



HAL
open science

Sports d'hiver, production de neige et changement climatique: énoncé et supports de correction de travaux dirigés

Lucas Berard-Chenu, Jonathan Cognard, Bruno Wilhelm

► To cite this version:

Lucas Berard-Chenu, Jonathan Cognard, Bruno Wilhelm. Sports d'hiver, production de neige et changement climatique: énoncé et supports de correction de travaux dirigés. Licence. France. 2022. hal-03653816

HAL Id: hal-03653816

<https://hal.inrae.fr/hal-03653816>

Submitted on 28 Apr 2022

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Enoncé et supports de correction de travaux dirigés

Sports d'hiver, production de neige et changement climatique

Lucas Berard-Chenu¹, Jonathan Cognard² et Bruno Wilhelm³

¹ Univ. Grenoble Alpes, Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine, F-38000, Grenoble, France

² Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, F-38000 Grenoble, France

³ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Institut des Géosciences de l'Environnement, F-38000, Grenoble, France

e-mail : lucas.berard-chenu@univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer ce support : Berard-Chenu, L., Cognard, J., Wilhelm, B., 2022, « Sports d'hiver, production de neige et changement climatique », 24 pages.

Niveau : Licence 1

Mots-clés : hydrologie, géographie du tourisme, changement climatique, espace de montagne, sports d'hiver

Organisation du dossier

1. Présentation du sujet	2
2. Enoncé pour les étudiants	3
3. Eléments de correction	9
4. Ressources et Références.....	23

1. PRESENTATION DU SUJET

1. Objectifs pédagogiques

- Comprendre les interactions entre le fonctionnement d'un hydrosystème et les activités humaines dans un espace de montagne
- Découverte des spécificités d'un régime nival, de son évolution suite au changement climatique et aux conséquences pour les activités touristiques
- Initiation à l'hydrologie et la climatologie
- Initiation à la géographie du tourisme et aux interactions activités humaines-environnement
- Initiation aux statistiques descriptives

2. Cadrage du sujet

Ce sujet vise à l'acquisition par les étudiants de connaissances sur les interactions entre sociétés humaines et le fonctionnement d'un hydrosystème dans un espace de montagne. Cet exercice permet de faire découvrir aux étudiants, dans un premier temps, les spécificités des précipitations dans les espaces de montagne.

La thématique touristique autour des sports d'hiver est présentée dès le propos introductif mais n'est abordée dans le sujet que dans un second temps. Une fois le lien entre variabilité des précipitations neigeuses et ses effets sur l'activité économique des sports d'hiver établi, les pratiques d'adaptation sont évoquées puis questionnées. La production de neige est la stratégie d'adaptation qui a été plébiscitée par les opérateurs de domaines skiables. Le sujet évoque les effets de cette stratégie sur la ressource en eau, les aménagements associés et leur pertinence dans un contexte de changement climatique. Le sujet se compose de questions dont une dernière qui appelle à un travail de synthèse aux étudiants sur les différents usages de l'eau dans les espaces de montagne.

3. Composition du sujet

Ce sujet se compose d'un corpus de documents de différentes natures :

- Des graphiques représentent les données météorologiques et hydrologiques
- Des figures et des extraits de travaux scientifiques concernant l'essor et l'évolution de la technologie de la production de neige
- Une sélection d'extraits d'articles de presse retrace quelques moments clés des 30 dernières années de l'industrie des sports d'hiver
- Un extrait du rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère (IPCC, 2019, in press) dans le contexte du changement climatique évoque les changements en cours et futurs dans les espaces de montagne liés au changement climatique

2. ÉNONCE POUR LES ÉTUDIANTS

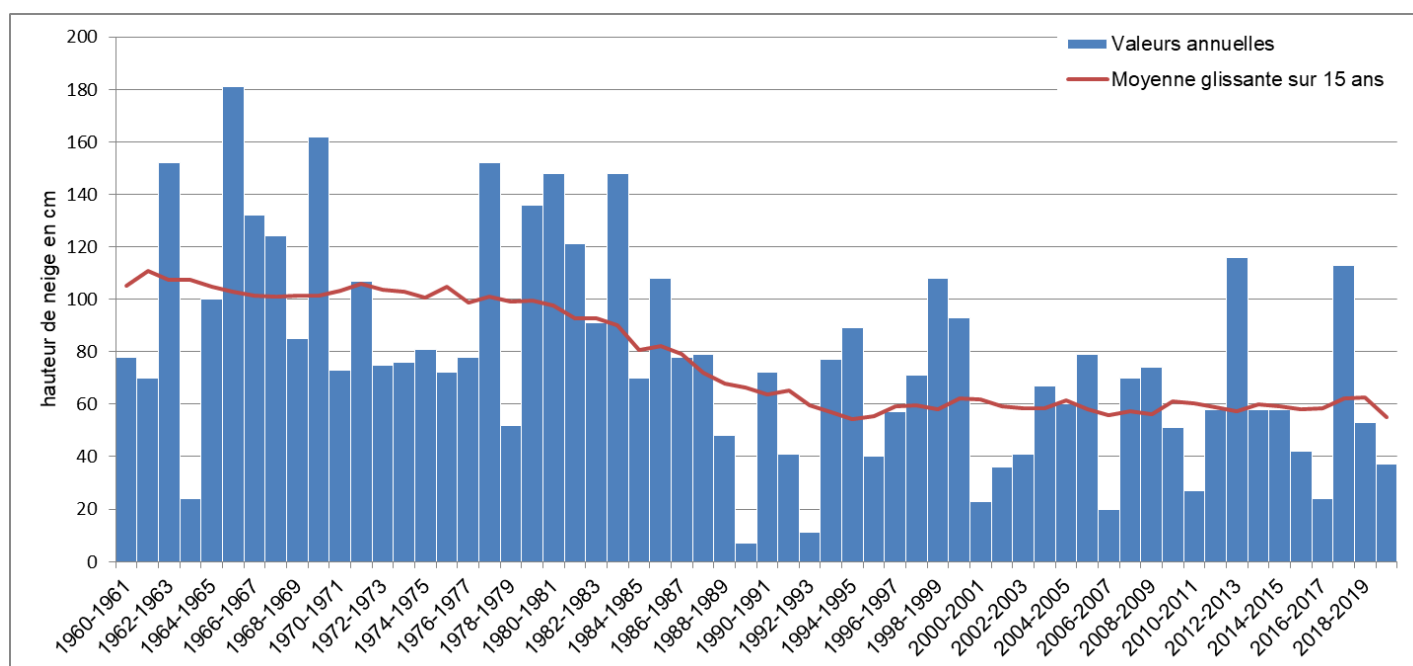
L'énoncé des étudiants est composé de 4 pages à imprimer (p.4-7) et contient :

- Un graphique présentant l'évolution des hauteurs de neige moyenne au Col de Porte, dans le massif de la Chartreuse à 1325m d'altitude, sur la période de 1960 à 2020. (*Figure 1*)
- Des extraits d'articles de presse (*Document 1*)
- Une figure présentant l'évolution des surfaces équipées en neige de culture dans les Alpes françaises depuis 1970 et perspectives pour 2020 (*Figure 2*)
- Un hydrogramme typique d'un cours d'eau de montagne (*Figure 3*)
- Un graphique des prélèvements en eau pour la production de neige dans une station de ski de Savoie (*Figure 4*)
- Un document texte sur les stratégies d'équipement des domaines skiables (*Document 2*)
- Un document texte d'un extrait du chapitre Haute-Montagne du rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (*Document 3*)
- Un tableau de synthèse à compléter par les étudiants

Sports d'hiver, production de neige et changement climatique

Le tourisme des sports d'hiver est une activité économique structurante pour les territoires de montagne depuis plus de 70 ans. Troisième industrie mondiale des sports d'hiver avec 45 millions de journées skieurs par an (Vanat, 2020), le secteur français du tourisme des sports d'hiver assure 120 000 emplois et compte pour 2 milliards d'euros d'apport dans la balance commerciale de la France (DSF et al., 2018). Cependant cette activité reste marquée par une vulnérabilité climatique. Comment ce secteur d'activité s'est-il adapté et quelles conséquences pour la ressource en eau dans un contexte de changement climatique ?

