.1	BALME	37
3.2	BEAUREGARD-NORD	49
3.3	BEAUREGARD-SUD	61
3.4	L-AIGUILLE-NORD	73
3.5	L-AIGUILLE-SUD	85
3.6	L-ETALE	97

1 MÉTHODOLOGIE ET TERMINOLOGIE

1.1 Objectifs et enjeux de l'étude

Le contexte et la problématique

Le changement climatique a déjà conduit à réduire l'enneigement des massifs montagneux, principalement à basse et moyenne altitude. Dans ce contexte, les situations de faible enneigement sont de plus en plus fréquentes et ceci perturbe les conditions d'exploitation de tous les domaines skiables. La poursuite du réchauffement dans les prochaines décennies continuera à réduire la fiabilité de l'enneigement naturel. La baisse est généralisée, mais les effets sur les conditions d'exploitation des domaines skiables sont variables en fonction des caractéristiques locales (altitude, orientation, pente) et du rôle joué par la production de neige. Il importe d'estimer le plus finement possible ces effets afin d'en tirer les conséquences et d'en tenir compte dans les stratégies d'adaptation des territoires de montagne et des stations de sport d'hiver.

- Quel sera à court et long terme le poids des activités liées directement à la neige dans les économies des massifs montagneux ?
- Quelles orientations pour l'évolution des produits touristiques ?
- Quel sera le prix du confortement des activités "neige" ? Sur quel périmètre ? Avec quelle pression sur les milieux (notamment ressources en eau mobilisées) ?
- Comment aborder des périodes de transition ?

Ces questions se posent à des degrés divers à l'ensemble des espaces valléens dont actuellement les économies et la vie sociale dépendent fortement de l'enneigement naturel et géré (damage, production de neige).

La solution apportée

La méthodologie des études ClimSnow a été développée par un consortium comprenant Météo-France, INRAE (Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement) et Dianeige (bureau d'étude spécialisé dans les projets d'aménagement touristique en montagne). Cette méthodologie permet de :

- quantifier les effets du changement climatique sur les évolutions attendues des principales variables nivo-météorologiques et sur la fiabilité de l'enneigement,
- comparer les conditions d'exploitation à l'horizon 2050, avec une prise en compte directe de la topographie et des techniques de gestion de la neige (damage, neige de culture),
- définir des éléments concrets permettant de guider les exploitants dans leurs choix d'investissement et leurs stratégies de diversification des activités touristiques.

Le principal résultat de cette approche est de quantifier, à diverses échéances, la fiabilité de l'enneigement (neige naturelle damée, avec/sans neige de culture), sa variabilité et la capacité de chaque station de ski à maintenir son exploitation selon quels efforts, selon quelles modalités et ce, à différentes échéances. Afin d'appréhender les effets du changement climatique sur les conditions d'enneigement des stations dans les prochaines décennies, ClimSnow utilise l'état de l'art des outils de la recherche scientifique (projections climatiques avec scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, modélisation physique de l'évolution du manteau neigeux en intégrant le damage et la neige de culture, prise en compte de la topographie locale des stations). En sortie, une série d'indicateurs sont calculés et analysés : indice de fiabilité de l'enneigement, taux de retour des mauvaises saisons, durées d'enneigement. Pour la neige de culture, l'étude simule l'évolution future du potentiel de froid et les volumes d'eau correspondant à la production de neige simulée par le modèle.

1.2 Projections climatiques

Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (scénarios RCP). La chaîne de modélisation de ClimSnow se sert des observations nivo-météorologiques et du réseau de mesures de Météo-France pour fournir un état historique et existant, à partir duquel l'évolution future est calculée, en exploitant des projections climatiques régionales à l'état de l'art, pour permettre d'estimer les évolutions nivo-météorologiques à différentes échéances. Une méthode de descente d'échelle permet d'adapter les projections climatiques aux zones de montagne françaises.

