



Analyse prospective des effets du changement climatique sur les paramètres du bilan de l'eau des zones humides alpines (Savoie)



Avril 2023

CONTEXTE

Cette prestation est inscrite au projet de « Valorisation et renforcement des projets de restauration écologique d'habitats dans les Alpes (RestHAlp+) », financé par l'Union européenne *via* le programme Interreg ALCOTRA, et la Région Auvergne Rhône-Alpes.

L'étude s'inscrit dans une contribution à l'évaluation des services écosystémiques des zones humides dans le cadre du projet RestHAlp+.

Objet de l'étude

Mobiliser les données et indicateurs disponibles (Météo France, DRIAS, modèles climatiques, etc.) pour établir une analyse de l'évolution des paramètres du bilan de l'eau des zones humides alpines (précipitations, enneigement, températures, vent, évapotranspiration) ;

Décrire deux cadres d'évolution de ces paramètres, celui des fonds de vallée alpines (sites de Chautagne, Sud-Lac du Bourget, Chassettes et la Plesse) et celui des sommets et versants d'altitude (sites de Montendry, Plan de l'Eau, Beaufortin et Prasuppiaz).

Auteur de l'étude

Christophe Chaix, Agence Alpine des Territoires

CRITERES D'ANALYSE

Choix des portails d'information

Pour réaliser cette étude, nous utiliserons le portail DRIAS, Les futurs du Climat, qui met à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM). Les informations climatiques sont délivrées sous différentes formes graphiques ou numériques.

<https://www.drias-climat.fr/>

<https://www.drias-eau.fr/>

Choix du scénario climatique

Afin de caractériser les évolutions des paramètres climatiques sur les quatre zones étudiées, tout en évitant la multiplication des approches et des scénarios, il a décidé, en amont, de ne conserver que le scénario d'émission **RCP8.5** pour cette étude (scénario sans politique climatique, forçage radiatif : $>8,5W.m^{-2}$ en 2100 ; concentration : >1370 eq-CO₂ en 2100). Il s'avère en effet que ce scénario permet d'obtenir non seulement des projections sur le moyen terme (H2) qui sont proches de celles des autres scénarios, et, contrairement au RCP4.5 (qui se stabilise après 2070), d'utiliser sur l'horizon lointain des projections très marquées en termes d'impacts et donc d'incidence sur l'objet d'étude.

Les horizons disponibles

H1 : horizon proche, 2021-2050,

H2 : horizon moyen, 2041-2070,

H3 : horizon lointain, 2071-2100

REF : période de référence, 1976-2005

Les pas de temps disponibles :

Hiver, printemps, été, automne

Pour les données d'enneigement : janvier, février, mars, avril, novembre, décembre.

Choix des simulations et de la méthode de calcul.

Il existe plusieurs expériences disponibles sur la plateforme qui produisent différents types d'indices. Ces expériences utilisent une variété de modèles issu de l'ensemble EURO-CORDEX. Le nombre de modèle est de 12 à 20 en fonction des expériences. Nous avons utilisé pour cette étude les simulation **DRIAS 2020** pour les paramètres atmosphériques et hydriques, **EXPLORE2** pour les paramètres hydriques, et **ADAMONT 2017** pour les paramètres d'enneigement.

Les données obtenues sont fournies soit :

- sous forme de valeur quotidienne pour chaque modèle,

- sous forme d'indicateurs mensuels, saisonniers ou annuels par horizon ou sous forme de série temporelle, pour chaque modèle
- sous forme de quantiles permettant de sélectionner des valeurs remarquables d'un ensemble de modèles (approche multi-modèles).

L'intérêt de cette dernière approche est lié à la prise en compte de l'incertitude. L'utilisation de la médiane permet de séparer les 50% des valeurs les plus faibles et les plus fortes. L'utilisation des quartiles Q25 et Q75 (ou autres) permet de visualiser les valeurs étirées de la distribution et donc des incertitudes.

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'utiliser **la médiane** de chaque indicateur pour les ensembles de modèles associés aux expériences. L'avantage est de limiter le champ de représentation des données, tout en gardant une valeur intégrant la dispersion des résultats (multi-modèles), l'inconvénient étant de ne pas avoir à disposition l'écart entre des quartiles et donc la plage d'incertitude finale.

Choix des indicateurs

Afin d'évaluer l'évolution des services écosystémiques des zones humides sur les quatre territoires de l'étude en fonction du changement climatique, une liste de 17 indicateurs a été défini.

Indicateurs (ref ou écarts)	Définition	Code
Nombre de jours de gel	$T_n \leq 0^\circ\text{C}$	TNFD
Nombre de journées d'été	$T_X > 25^\circ\text{C}$	SD
Nombre de jours de vague de chaleur	$T_X \geq T_{Xr} + 5^\circ\text{C}$ dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs	TXHWD
Nombre de jours de vague de froid	$T_X \leq T_{Xr} - 5^\circ\text{C}$ dans une séquence de plus de 5 jours consécutifs	TNCWD
Cumul de précipitations	mm (jour)	RR
Nombre de jours de pluie	$j \geq 1\text{mm}$	RR1MM
Nombre de jours de fortes précipitations	$j \geq 20\text{mm}$	PN20MM
Période de sécheresse	Max [Nombre de jours consécutifs $j \leq 1\text{mm}$]	PXCDD
Date de reprise de végétation	en jour julien (date)	DATEVEG
Indicateur moyen d'humidité des sols	SWI sans unité	SWIAV
ETR cumulé	mm et %	ETRC
ETP cumulée (mm)	Mm et %	ETPC
Pluie efficace cumulé	Mm et %	CWBC
Equivalent en eau du manteau neigeux (SWE moyen)	mm	SWEAV

Épaisseur de neige moyenne	cm	SNDV
Nombre de jours de dépassement d'un seuil de 5 cm	jour	SND5
Maximum d'équivalent en eau du manteau neigeux	mm	SWE

Les valeurs sont absolues pour la période de référence et en valeurs absolues pour les trois horizons. Certains indicateurs sont sans unité.

Définitions remarquables

Nombre de jours de vague de chaleur : Période anormalement chaude durant plus de 5 jours consécutifs. On détermine les jours pour lesquels la température maximale quotidienne dépasse de plus de 5 °C une valeur climatologique de référence, mais en ne sommant que les jours appartenant à une série de plus de cinq jours chauds consécutifs. La valeur de référence de chaque jour de l'année est la moyenne glissante sur cinq jours du cycle annuel moyen de la température maximale quotidienne simulée pour la période 1976-2005.

Date de la reprise de la végétation de la prairie : Les températures de sortie d'hiver déterminent la reprise de croissance de la prairie puis la possibilité de pâturer. Le réchauffement climatique impactant les températures d'hiver et de printemps, cela entraîne l'avancement des dates de reprise de végétation puis de mise à l'herbe. La date de reprise de végétation est déterminée au moyen d'un cumul thermique (somme de température en base 0°C) à partir du 1er janvier de chaque année. La date de reprise de végétation est le premier jour où le seuil de 200°C est atteint.

Pluie efficace cumulée [mm] : Cumul des pluies efficaces quotidiennes de la période (pluie efficace : différence entre les précipitations totales quotidiennes et l'évapotranspiration réelle quotidiennes)

Indicateur moyen d'humidité des sols (SWI) : Moyenne des SWI quotidiens de la période. Pour rappel le SWI est le rapport entre l'eau utilisable par la plante sur l'eau utilisable par la plante si le sol était parfaitement saturé d'eau (après écoulement gravitaire). Le SWI dépend donc de l'humidité du sol mais aussi de la nature des sols. Ainsi un SWI de 0.4 nous dit que la réserve utile pour les plantes est remplie à 40%, un SWI négatif indique qu'il n'y a plus d'eau disponible pour les plantes. C'est pour cela que le SWI dépend de la nature des sols.

L'indice d'humidité des sols SWI est défini comme suit : $SWI = (W - W_{wilt}) / (W_{fc} - W_{wilt})$ où W est le contenu intégré en eau du sol, W_{wilt} le contenu en eau au point de flétrissement et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ.

Standardized Soil Wetness Index (SSWI) : Le SSWI est un indice permettant de mesurer la sécheresse du sol. Il s'agit d'un indice de probabilité qui repose sur l'indice d'humidité du sol (SWI). Les probabilités sont standardisées de sorte qu'un SSWI de 0 indique une quantité de précipitation médiane (par rapport à une climatologie moyenne de référence, calculée sur 30 ans). L'indice SSWI est négatif pour les sécheresses, et positif pour les conditions humides (Mc Kee et al., 1993).

Equivalent en eau du manteau neigeux moyen (SWE) [mm] : Moyenne des SWE quotidiens de la période

L'équivalent en eau du manteau neigeux (SWE) modèle SURFEX : Il représente la masse totale de neige par unité de surface, et représente donc le stock d'eau potentiellement disponible au moment de la fonte. Il est utile notamment sur les reliefs des Alpes et des Pyrénées, car il joue un rôle majeur dans l'hydrologie des bassins de montagne, avec un étiage marqué en hiver en raison du stockage des précipitations sous la forme de neige, et des débits forts en fin de printemps-début d'été à cause de la fonte.

Evapotranspiration cumulée : C'est la quantité d'eau restituée à l'atmosphère par le sol et les plantes en raison des processus d'évaporation (du sol nu et de l'eau interceptée par la végétation) et de transpiration des plantes. C'est l'évaporation totale, donc principalement l'évapotranspiration réelle (ETR) + d'autres composantes de moindre importance à l'évaporation (évaporation du sol nu, sublimation de la glace, etc).

Calcul de l'ETP : <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/310>

Choix points de grille

Point de grille : point au centre d'un carré de 8km de côté. Les données de la période de référence intègre les effets de l'altitude au point de grille.