Figure 1 : Évolution des hauteurs de neige moyenne au Col de Porte, dans le massif de la Chartreuse à 1325m d'altitude, sur la période de 1960 à 2020. (Source : Centre d'Etudes de la Neige, Météo-France)



- 1) A partir de la Figure 1, que pouvez-vous dire de l'évolution de l'enneigement d'une saison d'hiver à l'autre? Que constatez-vous sur l'ensemble de la chronique?

Document 1 : Extraits d'articles de presse

Retour en grâce des sports d'hiver, Les Echos, 07/05/1991

« Le chiffre d'affaires des remontées mécaniques a fait un véritable bond en avant, en début de saison, non seulement par rapport au catastrophiques hiver 1989-90 (+73%) mais aussi à la saison 1986-87 (+37%) qui fut la dernière à connaître un enneigement normal. Les importantes difficultés de trésorerie entraînée par les aléas climatiques des derniers hivers chez les exploitants de remontées mécaniques n'en seront néanmoins pas comblées en une saison. »

Les stations de montagne investissent à nouveau, Les Echos, 28/10/1993

« Les stations françaises ont repris leurs investissements cette année. Cette reprise concerne d'abord les remontées mécaniques avec 380 millions de francs investis. Elle est encore plus marquée pour la neige de culture qui croît de 100 % (190 millions de francs d'installations nouvelles). »

Les canons à neige « cultivent » l'or blanc automatiquement, La Tribune 09/04/1996

« Les canons crachent un brouillard de micro-gouttelettes d'eau qui se cristallisent pour former de

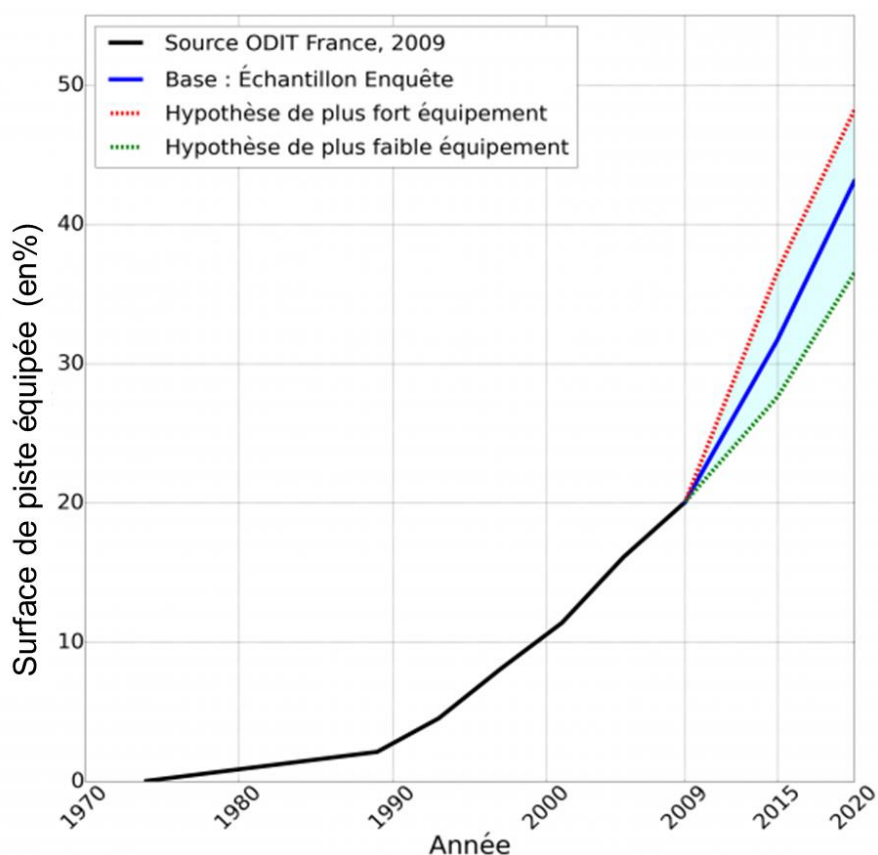
la neige avant de retomber sur le sol. Les canons sont essentiellement commercialisés en France par York Neige, filiale d'un groupe américain de climatisation qui détient 65 % du marché. « Grâce à des sondes électroniques installées tous les 200 mètres le long des pistes, l'ordinateur collecte les données atmosphériques nécessaires. Il peut ensuite commander la mise en route de certains canons dès que les conditions sont optimales, et réguler tout seul le mélange air-eau en fonction de la qualité de neige souhaitée. Au final, un tel système permet d'accroître la production de neige de plus de 30 % par rapport aux automatismes classiques », explique Joël Deraet, chez York.

L'absence de neige plombe le début de saison des stations, Le Figaro, 19/12/2014

« Malgré ce démarrage difficile, Laurent Reynaud, directeur général de Domaines skiables de France (DSF), estime que la profession sait gérer cet « aléa climatique ». Grâce aux canons à neige, à une meilleure préparation des sols et aux progrès des techniques de damages, les conséquences d'une mauvaise météo ont été divisées par trois en vingt ans. [...] « En moyenne, nous faisons face à un accident de ce type tous les cinq ans et nous sommes organisés pour y résister », explique Jean-Yves Rémy, PDG de Labellemontagne, un groupe gérant 12 stations entre Vosges et Alpes. »

Figure 2 : Évolution des surfaces équipées en neige de culture dans les Alpes françaises depuis 1970 et perspectives pour 2020

Source : Spandre, P., François, H., Morin, S., & George-Marcelpoil, E. (2015). Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises. Contexte climatique et état des lieux. *Revue de géographie alpine*, 103-2. <https://doi.org/10.4000/rga.2840>



- 2) A partir du Document 1 et de la Figure 2, pourquoi l'industrie des sports d'hiver a-t-elle fait le choix de la production de neige ? Quelles tendances observez-vous ? Quelles sont les conditions nécessaires à cette pratique et à son développement ?