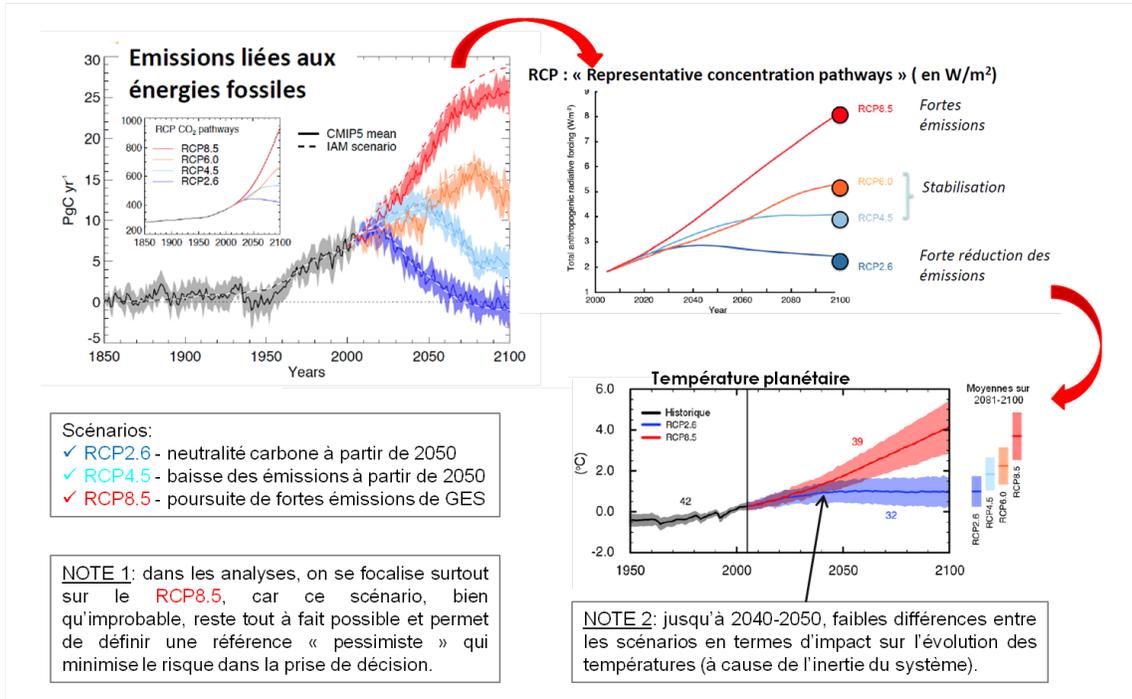


FIGURE 1 – Les projections climatiques dépendent des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre.

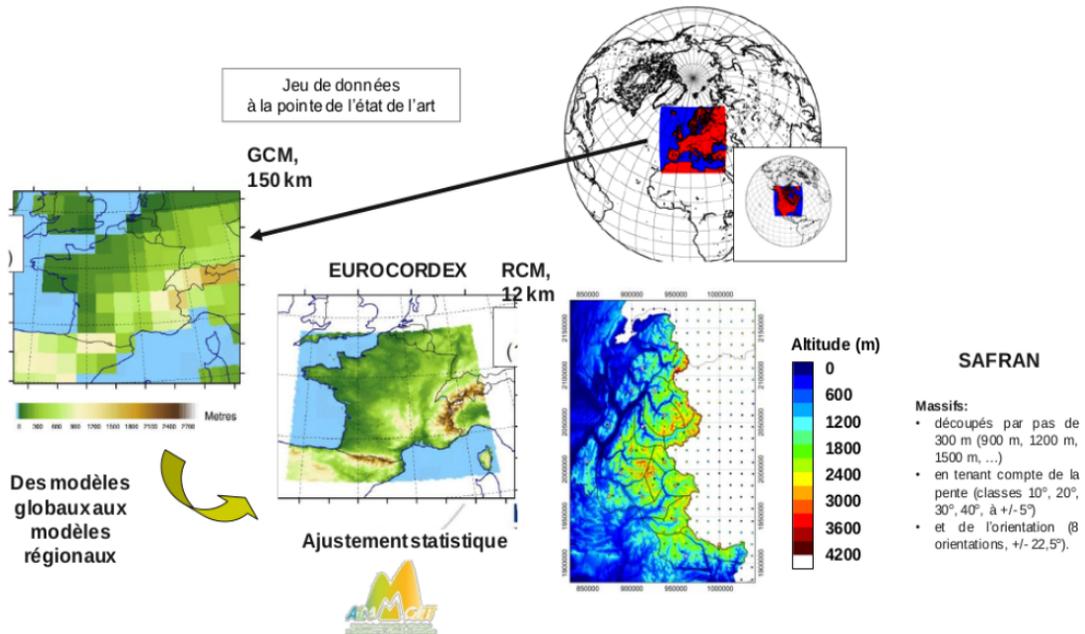


FIGURE 2 – Avec des niveaux de zoom progressifs, ClimSnow permet de passer des projections à grande échelle (qui couvrent toute la planète) à des prévisions locales (qui prennent en compte la topographie des stations de ski).