Massif de la Vanoise (vallée des Belleville) = Vanoise

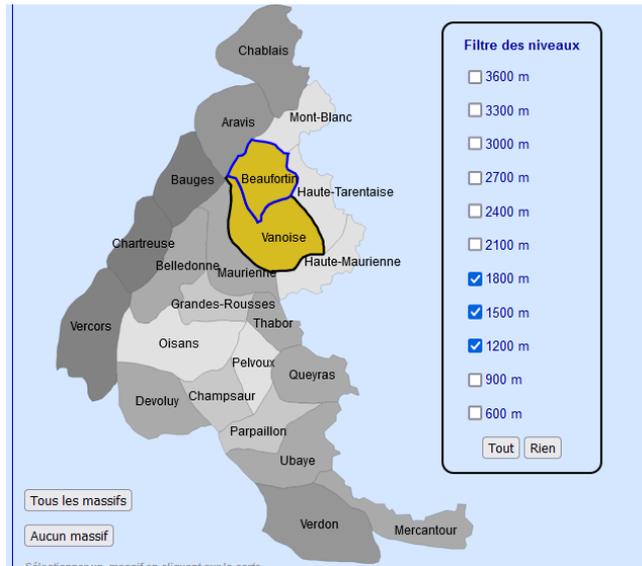
Chaines des Hurtières = Hurtières

Massif du Beaufortain = Beaufortain

Plaine de la Chautagne = Chautagne

Numéro de point	Grille SAFRAN native		Coordonnées calculées par Circé 4.2				
	Lambert II étendu		Lambert 93		Coordonnées géographiques		
	E	N	E	N	Longitude	Latitude	Altitude
7830 Vanoise	924000	2049000	971817.320	6479905.610	6.47320954	45.36473669	1729
7970 Hurtières	900000	2057000	947909.791	6488104.623	6.17227604	45.44755603	1195
8546 Beaufortain	932000	2089000	980154.985	6519797.885	6.60284304	45.72023151	1626
8681 Chautagne	868000	2097000	916284.524	6528341.551	5.78611362	45.82036624	268

Choix des massifs et des altitudes pour les indicateurs d'enneigement



L'évolution du climat en Chautagne et dans trois massifs alpins. A quoi s'attendre ?

Avec le réchauffement climatique, ce sont les vagues de chaleur et de douceur qui durent de plus en plus longtemps, et qui deviennent plus intense en termes de températures maximales sur la saison estivale dans les massifs, et aussi sur la fin de printemps et début d'automne en Chautagne.

Les cumuls de précipitations s'orientent suivant ce schéma :

- Plus de pluie en hiver, de 5% en Vanoise à 25% en Chautagne sur l'horizon moyen
- Une légère augmentation au printemps en Chautagne, mais une stagnation sur les massifs.
- Une baisse en automne sur l'horizon lointain sur l'ensemble de secteurs
- Une légère baisse en été dès l'horizon moyen, mais qui devient sévère sur l'ensemble des secteurs à l'horizon lointain.
- Un nombre de jour de pluie en rapport avec l'évolution des cumuls, en légère baisse l'été et en automne, et en légère hausse l'hiver.
- Un nombre de jour de forte précipitation qui s'n'évoquent pas dans les massifs, et en légère hausse en hiver et au printemps en Chautagne

Le nombre de de période de sécheresse, indicateur atmosphérique, n'évolue donc que très peu lui aussi sauf en été en Chautagne et dans le massif des Hurtières sur l'horizon lointain (lié à l'altitude).

Ces informations confirment que le réchauffement des températures s'effectuera dans un contexte de maintien des cumuls de pluie annuels, mais en hausse l'hiver et en baisse l'été et l'automne. Attention toutefois aux incertitudes qui restent assez fortes sur les modélisations des précipitations.

Les indicateurs hydriques confirment ces tendances eux aussi. L'ETP augmente de façon significative au printemps et en été, notamment en Chautagne et dans les Hurtières. Dans le même temps, l'ETR augmente légèrement au printemps mais stagne en été. La différence ETP / ETR s'accroît sur l'été dès l'horizon moyen et en basse altitude. C'est bien sûr à ces périodes que les pluies efficaces, correspondant au bilan hydrique ou sécheresse hydrologique, chutent.

Les pluies efficaces baissent entre 10 et 20% sur le moyen et le long terme en montagne, principalement en été mais aussi au printemps et automne. Les valeurs sont nulles sur l'horizon moyen et lointain en été, et sur l'ensemble de l'été en Chautagne. Toutefois, cette situation de sécheresse hydrologique est déjà courante sur la saison estivale en période de référence ou période actuelle. Elle va s'accroître sur la fin de printemps en montagne.

L'indice SWI montre une forte probabilité de sécheresse des sols lorsqu'il est inférieur à 0.4. Ce n'est le cas que pour la Chautagne, et ce dès l'horizon de court terme. La montagne ne sera a priori pas soumise à ce type de sécheresse.

Sur les conditions d'enneigement, on peut retenir une forte diminution de l'épaisseur du manteau neigeux, d'autant plus importante qu'on descend en altitude (à l'horizon moyen, de -20% à 2100m à -50% à 1200m). La baisse devient vertigineuse à l'horizon lointain avec le scénario RCP 8.5.

On constate aussi que cette baisse sera plus forte sur le mois d'avril, le manteau neigeux pouvant disparaître à l'horizon moyen à 1200m et devenir rare à 1500m sur ce mois. On observe aussi que le maximum de hauteur du manteau neigeux passera de mars à février à l'horizon moyen au-dessus de 1800m.

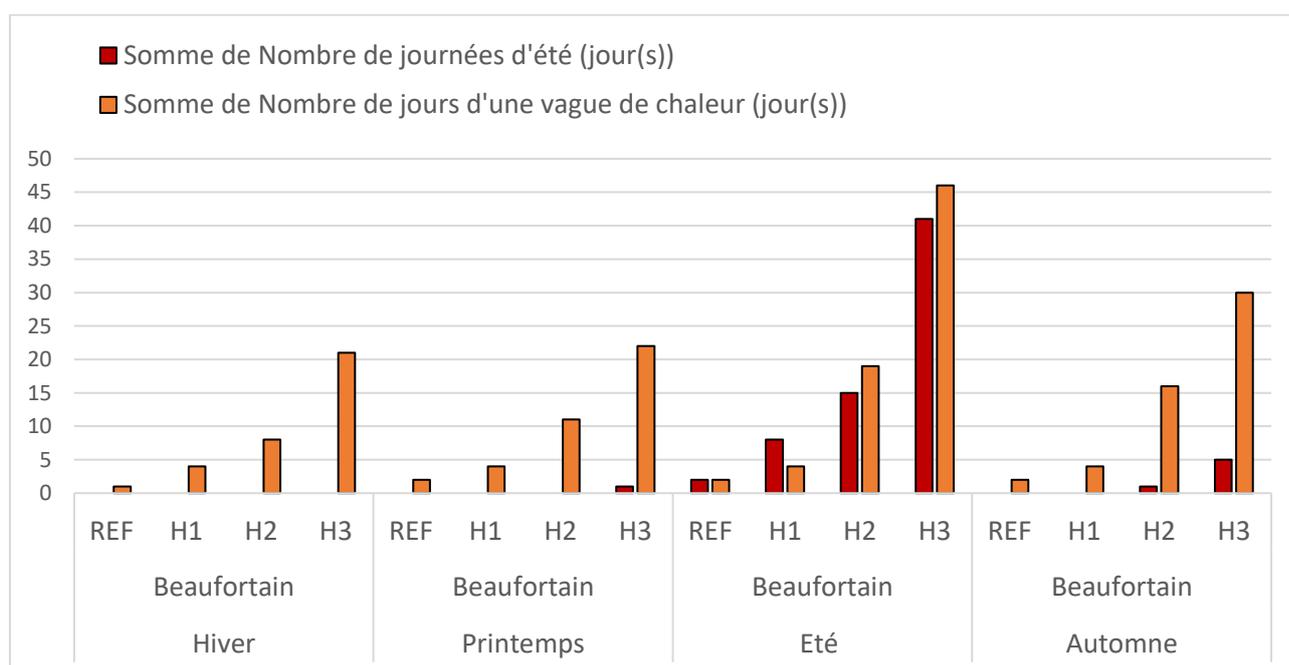
En termes d'équivalence en eau du manteau neigeux, les évolutions les plus importantes se remarquent sur les mois de mars et avril, avec des diminutions très fortes pouvant aller par exemple dans le Beaufortain à 1500m à horizon moyen de 25% en mars et 50% en avril ! Couplée à une baisse des pluies efficaces sur la fin de printemps, une avancée de la date de végétation et une hausse des températures, c'est sur cette période que l'on peut attendre l'une des évolutions les plus drastiques en termes hydriques en montagne.

ANALYSE DETAILLEES DES DONNEES

Massif du Beaufortain

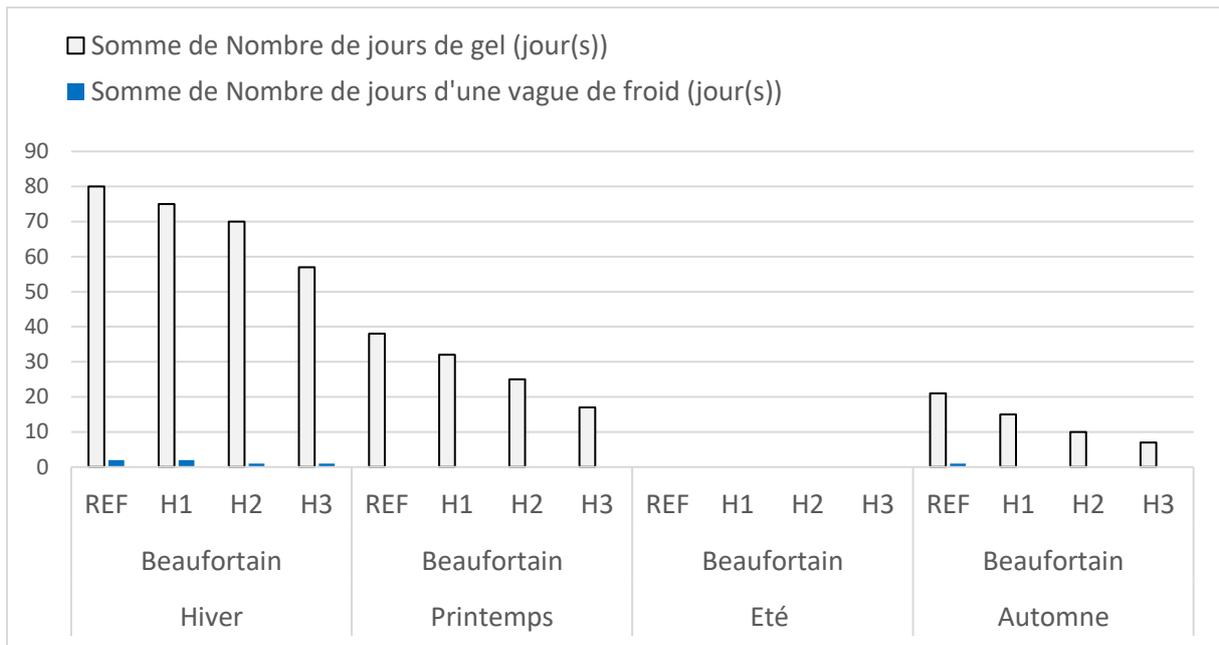
Les indicateurs de températures

A une altitude approximative de 1500m, le climat du Beaufortain (et des massifs préalpins) devrait évoluer vers une augmentation significative des températures sur toutes les saisons. L'indicateur vagues de chaleur, qui décrit l'enchaînement de journées anormalement chaudes (anomalies des TX > 5°C) et donc l'installation durable de types de temps doux en hiver et très chauds en été, atteint des écarts importants par rapport au climat actuel, tout d'abord multiplié par 2 ou 3 en H2, et par 10 en été en H3, comme le montre le graphique ci-dessous. Cela pourrait se traduire par 1 semaine par mois d'été de vagues de chaleur ou une à deux longues vagues de chaleurs (plus de 10j). Ces vagues de chaleur estivale sont concomitantes avec l'augmentation des journées > 25°C. Là aussi la différence entre H2 et H3 reste importante, leur nombre restant « mesurées » dans un premier temps (15j/été) puis 1/3 des journées estivales en H3.