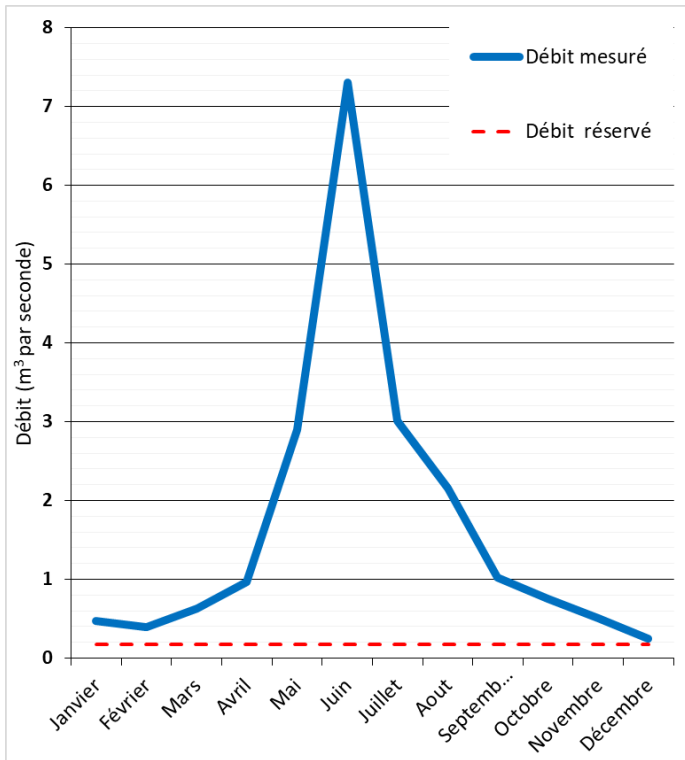


Figure 3 : Hydrogramme typique d'un cours d'eau de montagne

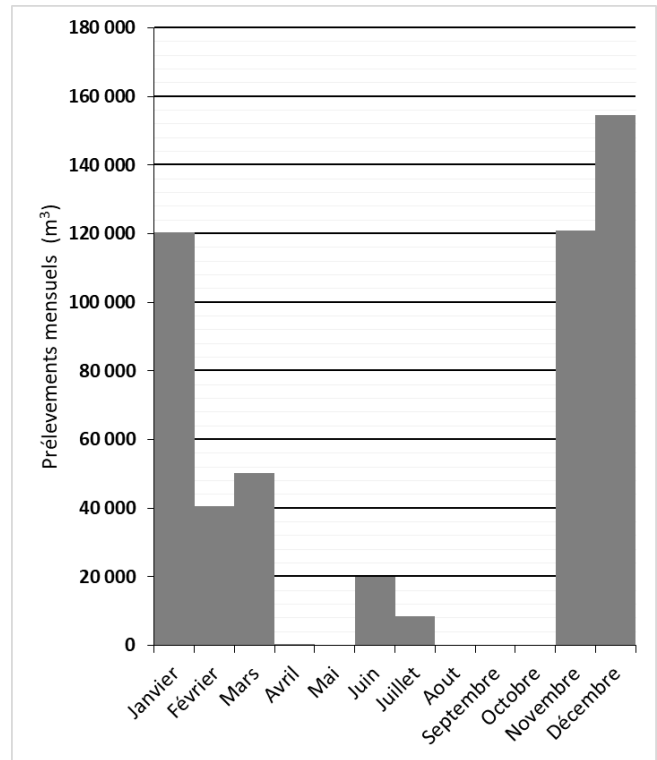


Figure 4 : Prélèvements en eau pour la production de neige dans une station de ski de Savoie

Document 2 : Stratégie d'équipement des domaines skiables (extrait(Berard, 2021)

« Les installations de production de neige absorbent 20% des capacités d'investissements des opérateurs de remontées mécaniques. Les opérateurs réalisent de lourds investissements dans des aménagements leur permettant de capter et stocker de l'eau. En moyenne, le coût d'investissement pour une retenue d'altitude équivaut à 760 000€. Par ailleurs, la ressource en eau en montagne fait souvent l'objet d'usages multiples à laquelle la production de neige vient s'ajouter. »

- 3) A partir de la Figure 3, repérez les périodes où le débit est le plus fort/faible. Selon vous, comment expliquez ces variations ?
- 4) A partir de la Figure 4 et du Document 2, quand ont lieu les prélèvements ? En comparant avec la Figure 3, quels intérêts selon vous d'une retenue d'altitude? Qu'impliquent de tels aménagements ?

Document 3 : Extrait du chapitre Haute-Montagne du rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans le contexte du changement climatique (Hock et al., 2019)

« Les projections climatiques futures prévoient une probable diminution de 10 à 40 % de l'épaisseur moyenne de neige en hiver à basse altitude en 2031–2050 par rapport à 1986–2005. Il est aussi prévu que jusqu'au milieu du 21e siècle, quel que soit le scénario climatique, la température de l'air en surface devrait continuer à augmenter à un taux moyen de 0,3 °C par décennie, dépassant généralement les taux de réchauffement planétaire (0,2°C par décennie). »

- 5) Quelles seraient les conséquences de l'amplification des changements climatiques sur les territoires touristiques de montagne ? Quelles conséquences pour la production de neige et l'eau en montagne ?
- 6) Listez les différents usages en eau en territoire de montagne et les enjeux associés

TYPE D'USAGE	PROVENANCE	PÉRIODE DE L'ANNÉE	ENJEUX

4. Données complémentaires pour l'enseignant

Hauteurs de neige mesurées à la station nivo-météorologique du Col de Porte. Données issues d'une lecture graphique du graphique de l'enneigement (Source : Centre d'Etudes de la Neige, Météo-France - CNRS)

SAISON	HAUTEUR (en CM)
1960-1961	78
1961-1962	70
1962-1963	152
1963-1964	24
1964-1965	100
1965-1966	181
1966-1967	132
1967-1968	124
1968-1969	85
1969-1970	162
1970-1971	73
1971-1972	107
1972-1973	75
1973-1974	76
1974-1975	81
1975-1976	72
1976-1977	78
1977-1978	152
1978-1979	52
1979-1980	136
1980-1981	148
1981-1982	121
1982-1983	91
1983-1984	148
1984-1985	70
1985-1986	108
1986-1987	78
1987-1988	79
1988-1989	48
1989-1990	7

SAISON	HAUTEUR (en CM)
1990-1991	72
1991-1992	41
1992-1993	11
1993-1994	77
1994-1995	89
1995-1996	40
1996-1997	57
1997-1998	71
1998-1999	108
1999-2000	93
2000-2001	23
2001-2002	36
2002-2003	41
2003-2004	67
2004-2005	60
2005-2006	79
2006-2007	20
2007-2008	70
2008-2009	74
2009-2010	51
2010-2011	27
2011-2012	58
2012-2013	116
2013-2014	58
2014-2015	58
2015-2016	42
2016-2017	24
2017-2018	113
2018-2019	53
2019-2020	37

3. ELEMENTS DE CORRECTION

1. A partir de la Figure 1, que pouvez-vous dire de l'évolution de l'enneigement d'une saison d'hiver à l'autre? Que constatez-vous sur l'ensemble de la chronique?

Point sur le site nivo-météorologique du Col de Porte

Situé en Chartreuse (1325m), le site du Col de Porte est géré par le Centre d'Etudes de la Neige (Météo-France). Le site collecte des mesures météorologiques et nivologiques depuis 1961.

Observatoire de référence avec la chronique de suivi du manteau neigeux la plus longue en France.

Plusieurs paramètres sont enregistrés au pas de temps horaire:

- température et humidité de l'air,
- rayonnements,
- vitesse du vent et cumul de précipitations,
- hauteur de neige,
- densité du manteau neigeux,
- tassements du manteau neigeux



2 phénomènes s'observent sur ce graphique :

1^{er} phénomène: la **variabilité interannuelle des précipitations sous forme de neige**.