1.3 Modélisation de l'enneigement

Pour la modélisation de la neige, ClimSnow se sert de la dernière version du modèle Crocus-Resort, développé par Météo-France, permettant de simuler l'évolution de la neige naturelle, les effets du damage (compactage et fraisage) et la production de neige de culture (en fonction de la période de la saison, du type d'enneigeur, de la température humide, de la vitesse du vent et de l'objectif de production).

Paramétrisation de la neige de culture dans le modèle Crocus-Resort :

- Masse volumique de la neige de culture produite : 600 kg m^{-3}
- Schéma de production de neige :
 - Production à partir du 01/11, sous contrainte des seuils de vent et de température humide, sans limite sur la disponibilité de la ressource en eau et avec des objectifs de production différents en fonction des périodes
 - Entre le 01/11 et le 15/12 : constitution d'une sous-couche avec une phase de production correspondant à 150 kg m^{-2} d'eau convertie en neige de culture, soit 15 cm de neige de culture à 600 kg m^{-3} en tenant compte de 40% de pertes d'eau
 - Entre le 15/12 et le 31/03 : production dès lors que l'épaisseur totale de neige damée (naturelle + de culture) devient inférieure à 60 cm, et ce jusqu'au 31/03
 - A partir du 31/03 : plus de production
- Seuil de vitesse du vent pour la production : 4,2 m/s (environ 15 km/h)
- Seuil de température humide : inférieur ou égal -2°C pour les mono-fluides et -6°C pour les bi-fluides

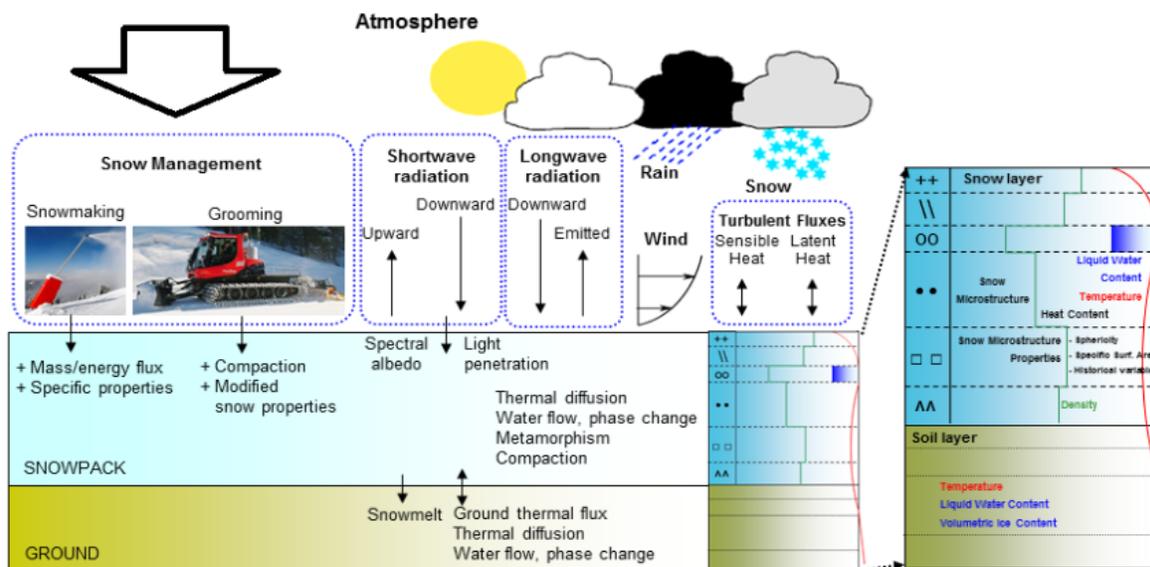


FIGURE 3 – Schéma du modèle de neige Crocus-Resort, intégrant la prise en compte de la neige de culture et du damage.