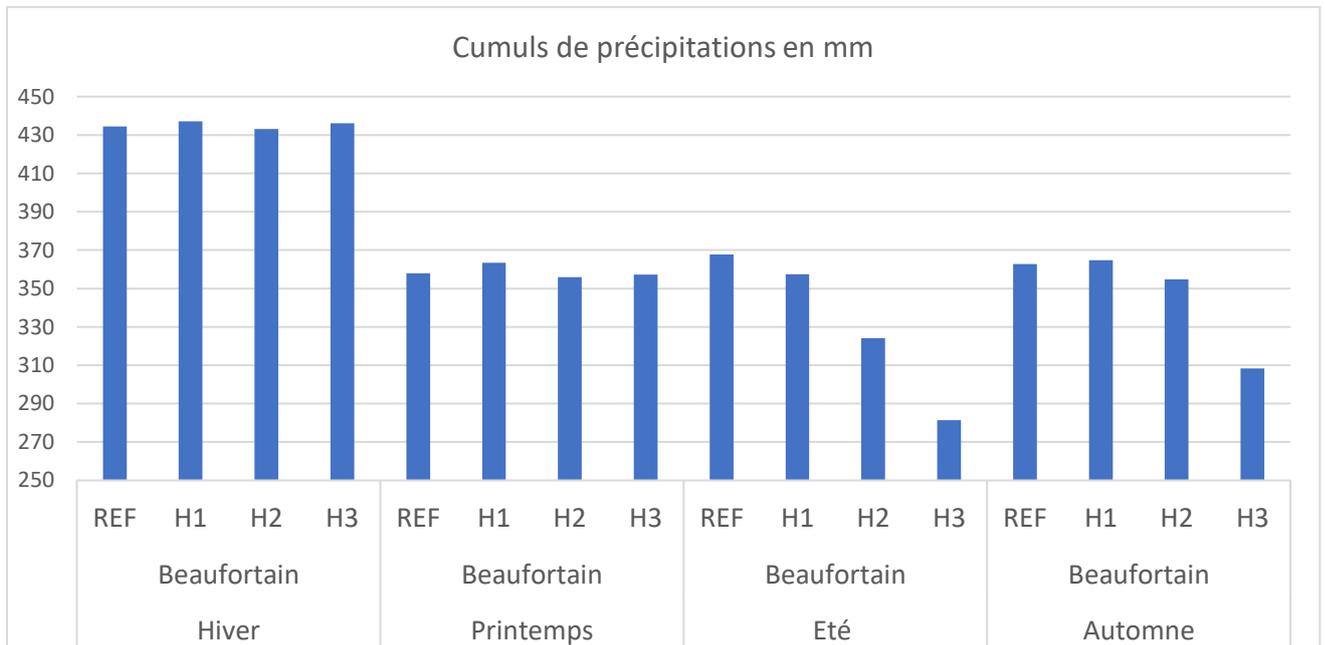


Le nombre de jour de gel à cette altitude diminue logiquement, de -12% en H2 (10j en moins) à -30% en H3 en hiver, et de façon plus importante au printemps (-35% en H2) et en automne (-50% en H2). Il est plus fortement probable que cette érosion s'effectue par en hiver au début du mois de décembre et fin février, plutôt qu'au cœur de l'hiver.

Le nombre de jour de vagues de froid tombent à zéro puisque les températures minimales restent proche ou même supérieure à la normale (REF) dans un climat réchauffé (décalage vers la médiane).



Les indicateurs de précipitations



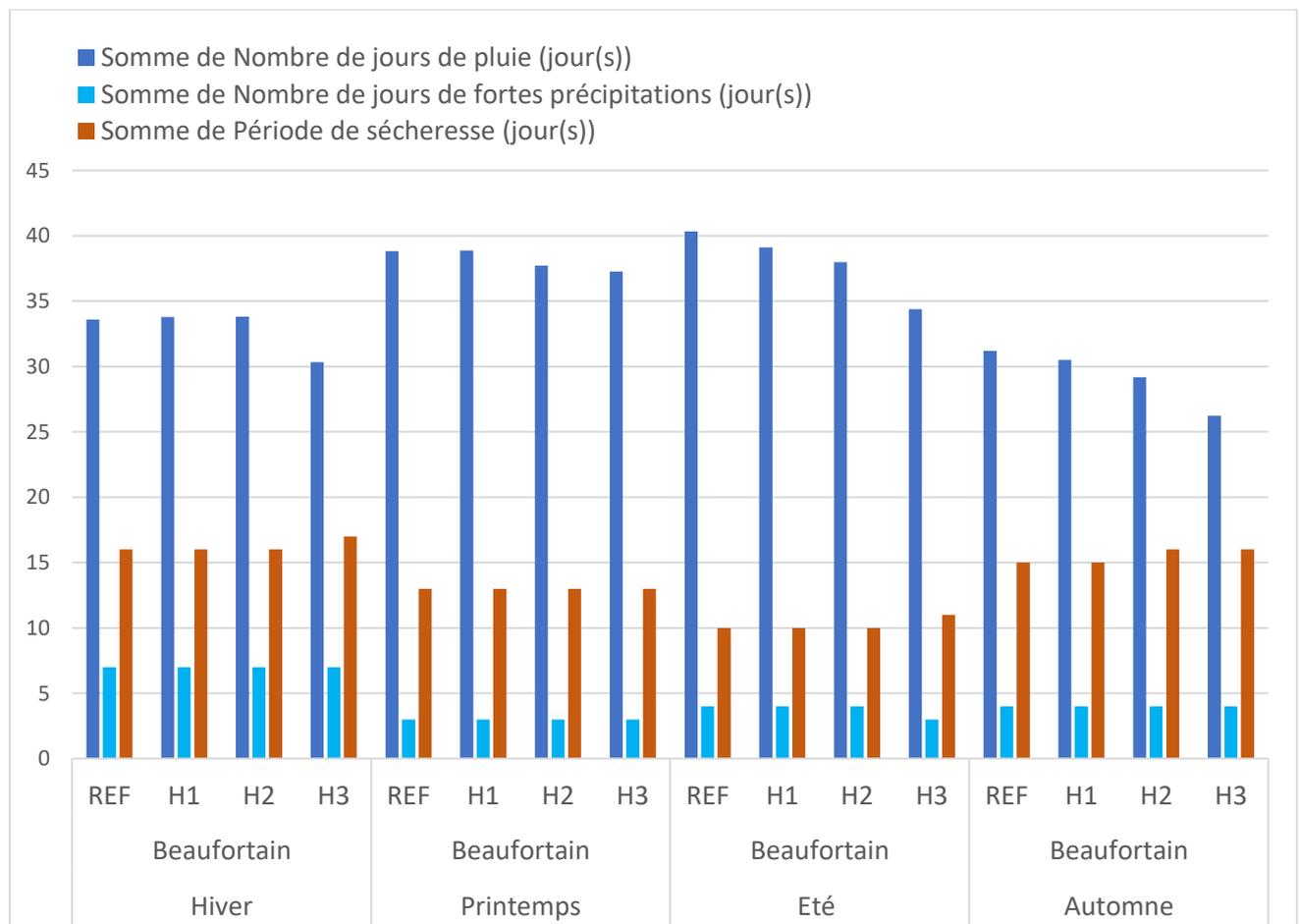
Les différentes modélisations offrent une large gamme d'incertitude sur l'évolution des cumuls de précipitation sur le long terme. Dans cette étude, l'ensemble multi-modèle propose une légère augmentation, non significative, en hiver, une stagnation au printemps, une baisse en automne sur la fin de siècle, et une baisse en été en H2 (-12%) puis en H3 (-25%). Sur des cumuls annuels, cette baisse reste très mesurée en H2.

Sur le court et moyen terme, la variabilité interannuelle l'emporte sur une tendance précise, les cumuls moyens resteront proche de la normale, avec des années et des saisons plus sèches ou

humides, mais au fur et à mesure du changement climatique d'origine anthropique, les cumuls devraient diminuer en été et en début d'automne.

Le nombre de jours de pluie baisse en été et en automne, le nombre de jours de fortes précipitations stagne. L'évolution de l'indicateur période de sécheresse n'est pas non plus significative, en très légère hausse sur l'été.

On peut conclure à des perspectives de pluies plus faibles et moins bien réparties sur les saisons estivales et automnales, alternant avec des périodes de vagues de chaleur plus longues et plus intenses.