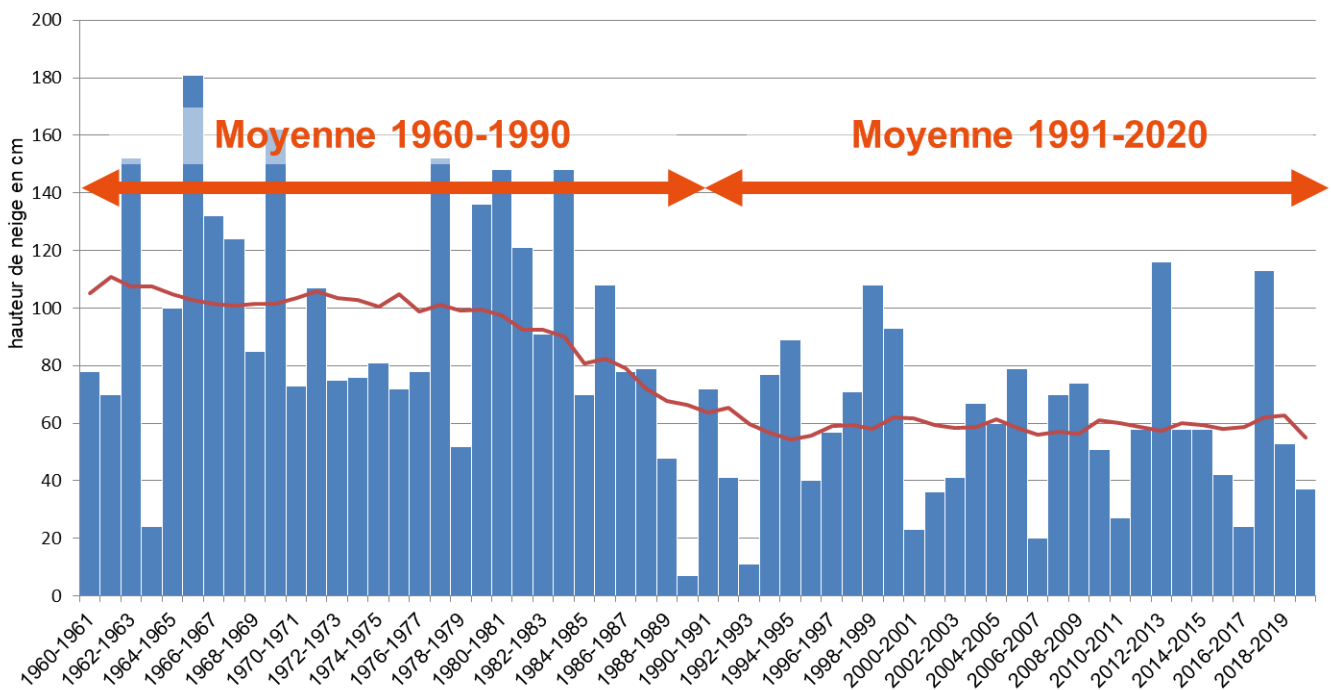
- les saisons d'hiver se succèdent avec des volumes de précipitation changeants.
- On remarque des hivers faiblement enneigés (notamment les hivers 1963-1964, 1989-1990, 1992-1993, 2000-2001) et des hivers bien enneigés (hivers 1983-1984, 1969-1970, 1980-1981).
- On observe notamment une série d'hivers faiblement, voire très faiblement enneigés, à la fin des années 1980 et début des années 1990 ;
- Il n'existe pas de régularité dans les quantités de neige observées à la station du Col de Porte d'une saison d'hiver à une autre

2^{ème} phénomène: **une tendance à la diminution de l'enneigement moyen** sur la période de 60 années d'observation.

- On observe encore des hivers bien enneigés au Col de Porte mais ils sont moins nombreux, tandis que les hivers moins bien enneigés sont plus nombreux.
- En observant la moyenne glissante, on note bien une baisse de l'enneigement qui s'opère à la fin des années 1980 et au début des années 1990.
- La tendance observée au Col de Porte est similaire à celle observée à l'échelle de toute les Alpes où la durée de la couverture neigeuse en dessous de 2000m a diminué sur la période 1971-2019 (Matiu et al., 2021).

***Intérêt pédagogique :** On peut demander aux étudiants de relever, par lecture graphique, la hauteur de neige pour chaque saison et ensuite leur demander de calculer une moyenne sur 2 périodes de quasiment 30 ans et de commenter l'écart entre les deux moyennes calculées. Ils peuvent aussi découvrir le principe d'une moyenne glissante ou moyenne mobile.*

Évolution des hauteurs de neige moyenne au Col de Porte à 1325m d'altitude, sur la période de 1960 à 2020 (Source : Météo-France)

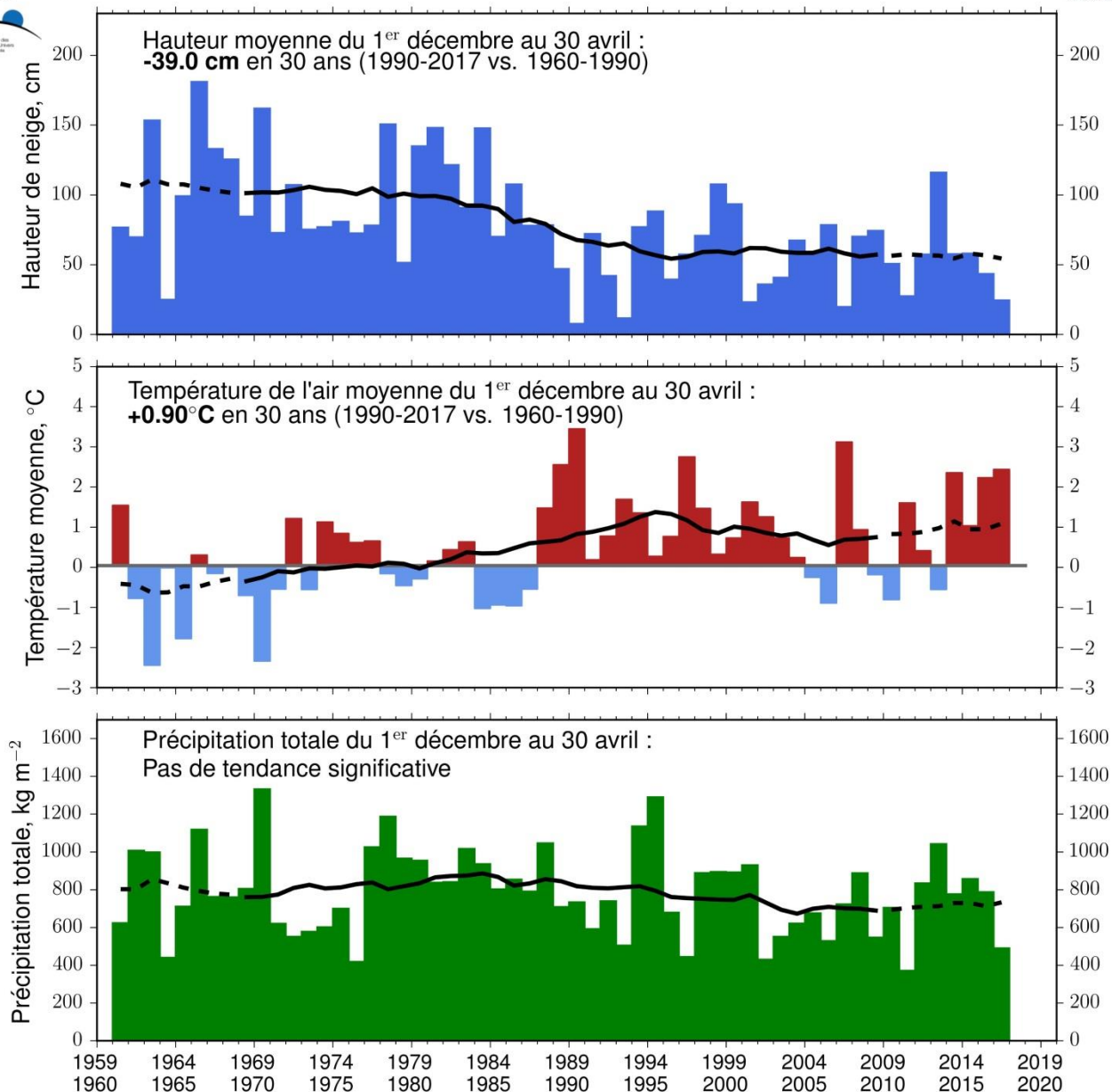


Après le calcul des moyennes sur les deux périodes (1960-1990 et 1990-2020) et leur comparaison, on note une baisse de la hauteur de neige avec un écart mesuré de - 37cm entre les deux périodes.