1.4 Représentation des domaines skiables

ClimSnow intègre les données cartographiques de chaque station, incluant le récolement des remontées mécaniques, les tracés de pistes et le réseau de neige de culture. Cette intégration se fait en plusieurs étapes :

- collecte de données auprès des opérateurs (remontées mécaniques, pistes, neige de culture),
- modélisation des enveloppes gravitaires (ensemble des points accessibles depuis le sommet des remontées mécaniques permettant de rejoindre le pied d'un appareil dans la même station),
- modélisation explicite de la couverture en neige de culture.

La chaîne de modélisation permet de simuler l'évolution des variables nivo-météorologiques de façon très locale au sein d'un domaine skiable, avec la prise en compte des différentes altitudes, orientations et pentes. La représentation spatiale se fait par bandes verticales de 300 m (900 m, 1200 m, 1500 m etc.), avec 8 orientations par rapport au nord et 5 classes de pentes (de 0° à 40°).

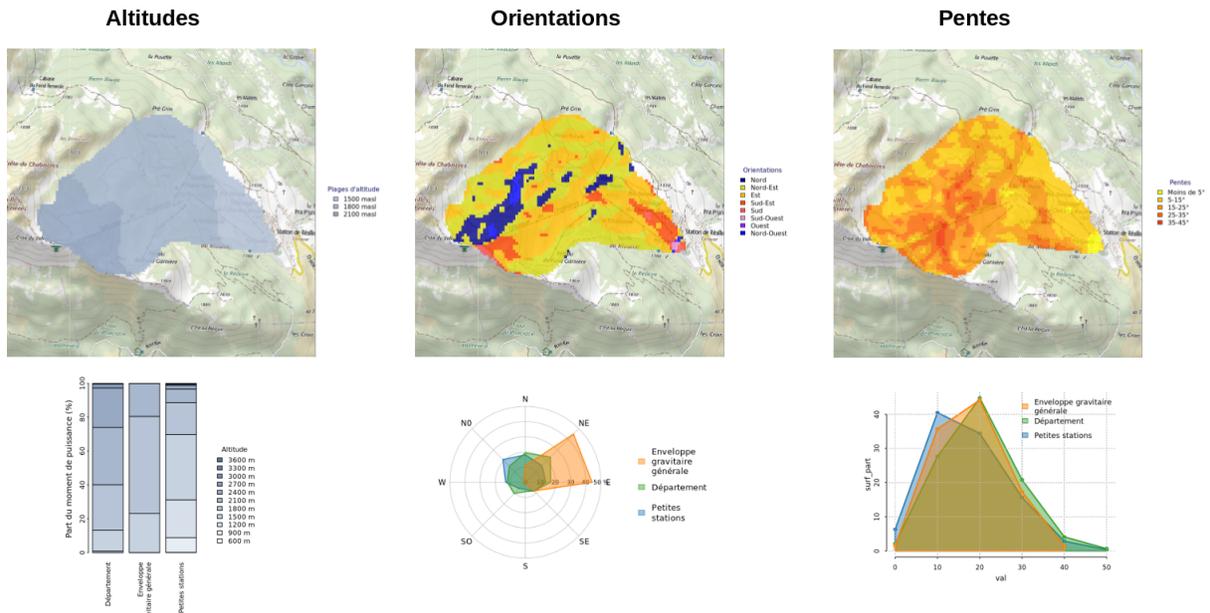


FIGURE 4 – Découpage d'une station de ski en fonction de ses altitudes, ses orientations et ses pentes. Cette approche permet de définir les zones sur lesquelles les simulations de l'enneigement sont lancées.

1.5 Indicateurs nivo-météorologiques

Dans ClimSnow, une série d'indicateurs permettent d'évaluer les effets du changement climatique sur les conditions nivo-météorologiques locales. Ces indicateurs sont fournis pour la période historique (depuis 1959) et pour la période future (jusqu'à 2100).