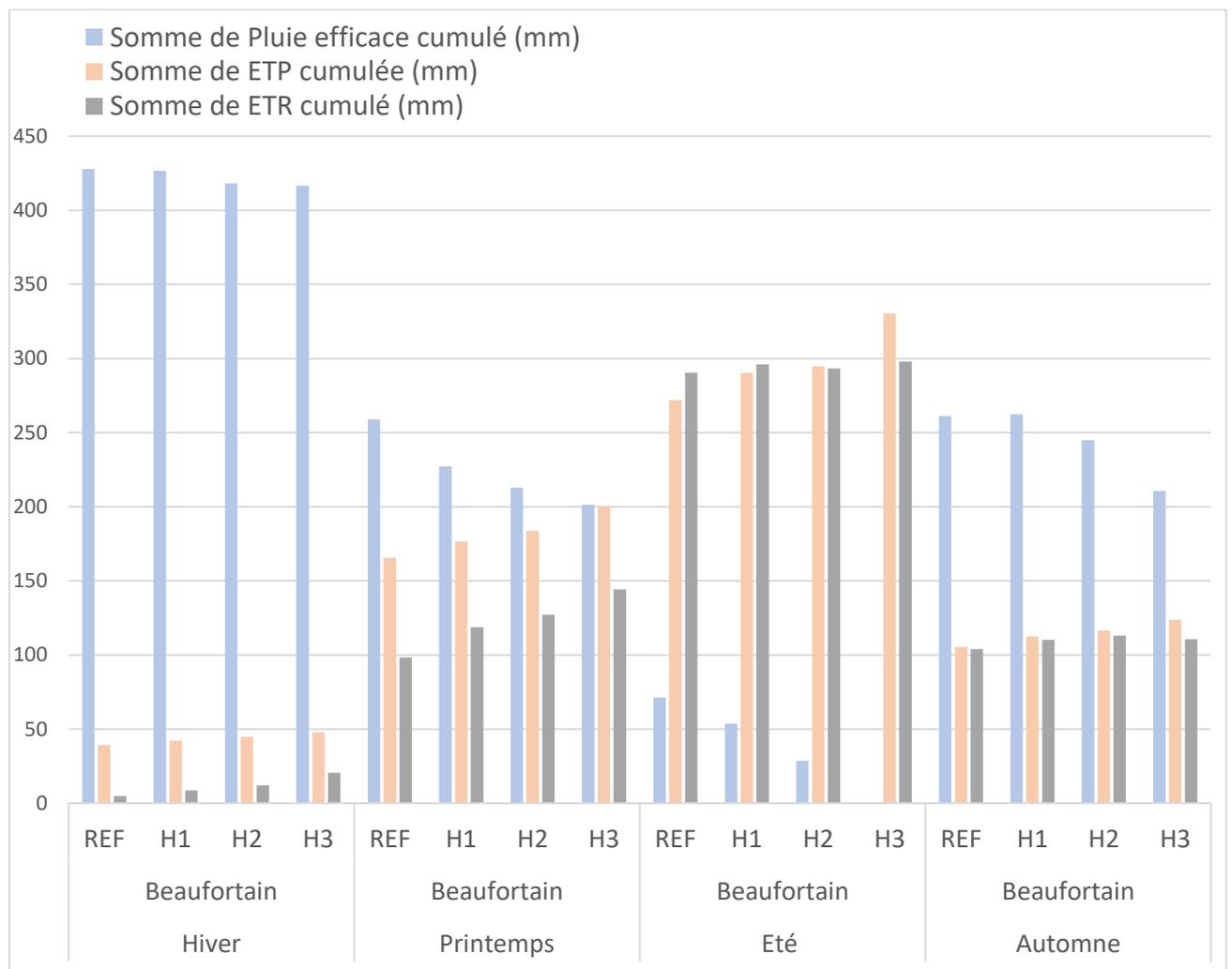
Les indicateurs hydriques

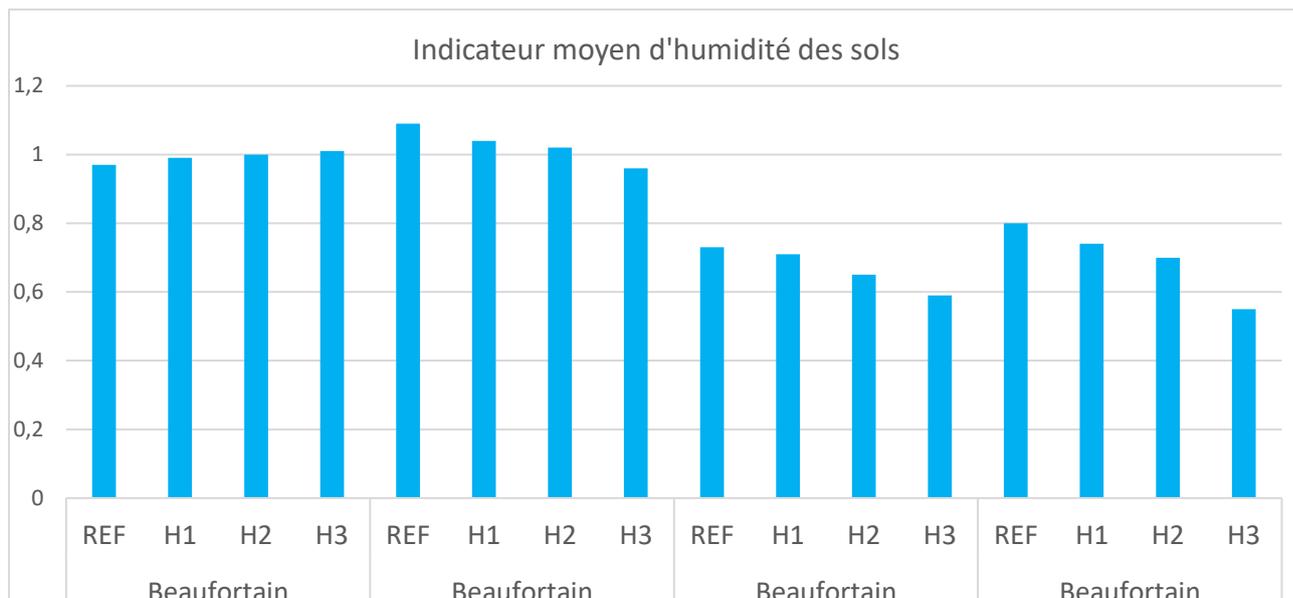
Comme attendu, les valeurs d'ETP augmentent de façon significative au printemps et surtout en été (jusqu'à 20% pour H3). En été, lorsque cette augmentation de l'ETP est concomitante avec une baisse des cumuls de pluie, l'indicateur pluies efficaces, en H2 et H3, tend vers zéro.

Les cumuls annuels de pluies efficaces, pour 1000mm en période de référence, diminuent de -11% en H2 et -18% en H3. La baisse est importante en été, avec en H3 un bilan hydrique négatif en été, et donc des sécheresses hydrologiques récurrentes. Avec la variabilité interannuelle, il faut s'attendre à

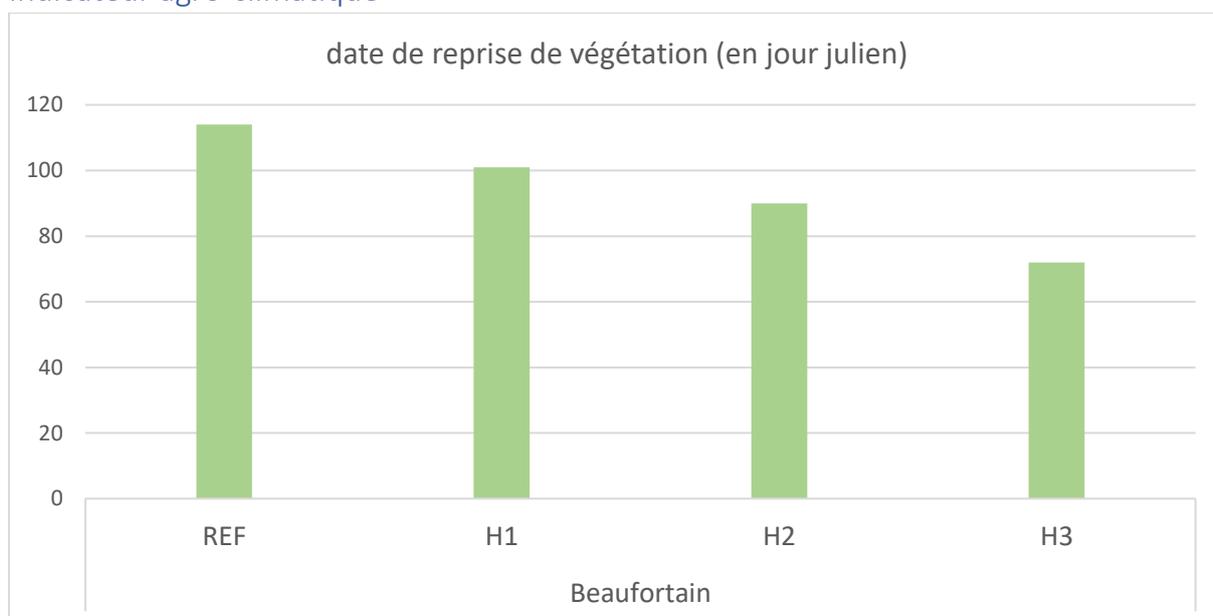
subir ce type de sécheresse même en H1 et bien sûr H2, et ce dans un massif bien arrosé comme le Beaufortain.

L'indicateur d'humidité des sols suit cette tendance avec une stagnation en hiver, mais des baisses de l'indice SWI printanières, estivales et automnales. En H3, les SWI restent toutefois supérieurs à 0.5, ce qui indique une très faible probabilité d'occurrence de sécheresse des sols par rapport à la situation de référence.