Evolution de l'enneigement, des températures et des précipitations hivernales de la saison 1960-1961 à la saison 2017-2018 au Col de Porte, valeurs annuelles et moyennes glissantes sur 15 ans



Enneigement, température et précipitations hivernales
Col de Porte (1325 m, Chartreuse)
Valeurs annuelles et moyennes glissantes sur 15 ans



Analyse des documents graphiques

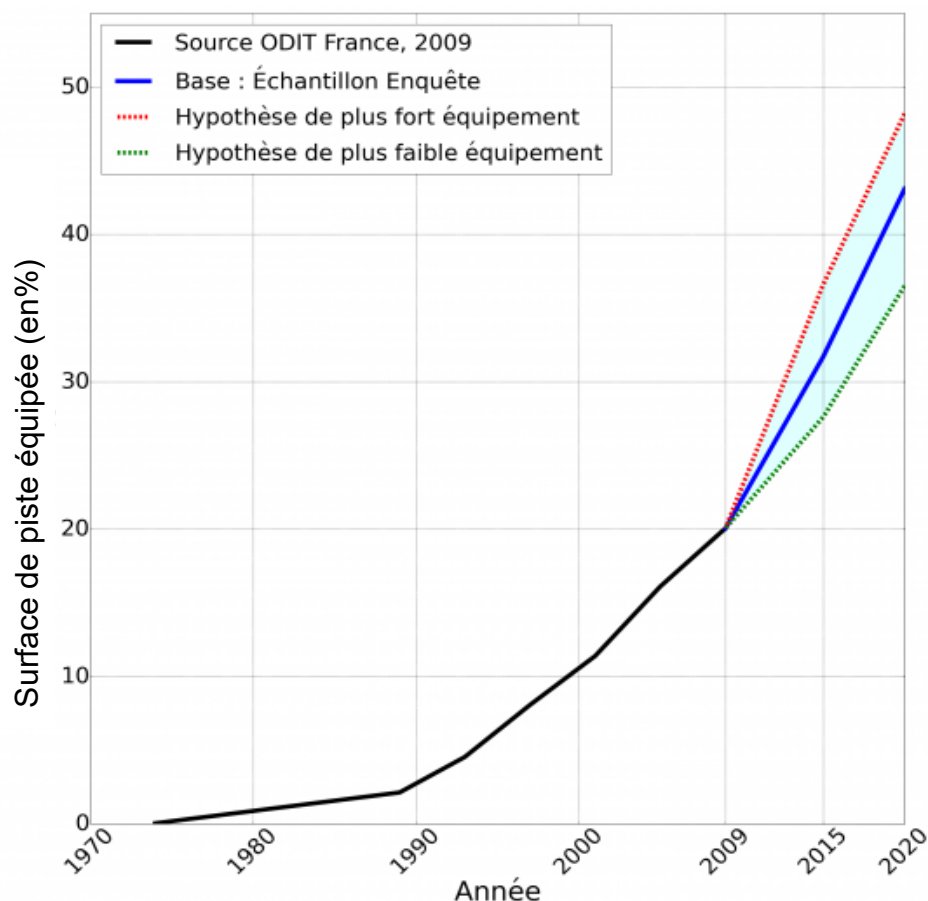
On n'observe pas de diminution significative des quantités de précipitation observées au Col de Porte (graphique n°3) mais une hausse significative des températures (graphique n°2). On note une augmentation de +1 °C sur la période 1990-2020 (par rapport à la période 1960-1990)

Conséquences: il tombe la même quantité de précipitations au Col de Porte mais sous une forme différente :

- Moins de précipitations sous forme solide

- Davantage de précipitations sous forme liquide

2. A partir du Document 1 et de la Figure 2, pourquoi l'industrie des sports d'hiver a-t-elle fait le choix de la production de neige ? Quelles tendances observez-vous ? Quelles sont les conditions nécessaires à cette pratique et à son développement ?



Commentaire et explication du graphique

Ce graphique est composé de 2 périodes distinctes en fonction de l'auteur des données:

- **De 1970-2009:** données collectées par les services de l'Etat (service ODIT France). A partir de 2009, arrêt de la collecte de données
- **En 2015,** Spandre et al.(Spandre et al., 2015) ont réalisé une enquête sur un échantillon représentatif de stations de ski des Alpes du Nord. Cette enquête permet de connaître l'évolution du taux d'équipement entre 2009-2015 et d'estimer, sur la base des déclarations des exploitants de domaine skiable, leur projection d'équipement jusqu'en 2020

Intérêt pédagogique : On peut montrer ici la difficulté qu'il peut y avoir à collecter et disposer d'informations fiables et actualisées pour renseigner un phénomène ou une pratique. Cela se manifeste ici par l'arrêt de la collecte des données par les services de l'Etat en 2009 et l'actualisation ponctuelle des données réalisée via un travail scientifique mené en 2015

L'industrie des sports d'hiver est vulnérable à l'aléa des précipitations sous forme de neige. L'accroissement du poids qu'occupe le tourisme des sports d'hiver dans l'économie alpine a entraîné une plus forte vulnérabilité des territoires de montagne aux hivers dits « sans neige » (Gauchon, 2009). Cette plus forte vulnérabilité des exploitants de domaines skiables les a amenés à chercher des solutions pour se prémunir d'un enneigement insuffisant, notamment en début de saison.

La production de neige a été la technique la plus largement répandue afin de réduire la dépendance des domaines skiables aux précipitations sous forme de neige (Abegg et al., 2007). Cette technologie, inventée aux Etats-Unis dans les années 1950, arrive dans les Alpes française au début des années 1970. Les premiers essais ont lieu dans la station de ski de Flaine (Haute-Savoie) mais l'équipement ne donne pas satisfaction :

« en désespoir de cause, et dans des grandes circonstances (Jeux Olympiques, par exemple), il est toujours possible d'importer par camion de la neige, car la méthode de la "neige de culture" est encore peu utilisée en France (la première installation a été créée à Flaine, la seconde à Pyrénées 2000) » (Knafou, 1978).



Crédit Inauguration de la télécabine du Veux Moulin, 2019, Val Cenis

Premiers essais d'enneigement dans la station de Val Cenis (Maurienne) en 1979

L'équipement des stations de ski des Alpes françaises reste faible jusque en 1990, on compte alors moins de 5% des surfaces de piste équipées (cf. Figure 2). On note ensuite une forte croissance jusqu'à atteindre 35% des surfaces de piste équipées en 2015.

Plusieurs raisons expliquent l'essor de la production de neige à partir de 1990

La succession d'hiver faiblement enneigés encourage les exploitants à s'équiper: notamment les hivers 1989-1990, 1992-1993. L'équipement est initié en Savoie suite aux **Jeux Olympiques d'hiver de 1992** où la production de neige permet de garantir la tenue des épreuves olympiques dans de bonnes conditions.

Le progrès technique a favorisé le déploiement de la production de neige ainsi que sa généralisation au travers d'un double effet:

1. **Augmentation les rendements** grâce aux progrès dans le mélange air-eau nécessaire au fonctionnement des enneigeurs. On a donc observé une augmentation des quantités produites sans augmenter les consommations en air comprimé, donc sans augmentation des coûts associés à l'énergie (énergie nécessaire à la mise sous pression de l'air via des compresseurs).
2. **Réduction des coûts de main d'œuvre**, grâce au déclenchement automatique des enneigeurs lorsque les conditions sont favorables:
 - Il n'est plus nécessaire au personnel de travailler la nuit, un avantage car les horaires de nuit coûtent plus chers et sont plus dangereux (risque associé à la situation de travailleur isolé)
 - on estime en France un ratio d'un nivoculteur pour gérer un parc de 100 enneigeurs. Par exemple les plus grandes stations françaises des Alpes comptent environ 5 à 6 nivoculteurs (équivalent temps plein)
 - les équipes de nivoculteurs en Amérique du Nord sont plus grandes car les installations sont plus anciennes et donc moins automatisées. Le coût de la main d'œuvre est aussi plus faible qu'en Europe. (par ex. 28 nivoculteurs pour la station de Whistler au Canada, avec un salaire de 14\$/heure)

Les systèmes de production de neige actuel comprennent:

- Un réseau d'enneigeurs composé de perches ou de ventilateurs
- Une salle des machines pour mettre en pression le réseau d'eau (avec des pompes) et le réseau d'air (avec des compresseurs)
- Un système de supervision qui permet le contrôle de l'ensemble de l'installation
- Le plus souvent une retenue d'altitude pour stocker la ressource en eau



(Crédit L. Berard-Chenu)



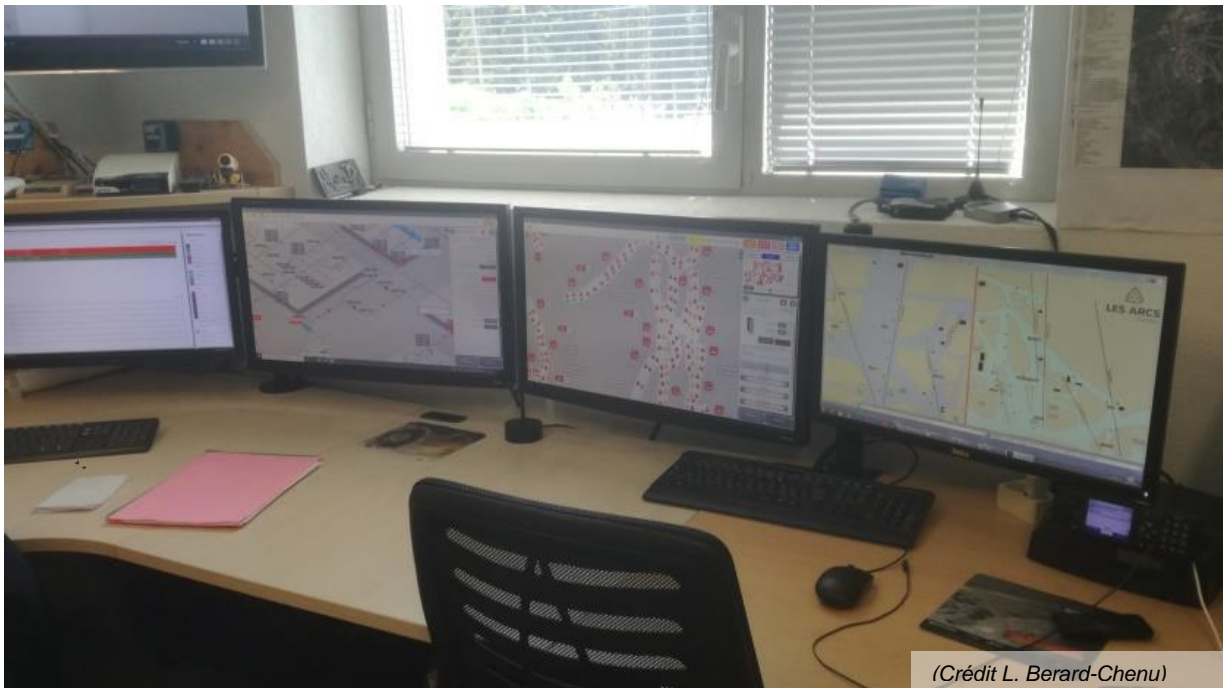
(Crédit L. Berard-Chenu)

Enneigeurs : perches et ventilateur



(Crédit L. Berard-Chenu)

Salle des machines



(Crédit L. Berard-Chenu)

Système de supervision



(Crédit L. Berard-Chenu)

Retenue d'altitude

Production de neige: quels coûts?

Le coût de la production de neige comprend un coût d'investissement ainsi qu'un coût de fonctionnement.

- Le coût d'investissement, calculé à l'hectare, est estimé entre 90 000 et 180 000 €/ha (Berard-Chenu et al., 2022).
- Le coût de fonctionnement est estimé à 2,50 € par m³ de neige produit (DSF et al., 2018)

Ces coûts sont cependant **fortement variables en fonction de chaque domaine skiable**. Plusieurs éléments peuvent expliquer cette forte variabilité du coût: le type d'accès à l'eau, l'ancienneté du réseau de production, le type d'installation, la configuration du domaine skiable, la capacité de négociation avec les fournisseurs, etc.

Si les superficies couvertes augmentent (cf. Figure 2), alors les quantités de neige à produire d'une année à l'autre augmentent ainsi que les besoins en eau. Les opérateurs de domaines skiables doivent être en capacité de disposer de la ressource en eau adéquate, en tenant compte de l'agrandissement potentiel de leur réseau d'équipement.

3. A partir de la Figure 3, repérez les périodes où le débit est le plus fort/faible. Selon vous, comment expliquez ces variations ?

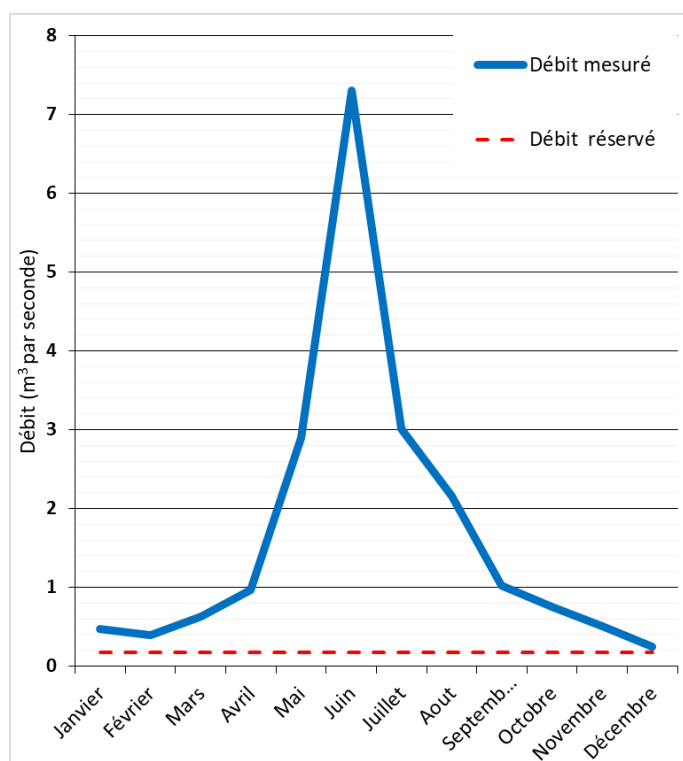
Les périodes où le débit est le plus faible (moins de 1 m³/s) s'observent en automne et en hiver, de septembre à avril.

On observe que:

- Le débit le plus faible est mesuré au mois de décembre.
- le débit le plus fort est observé au printemps et à l'été, entre mai et août avec un pic en juin (plus de 7 m³/s).

Le régime hydrologique de ce cours d'eau, soit l'évolution moyenne cyclique des débits, correspond à un **régime nival**

Les débits les plus forts sont observés au moment de la fonte du manteau neigeux. Cette fonte alimente le cours d'eau.



Le débit diminue à mesure que la fonte du manteau neigeux avance à la saison estivale.

C'est en hiver que l'on observe le débit est le plus faible, lorsque l'eau précipitée dans le bassin versant est sous forme solide. Cette eau ne contribue alors pas au ruissellement et n'alimente pas le cours d'eau.