Indice de fiabilité de l'enneigement

Il représente la variabilité de l'enneigement sur les pistes et caractérise la fraction de surface de domaine skiable (entre 0% et 100%) disposant d'une quantité suffisante de neige pour la pratique du ski (20 cm de neige damée). Pour obtenir une valeur annuelle, les valeurs quotidiennes sont d'abord agrégées à l'échelle de la station en pondérant le poids de chaque secteur en fonction du moment de puissance des remontées mécaniques associées, et ensuite moyennées au cours de la période de vacances de fin d'année (du 20 décembre au 5 janvier, 15% du poids) et d'hiver (du 5 février au 5 mars, 85% du poids). Par défaut, cet indicateur est calculé en considérant un manteau neigeux constitué de neige naturelle damée. Pour les stations qui disposent d'un réseau de neige de culture, un deuxième indicateur est calculé en prenant en compte la production de neige

de culture sur les secteurs concernés. A partir de l'indice de fiabilité de l'enneigement calculé pour chaque saison du passé, il est possible d'identifier les conditions d'enneigement correspondant aux "mauvaises saisons" (niveau typique d'enneigement défavorable rencontré une année sur cinq). Ce paramètre, appelé Q20, identifie le pourcentage d'un domaine skiable qui a pu être ouvert aux clients lors des conditions les plus défavorables rencontrées dans le passé.

Taux de retour des mauvaises saisons

Cet indicateur montre la fréquence de retour des hivers défavorables en termes d'enneigement, tels qu'ils sont définis par le Q20 sur la période historique. Par exemple, si le taux de retour en 2100 est égale à 100%, cela signifie que les conditions défavorables qui dans le passé ne se présentaient qu'une année sur 5 (20%) seront rencontrées toutes les années (100%) à la fin du siècle.

L'image ci-après donne des éléments d'interprétation pour mieux comprendre ces indicateurs climatiques.