Indicateur agro-climatique

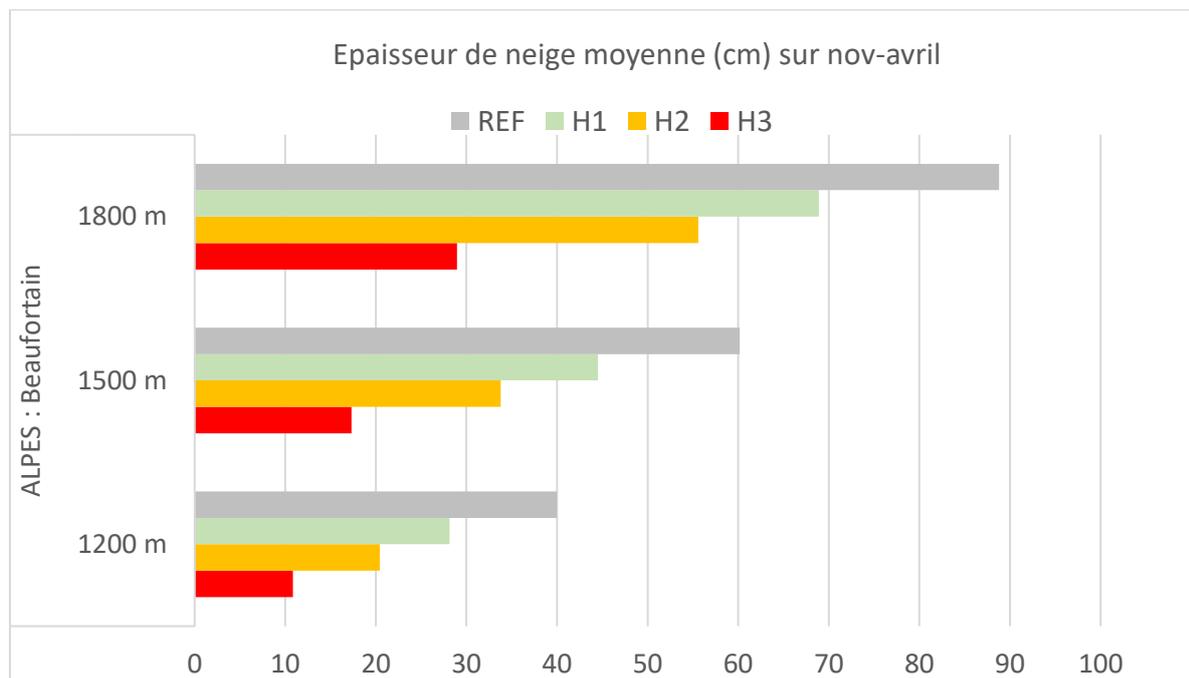


REF : 24 avril ; H1 : 11 avril ; H2 : 31 mars ; H3 : 13 mars

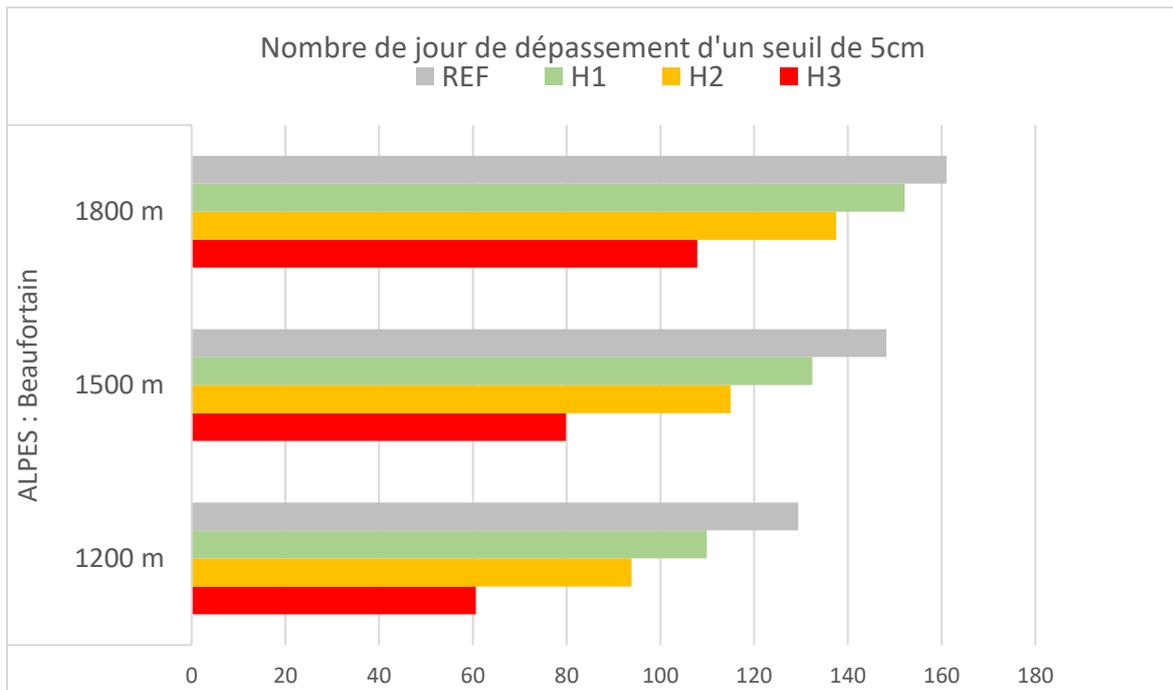
Les indicateurs d'enneigement

Les graphiques sont proposés ici avec des moyennes saisonnières. En annexe, les données mensuelles sont présentées.

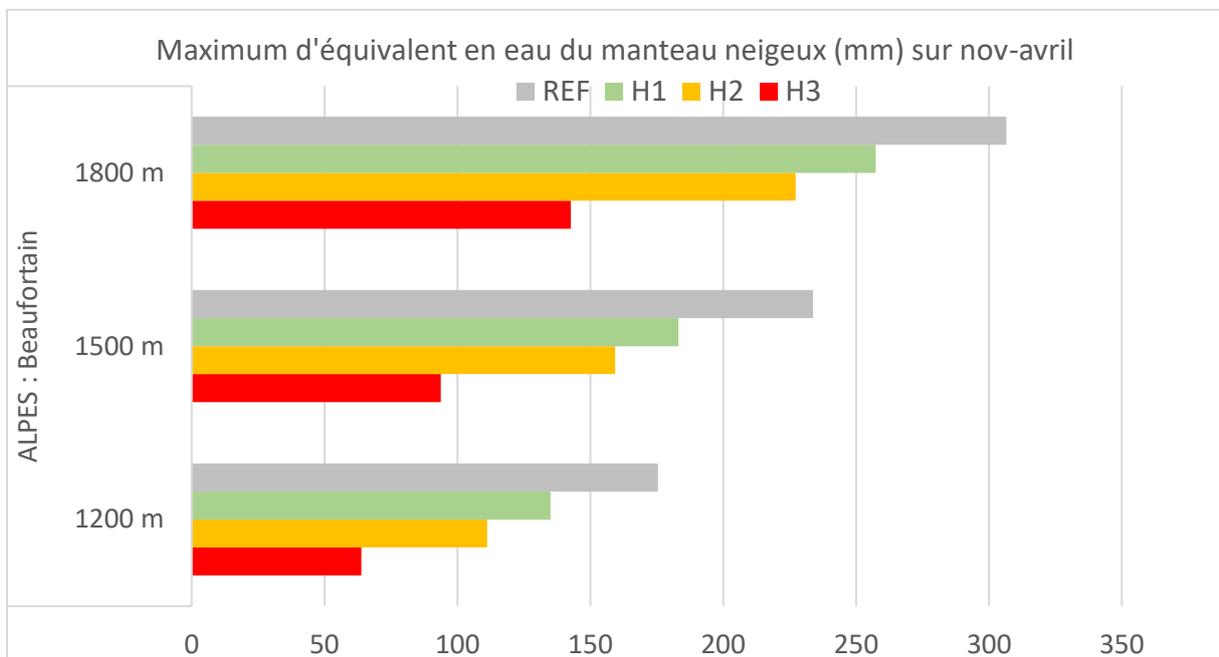
Sur les altitudes 1800 et 1500m, les modèles proposent une diminution de -25% de l'épaisseur moyenne de neige entre REF et H1 puis H2, puis de 50% entre H2 et H3, soit une réduction importante qui atteint 70% entre REF et H3. Cette réduction progresse plus rapidement sur les mois de mars et avril. Les pics de hauteur passe dès H2 de mars à février.



Sur le nombre de jour de neige au sol > 5cm, le constat est à la diminution sur les ailes de saisons (nov, dec, avril) et moins sur le cœur de l'hiver et le mois de mars. La diminution concerne un mois de réduction de neige au sol en H2 et à 1500m. La situation en avril est la plus préoccupante avec une réduction rapide de la couverture neigeuse, par exemple à 1500m de 28 j en REF à 10j en H2.



Le manteau neigeux diminuant en épaisseur et sur la durée, l'indicateur d'équivalence en eau suit la même dynamique que les indicateurs précédents : de 20 à 30% en moins sur H2 et H3, plus accentué en fonction de la période, et la baisse dépasse largement les 50% en H3, voir 80% sur avril.



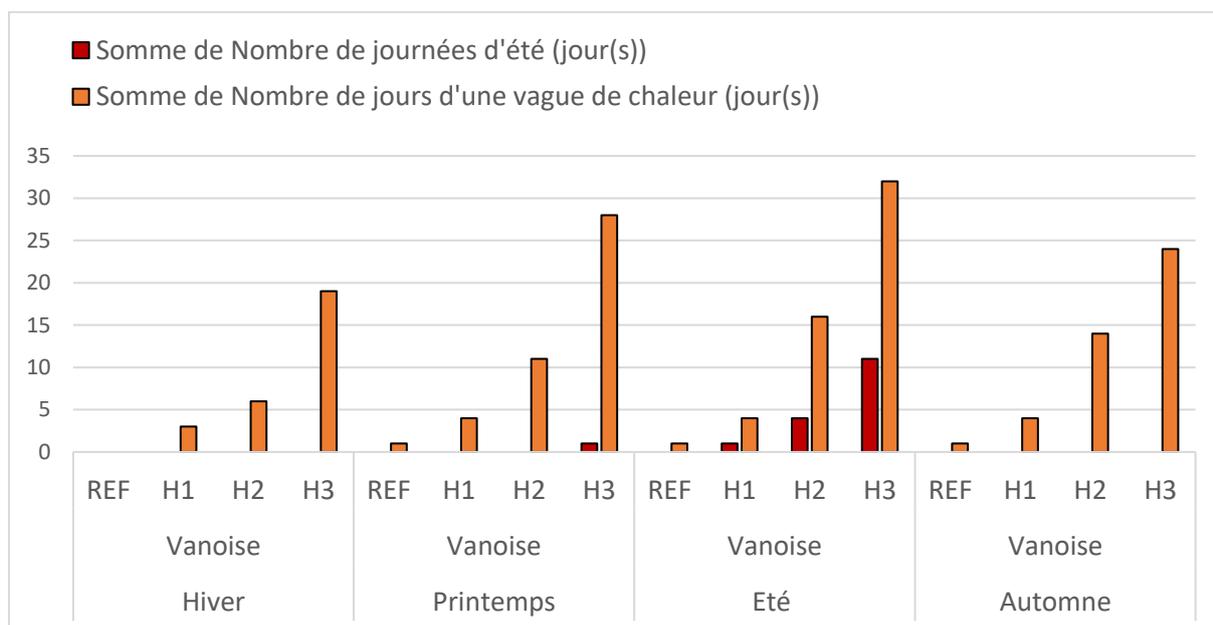
Massif de la Vanoise

Les indicateurs de températures

Des vagues de chaleur et de douceur en forte augmentation.