Définition: débit réservé ou débit minimal

C'est le débit minimal restant imposé par l'autorité administrative dans le lit naturel de la rivière qui ne doit pas être inférieur au 1/10^{ème} du débit annuel moyen (module)

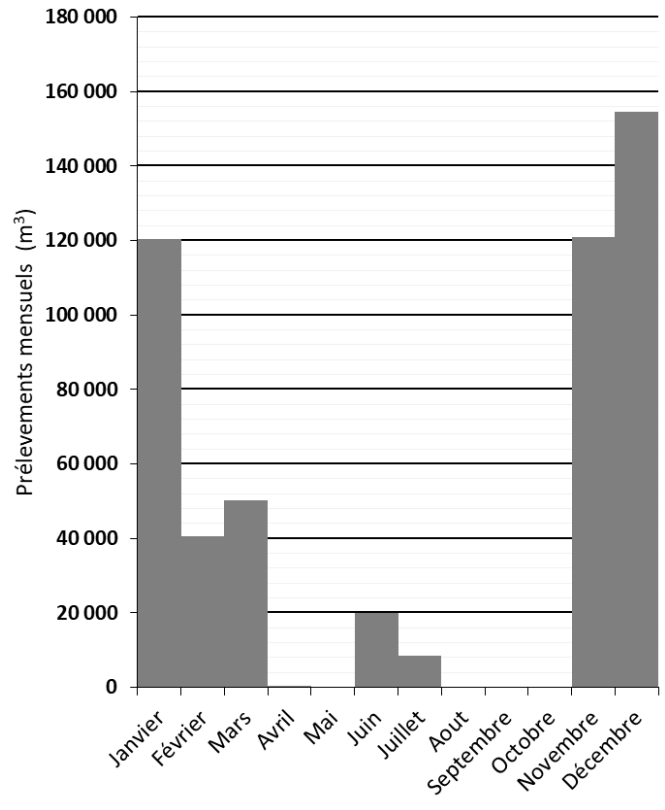
4. A partir de la Figure 4 et du Document 2, quand ont lieu les prélèvements ? En comparant avec la Figure 3, quels intérêts selon vous d'une retenue d'altitude? Qu'impliquent de tels aménagements ?

Point sur la distinction entre eau consommée et eau prélevée:

Sur un volume d'eau prélevé pour un usage, une partie peut retourner dans le milieu. La part de l'eau « consommée » correspond alors à la proportion prélevée, qui n'est pas restituée au milieu naturel après utilisation.

Dans le cadre de la production de neige, on peut parler d'une **consommation faible** : les fabricants d'enneigeurs estiment à 15% la part de l'évaporation de l'eau lors de production de neige. Il faut aussi tenir compte de l'évaporation de l'eau stockée dans les retenues d'altitude.

La neige produite par les enneigeurs fond ensuite au printemps et est restituée au milieu.



Selon la Figure, la production se fait de novembre à mars. Les plus forts prélèvements sont observés au mois de décembre (>150 000 m³ prélevé), qui correspond à l'ouverture de la saison touristique. 53% de l'ensemble des volumes d'eau sont prélevés en novembre et décembre. De manière générale et lorsque les conditions le permettent, la production de neige s'effectue à **70% avant l'ouverture et au début de la saison touristique** (aux vacances de Noël le plus souvent).

Intérêt des retenues d'altitude pour les opérateurs de domaine skiable :

En comparant les deux figures, on remarque que les besoins en eau pour la production de neige ont donc lieu lorsqu'on observe les débits les plus faibles dans les cours d'eau.



Enneigement en pré-saison au Corbier (Savoie)
L.Berard-Chenu



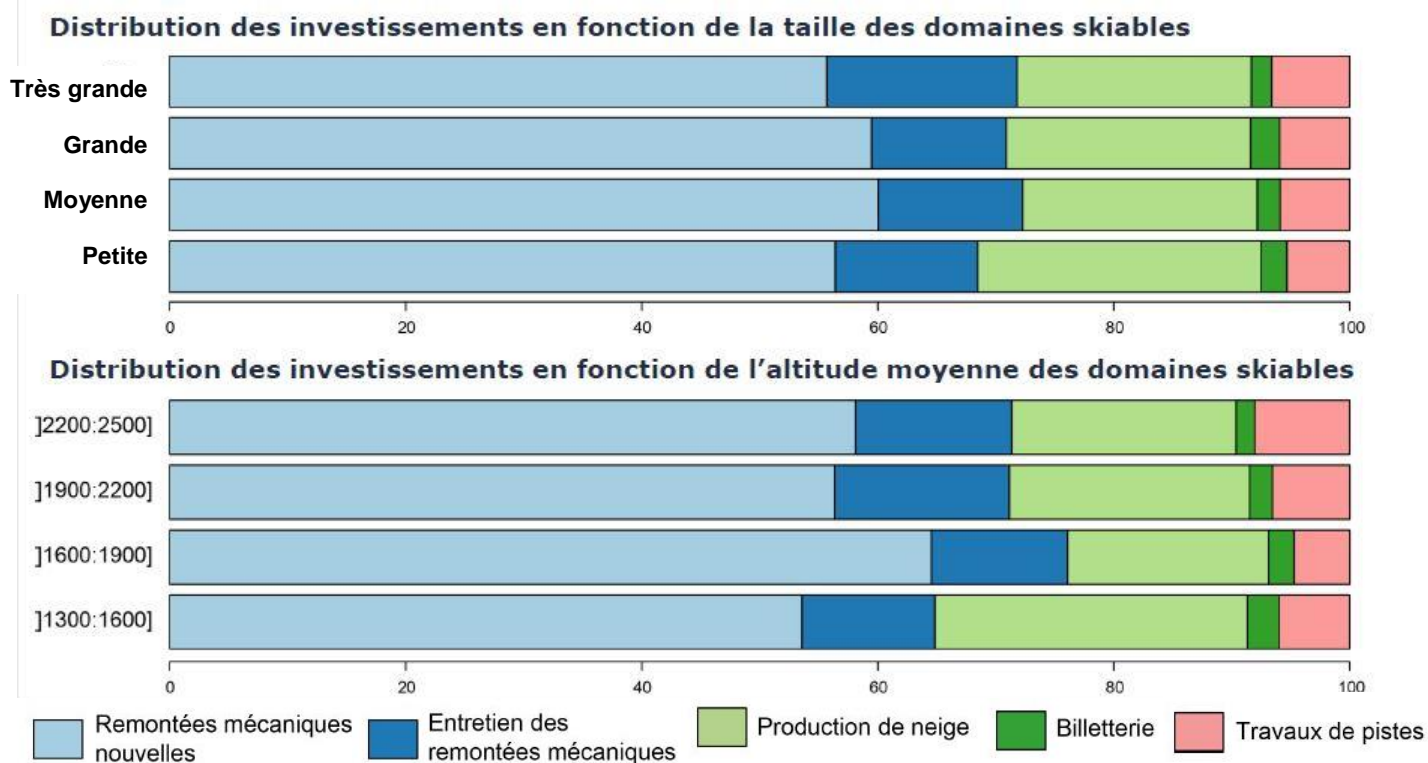
Enneigement en pré-saison à la Plagne (Savoie) L.Berard-Chenu

Une retenue d'altitude permet de stocker l'eau prélevée tout au long de l'année en prévision des besoins hivernaux. La retenue permet à l'exploitant de domaine skiable de disposer d'un stock d'eau, prélevé dans le milieu naturel en respectant le débit réservé pour le fonctionnement des écosystèmes.

La réalisation de retenues d'altitude est donc un aménagement devenu indispensable pour les exploitants de domaine skiable dans leur stratégie de production de neige.



Différents investissements réalisés par les exploitants de domaines skiables (2004-2016)



Explication du graphique : la taille des domaines skiables (Très grande, Grande, Moyenne, Petite) est définie par le syndicat professionnel des Domaines Skiables de France. Il est basé sur le moment de puissance, un indicateur qui mesure la capacité des remontées mécaniques (nombre de skieurs/heure * dénivelé). La taille des domaines skiables est donc fonction de la puissance du parc de remontées mécaniques de chaque station.

Concernant le second graphique, les classes d'égale amplitude (300m) répartissent les stations en fonction de l'altitude moyenne de leur domaine skiable.