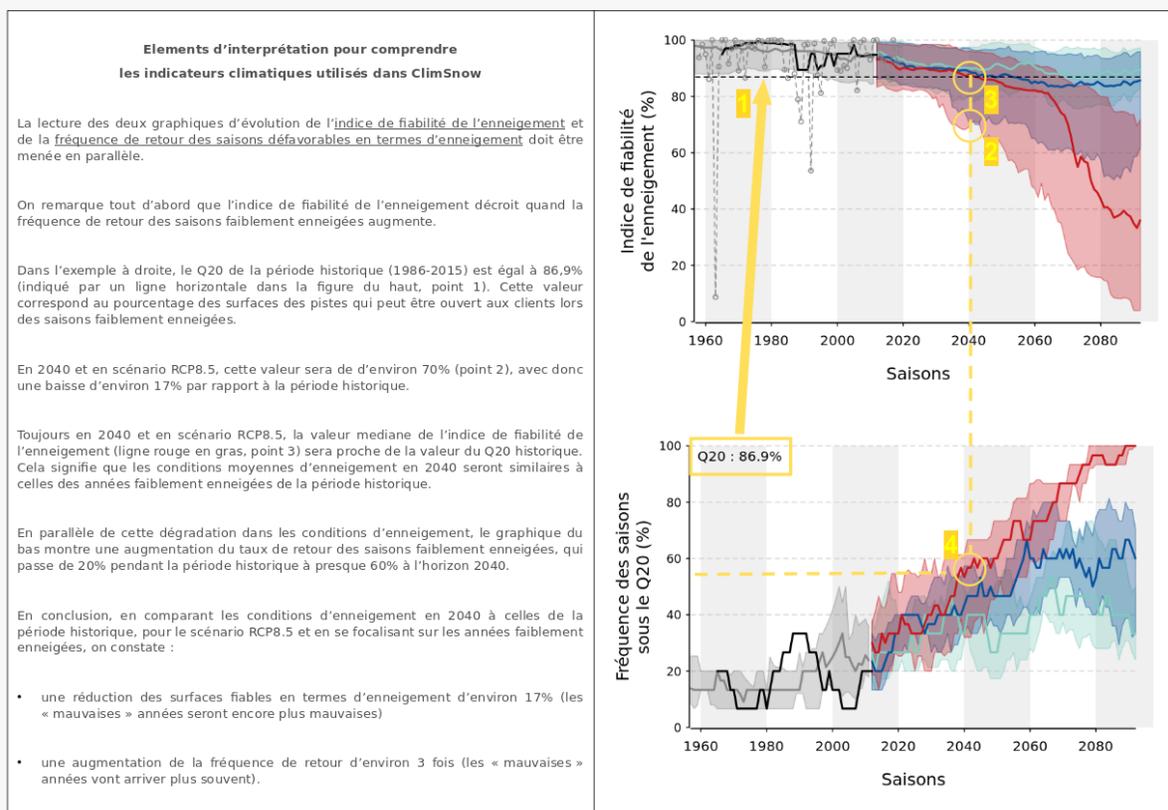


FIGURE 5 – Éléments d'interprétation pour comprendre les indicateurs climatiques utilisés dans ClimSnow.

Fenêtres de froid

Nombre d'heures pendant lesquelles la température humide (paramètre clé pour la production de neige de culture) est inférieure à un certain seuil. Cet indicateur est calculé pour l'altitude la plus basse du domaine skiable et pour différentes périodes de la saison. Les plages de température humide considérées sont les suivantes : entre -1°C et -4°C, entre -4°C et -6°C et inférieures à -6°C.

Consommation en eau pour la production de neige de culture

Cet indicateur montre les volumes d'eau qu'il sera nécessaire de consommer sur les secteurs équipés en neige de culture, afin de faire face au manque de neige naturelle. Comme expliqué auparavant, le modèle produit systématiquement de la neige, si les fenêtres de froid le permettent, jusqu'à la consommation de 150 kg m^{-2} d'eau (entre le 01/11 et le 15/12) ou jusqu'à l'obtention d'une couche de 60 cm de neige damée (entre le 15/12 et le 31/03).

Durée d'enneigement

Nombre de jours où l'épaisseur de neige dépasse un certain seuil (20 cm de neige damée), en fonction de l'horizon temporel, de la présence de neige de culture et des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. La période analysée s'étend de novembre et avril, soit environ 180 jours au total.

1.6 ClimSnow : note méthodologique

L'étude ClimSnow est basée sur une méthodologie de projections climatiques de l'enneigement développée par Météo-France, INRAE et Dianeige et mise au point dans le cadre de différents projets de recherche au niveau national et européen. Les résultats présentés dans ce rapport représentent donc l'état de l'art en matière de projections climatiques de l'enneigement pour les stations de ski en France.

ClimSnow offre une perspective sur les conditions d'enneigement naturel et géré (tenant compte du damage et de la production de neige) à court terme (jusqu'à 2050), mais aussi post-2050, selon plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre utilisés par le GIEC (scénarios RCP). Parmi les indicateurs nivo-météorologiques qui ont été calculés et analysés, dans les sections suivantes le focus est mis surtout sur les indices de fiabilité de l'enneigement, les durées d'enneigement annuelles et les modalités de la production de neige de culture. Dans l'analyse de ces résultats, il est important de considérer les points suivants.

- La chaîne de modélisation utilisée par ClimSnow a, comme tout type de modèle, certaines limites. En particulier, les effets climatiques très localisés, le transport de neige par le vent ou le stockage de la neige à l'aide de barrières ne sont pas pris en compte. Il se peut donc que le modèle, par exemple, ne représente pas correctement les quantités de neige dans des zones très ventées. De la même façon, la production de neige de culture est modélisée en utilisant une configuration « moyenne » en termes d'équipement (taux de production en m^3/h , taux de pertes dans la conversion eau/neige, etc.) et en profitant de toutes les fenêtres de froid disponibles. Les résultats peuvent donc ne pas correspondre parfaitement aux observations de terrain.
- La méthodologie de ClimSnow est centrée sur l'étude des domaines skiables et de leur « fiabilité » en termes de conditions d'enneigement pendant la saison d'hiver, et sans préjuger de l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau pour la production de neige. En outre, les éléments qui sortent du périmètre géographique des pistes de ski, à l'échelle par exemple d'une commune ou d'un espace valléen, ne sont pas traités par ClimSnow.
- Pour terminer, l'étude ClimSnow ne se focalise que sur les aspects liés à l'évolution du climat (évolution des températures, enneigement, etc.). Afin d'opérer des choix avisés sur les investissements à faire et les projets à retenir, il faudra croiser ces informations avec d'autres éléments de nature notamment économique et environnementale.