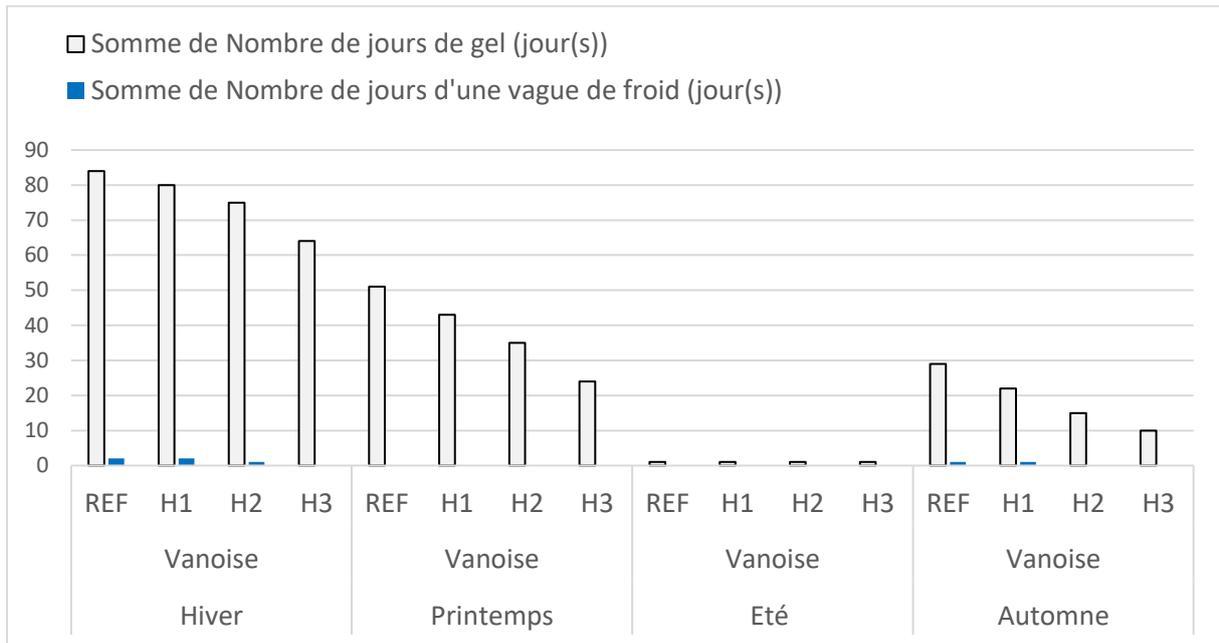
A une altitude approximative de 1700m, le climat de la Vanoise devrait évoluer aussi vers une augmentation significative des températures sur toutes les saisons. L'indicateur vagues de chaleur, qui décrit l'enchaînement de journées anormalement chaudes (anomalies des TX > 5°C) et donc l'installation durable de types de temps doux en hiver et très chauds en été, atteint des écarts importants par rapport au climat actuel, tout d'abord multiplié par 2 ou 3 en H2, et par 10 en été en H3, comme le montre le graphique ci-dessous. Cela pourrait se traduire par 1 semaine par mois d'été de vagues de chaleur ou une à deux longues vagues de chaleurs (plus de 10j). Le printemps et l'automne sont aussi exposés à ces enchaînements d'anomalies des températures maximales.

Toutefois, l'augmentation de journées chaudes reste mesurée du fait de l'altitude.

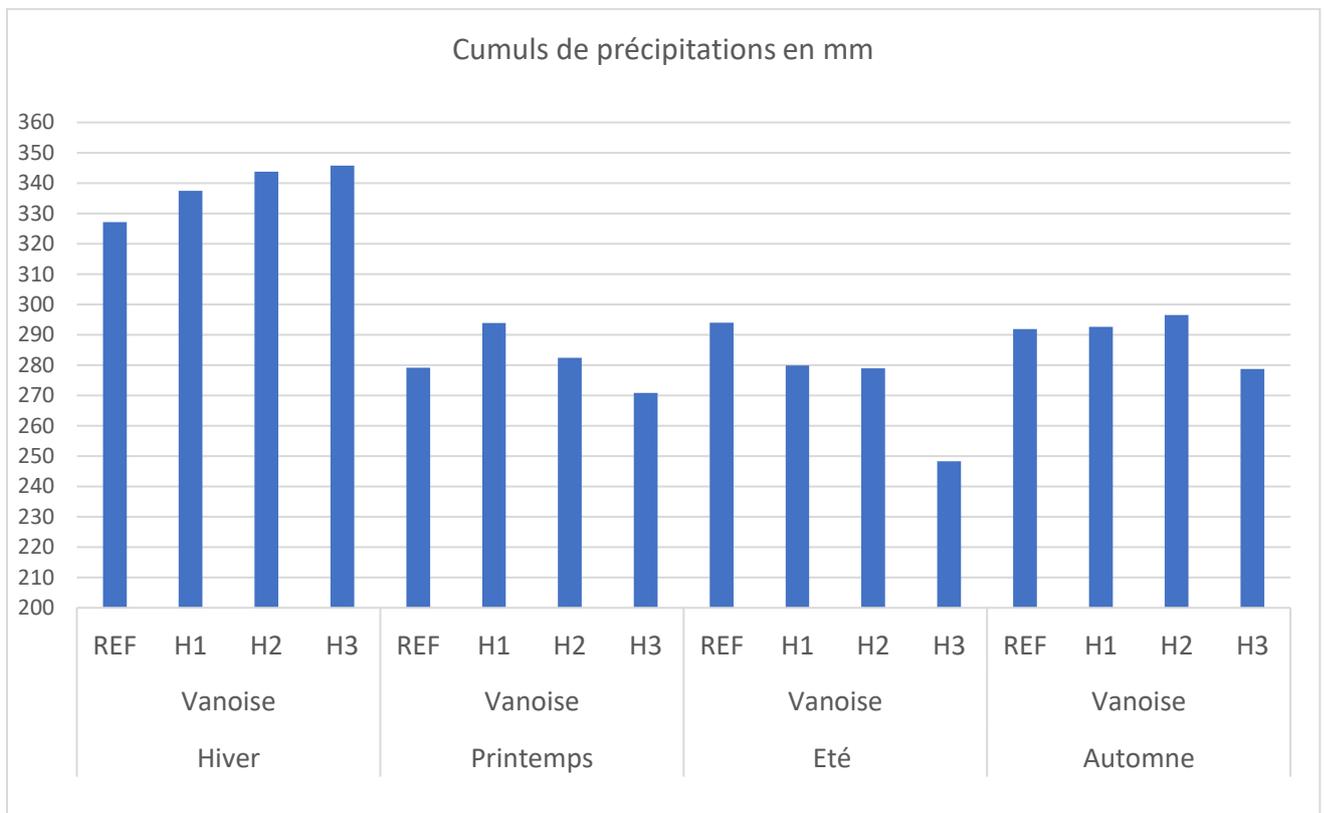


Le nombre de jour de gel à cette altitude diminue logiquement, de -12% en H2 (10j en moins) à -30% en H3 en hiver, et de façon plus importante au printemps (-35% en H2) et en automne (-50% en H2). Il est plus fortement probable que cette érosion s'effectue par en hiver au début du mois de décembre et fin février, plutôt qu'au cœur de l'hiver.

Le nombre de jour de vagues de froid tombent à zéro puisque les températures minimales restent proche ou même supérieure à la normale (ref) dans un climat réchauffé (décalage vers la médiane).



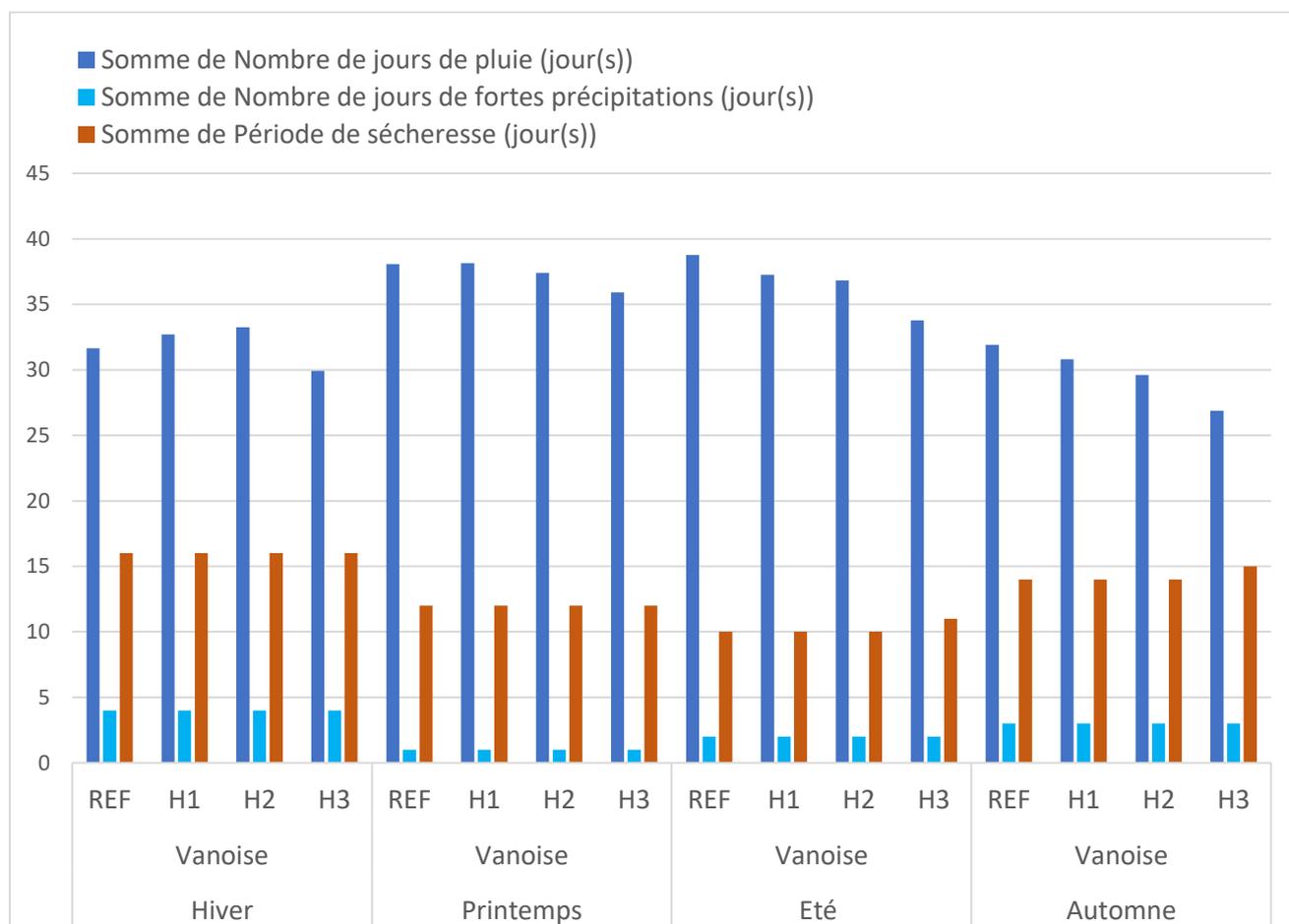
Les indicateurs de précipitations



Dans cette étude, l'ensemble multi-modèle propose une légère augmentation en hiver, une stagnation au printemps, une légère baisse en automne sur la fin de siècle, ainsi qu'en été en H2 (-6%) puis en H3 (-15%). Sur des cumuls annuels, cette baisse reste très mesurée en H2. On notera aucun changement dans les cumuls annuels.