La construction de retenues d'altitude nécessitent donc de disposer :

- d'un emplacement suffisant sur le domaine skiable pour implanter ce type d'ouvrage.
- des autorisations administratives autorisant les aménagements
- des ressources financières nécessaires. L'ensemble des investissements associés à la production représente le 2^{ème} poste d'investissement des opérateurs de domaines skiable, soit 20% de leurs capacités d'investissement. Cette tendance s'observe dans l'ensemble des domaines skiables et de manière assez similaire, quelle que soit la taille de la station ou son altitude.

Le stockage de l'eau a donc un coût et nécessite des aménagements d'envergure. Par ailleurs ces équipements implantés en montagne se font souvent dans des écosystèmes fragiles (par ex. zones humides).

5. Quelles seraient les conséquences de l'amplification des changements climatiques dans les territoires touristiques de montagne ? Quelles conséquences pour la production de neige et l'eau en montagne ?

Compte-tenu des effets du changement climatique estimés dans les prochaines décennies, plusieurs conséquences se dessinent :

- La diminution prévue de l'enneigement devrait entraîner un recours plus important à la production de neige pour combler des déficits croissant en neige naturelle.
- L'augmentation des besoins en production de neige se traduirait par une augmentation des volumes d'eau prélevés.
- D'autres retenues pourraient être donc être nécessaires, avec des coûts supplémentaires pour les exploitants de domaines skiables et des aménagements supplémentaires dans les espaces de montagne.

L'augmentation des volumes d'eau nécessaires à la production de neige pourrait se retrouver en tension avec d'autres usages de l'eau présents en montagne. Par ailleurs, une augmentation des températures risque de rendre la production de neige de plus en plus difficile, notamment à basse altitude puisque la production de neige nécessite des températures négatives.

En plus de l'évolution des besoins en eau, la disponibilité de la ressource va varier sous les effets du changement climatique. Le volume annuel moyen de précipitation devrait rester constant, mais sa distribution devrait varier. On pourrait ainsi assister :

- à des épisodes pluvieux moins fréquents mais plus intenses.
- à une diminution des précipitations sous la forme de neige qui devrait conduire à un pic de fonte moindre et plus précoce dans la saison. Ceci pourrait donc entraîner une modification du régime hydrologique.

6. Listez les différents usages en eau en territoire de montagne et les enjeux associés

Intérêt pédagogique : L'objectif est d'amener les étudiants à compléter un tableau de synthèse qui se veut une proposition des différents usages que l'on retrouve en montagne et des différents enjeux qui y sont associés. Outre les colonnes proposées, ce tableau peut être enrichi par d'autres éléments ou servir de base à une discussion avec les étudiants

TYPE D'USAGE	PROVENANCE	PÉRIODE DE L'ANNÉE	ENJEUX
ÉCOSYSTÈME	Mix eau surface / eau souterraine	toute l'année	nécessité de respecter les débits réservés
PASTORALISME	eau de surface	été	besoin d'un accès à l'eau dans les alpages
PRODUCTION DE NEIGE	eau de surface	en hiver et toute l'année si stockage avec retenue	évaporation lors de la production (15%), + évaporation lors du stockage. restitution différée dans le temps. nécessite des aménagements
USAGE POUR LE TOURISME	eau souterraine	principalement en hiver et en été	traitement des eaux usées avant restitution au milieu, pics de consommation en fonction de la fréquentation touristique
SOCIÉTÉS EN MONTAGNE	eau souterraine	toute l'année	traitement des eaux usées avant restitution au milieu
HYDROÉLECTRICITÉ	Mix eau surface / eau souterraine	toute l'année	restitution différée entre amont et aval
PÊCHE	eau de surface	toutes les saisons hors hiver	
BESOINS INDUSTRIELS	eau de surface	toute l'année	nécessite un traitement des eaux usées avant restitution, possibles forts prélèvement, voire consommation, en fonction des industries.
AGRICULTURE IRRIGUÉE	Mix eau surface / eau souterraine	été	forte consommation

4. RESSOURCES ET REFERENCES

1. Ressources complémentaires

Vidéos

- Site du Col de Porte avec Hugues François (INRAE) + critique d'une retenue d'altitude à la Clusaz, France 24, 02/2022, <https://youtu.be/YKQQVE2Vhe8?t=225>
- Le futur des stations de l'Isère avec Samuel Morin (ex-directeur du Centre d'Etudes de la Neige du CNRM (CNRS - Météo-France)), France 3, 12/2018 <https://www.youtube.com/watch?v=xkyMerKZAY4>
- Reportage Xenius - *Les sports d'hiver sont-ils sur une pente glissante ?* Diffusé sur ARTE 12/2020 à 05h55

Ressources en ligne

- Alpes : un mois d'enneigement perdu en 50 ans, <https://meteofrance.com/changement-climatique/observer/la-neige-dans-les-alpes-en-diminution-depuis-50-ans>
- Impacts du changement climatique : Montagne et Glaciers, <https://www.ecologie.gouv.fr/impacts-du-changement-climatique-montagne-et-glaciers>
- Tourisme de montagne : la transition des stations de sport d'hiver face à la fragilité de l'enneigement, <https://www.inrae.fr/actualites/tourisme-montagne-transition-stations-sport-dhiver-face-fragilite-enneigement>

2. Références

- Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & Montfalcon, A. (2007). Climate change in the European Alps : Adapting winter tourism and natural hazards management. *Climate Change in the European Alps: Adapting Winter Tourism and Natural Hazards Management*. <https://www.oecd.org/env/cc/climatechangeintheeuropeanalpsadaptingwintertourismandnaturalhazardsmanagement.htm>
- Berard, L. (2021). *Trajectoires d'évolution des stations de sports d'hiver des Alpes françaises : La place de la production de neige* (Numéro 2021GRALH018) [Theses, Université Grenoble Alpes [2020-....]]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03555501>
- Berard-Chenu, L., François, H., George, E., & Morin, S. (2022). Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019. *The Cryosphere*, 16(3), 863-881. <https://doi.org/10.5194/tc-16-863-2022>
- DSF, Ecole du Ski français, & ANMSM. (2018). *La neige de culture—Les fondamentaux*. Domaines Skiabiles de France. http://www.domaines-skiabiles.fr/fr/smedia/filer_private/72/b2/72b2fbef-3ffb-452c-98e7-bcd957b72f07/la-neige-de-culture-cest-quoi.pdf
- Gauchon, C. (2009). Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : Un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée. In *Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques* (p. 193-204). Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8. <https://hal.archives-ouvertes.fr/halsde-00404054>
- Hock, R., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B., Steltzer, H., Allen, S., Arenson, L., Baneerjee, S., Barr, I., ... Zhang, Y. (2019). *High Mountain Areas* (p. 131-202). IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-414230>

- IPCC, 2019. (in press). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (p. 765). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/12/SROCC_FullReport_FINAL.pdf
- Knafou, R. (1978). *Les stations intégrées de sports d'hiver des Alpes françaises : L'aménagement de la montagne à la « française »*. Masson.
- Matiu, M., Crespi, A., Bertoldi, G., Carmagnola, C. M., Marty, C., Morin, S., Schöner, W., Cat Berro, D., Chiogna, G., De Gregorio, L., Kotlarski, S., Majone, B., Resch, G., Terzago, S., Valt, M., Bezzo, W., Cianfarra, P., Gouttevin, I., Marcolini, G., ... Weilguni, V. (2021). Observed snow depth trends in the European Alps : 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15(3), 1343-1382. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1343-2021>
- Spandre, P., François, H., Morin, S., & George-Marcelpoil, E. (2015). Dynamique de la neige de culture dans les Alpes Françaises. Contexte climatique et état des lieux. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 103-2. <https://doi.org/10.4000/rga.2840>
- Vanat, L. (2020). *2020 International Report on Snow & Mountain Tourism*. Laurent Vanat Consulting. www.vanat.ch/RM-world-report-2020.pdf