Le nombre de jours de pluie baisse légèrement sur l'été et l'automne, rien de très significatif, à l'instar du nombre de jours de fortes précipitations qui stagne. L'évolution de l'indicateur période de sécheresse n'est pas non plus significative.

Il reste difficile de tracer des tendances claires dans l'évolution des précipitations sur le massif de la Vanoise. Des pluies moins bien réparties sur les saisons estivales et automnales, alternant avec des périodes de vagues de chaleur plus longues et plus intenses, sont toutefois à attendre.

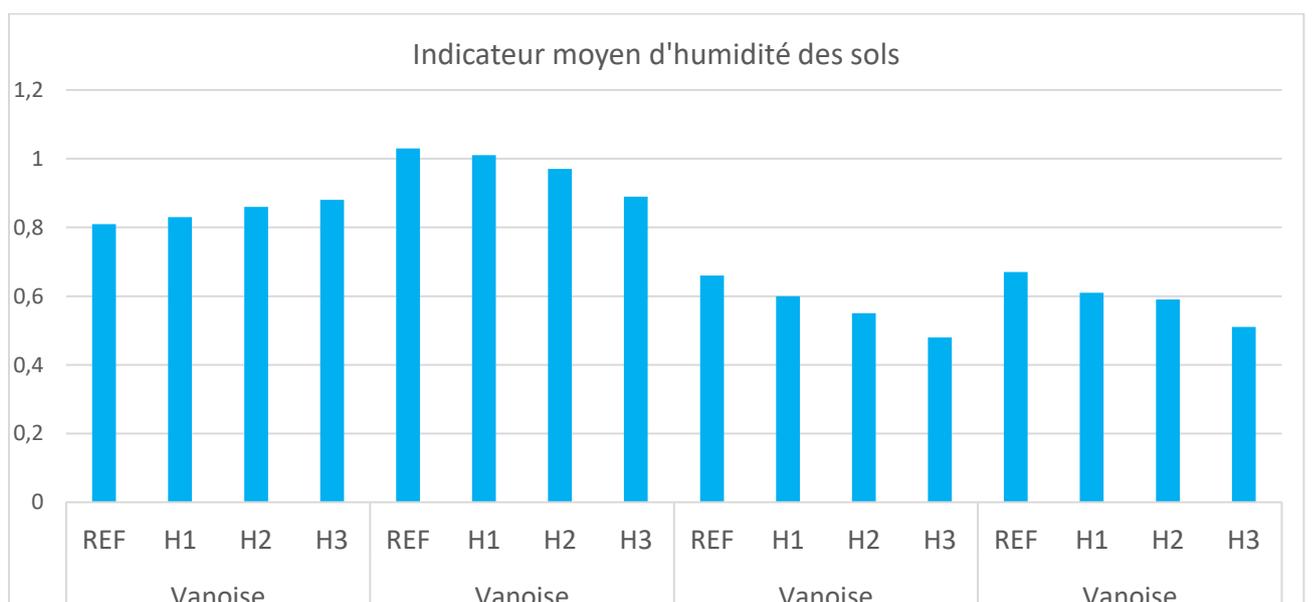
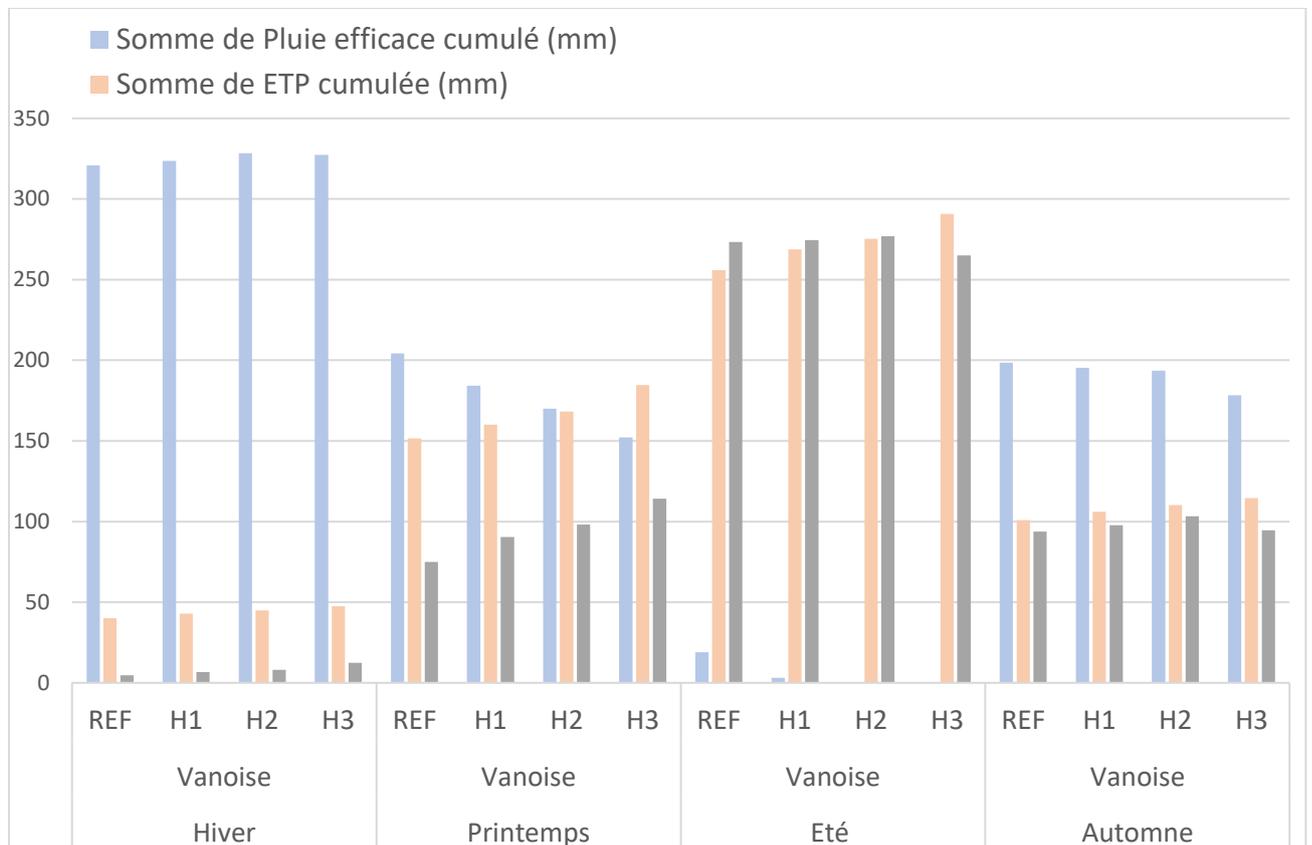


Les indicateurs hydriques

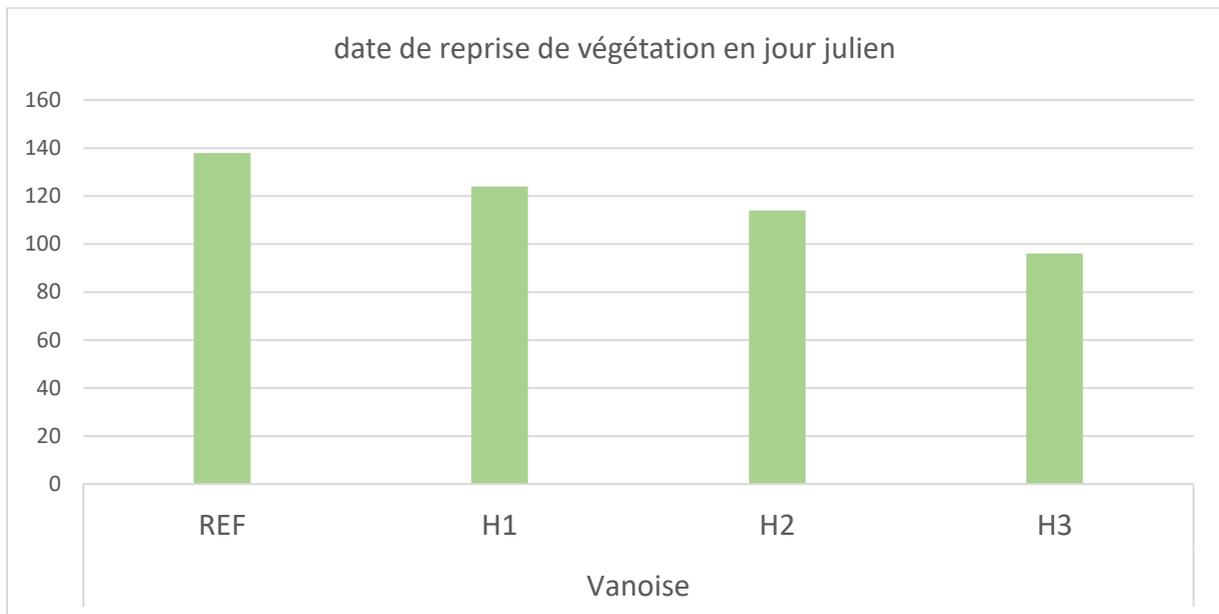
Comme attendu, les valeurs d'ETP augmentent de façon significative au printemps et surtout en été (jusqu'à 13% pour H3). En été, lorsque cette augmentation de l'ETP est concomitante avec une baisse des cumuls de pluie, l'indicateur pluies efficaces, en H2 et H3, passe de 70mm à zéro. Le bilan hydrique est donc plus creusé que dans le Beaufortain, causé par des cumuls de pluie moins importants et une évolution de l'ETP quasi-identique.

En termes de cumuls annuels de pluie efficaces, pour 742mm en période de référence, c'est une perte de -7% en H2 et -12% en H3. La baisse est importante en été, avec des sécheresses hydrologiques qui apparaissent dès H1.

L'indicateur d'humidité des sols suit cette tendance avec une stagnation en hiver, mais des baisses de l'indice SWI printanières, estivales et automnales. En H3, les SWI restent toutefois supérieurs à 0.5, ce qui indique une très faible probabilité d'occurrence de sécheresse des sols par rapport à la situation de référence.



Indicateur agro-climatique



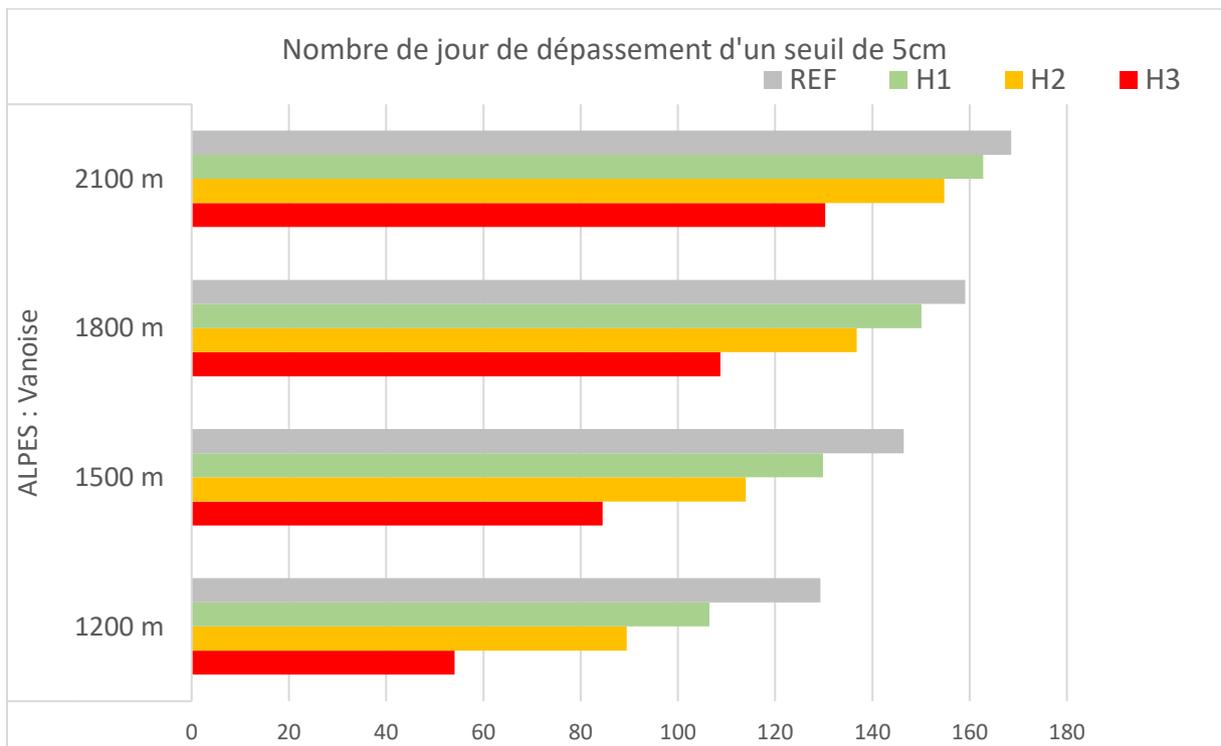
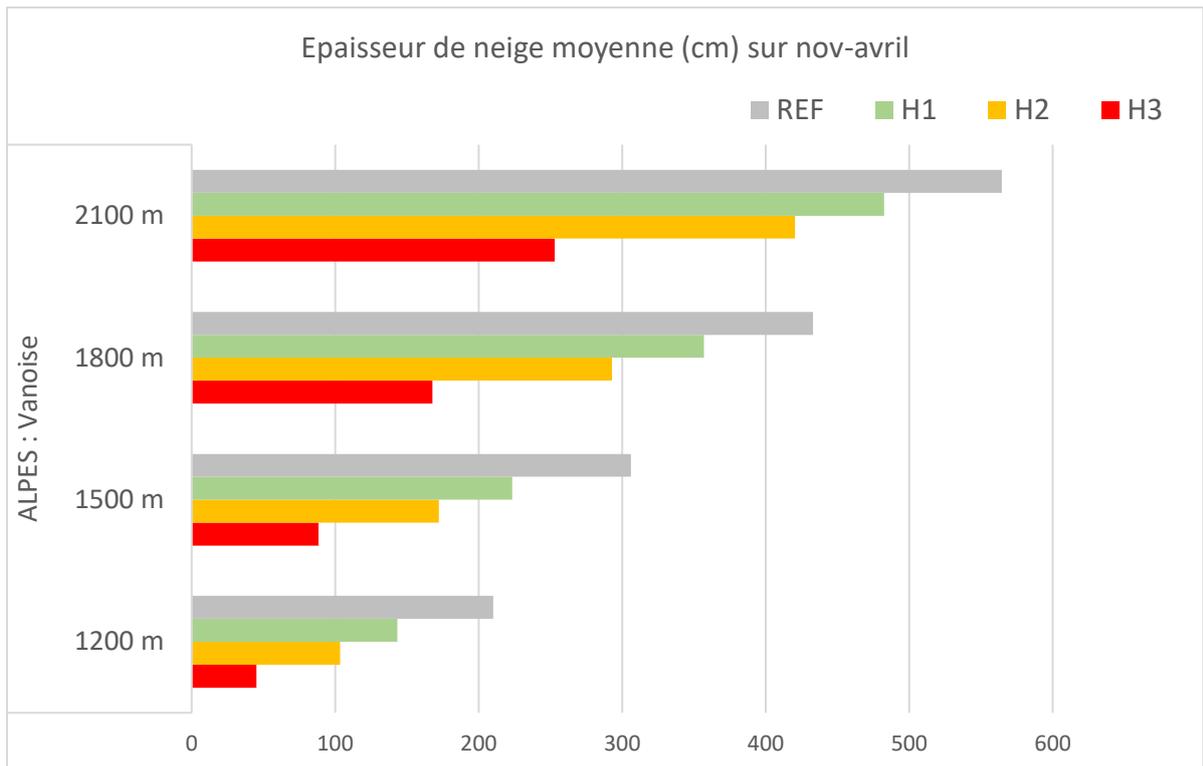
REF : 18 mai ; H1 : 4 mai ; H2 : 24 avril ; H3 : 06 avril

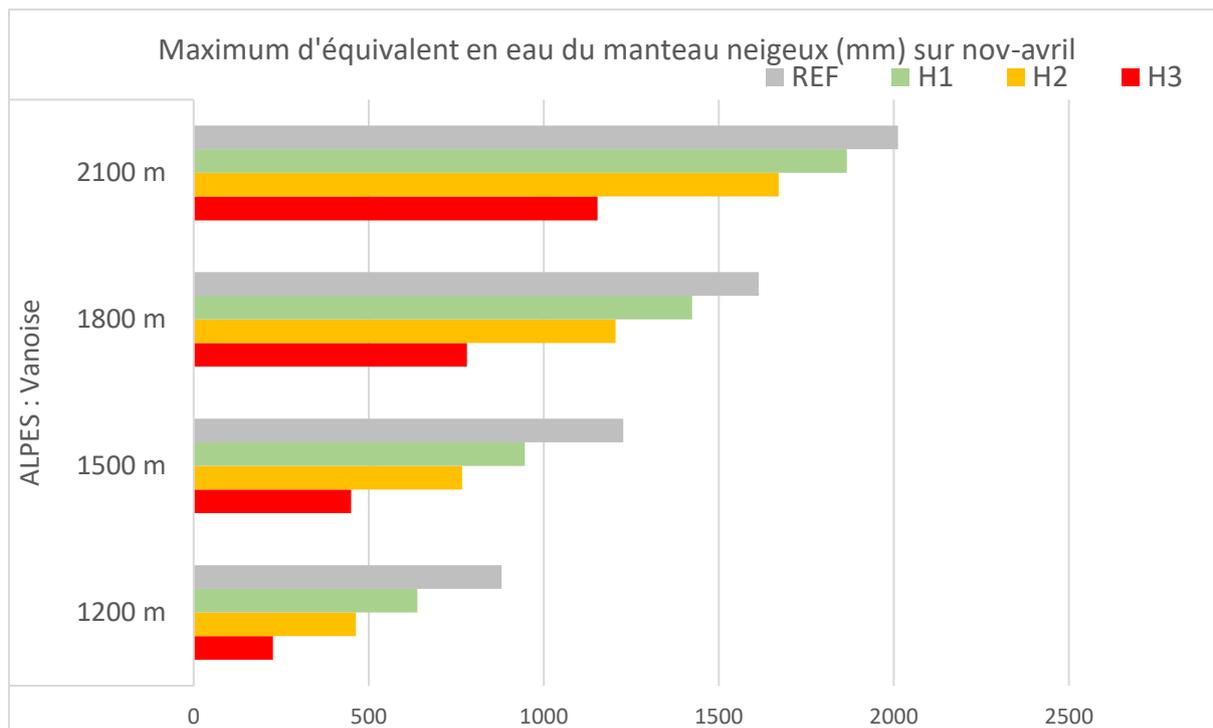
Les indicateurs d'enneigement

Sur les altitudes 1800 et 1500m, les modèles proposent une diminution de -25% de l'épaisseur moyenne de neige entre REF et H1 puis H2, puis de 50% entre H2 et H3, soit une réduction importante qui atteint 70% entre REF et H3. Cette réduction progresse plus rapidement sur les mois de mars et avril. Les pics de hauteur passe dès H2 de mars à février.

Sur le nombre de jour de neige au sol > 5cm, le constat est à la diminution sur les ailes de saisons (nov, dec, avril) et moins sur le cœur de l'hiver et le mois de mars. La diminution concerne un mois de réduction de neige au sol en H2 et à 1500m. La situation en avril est la plus préoccupante avec une réduction rapide de la couverture neigeuse, par exemple à 1500m de 23 j en REF à 10j en H2.

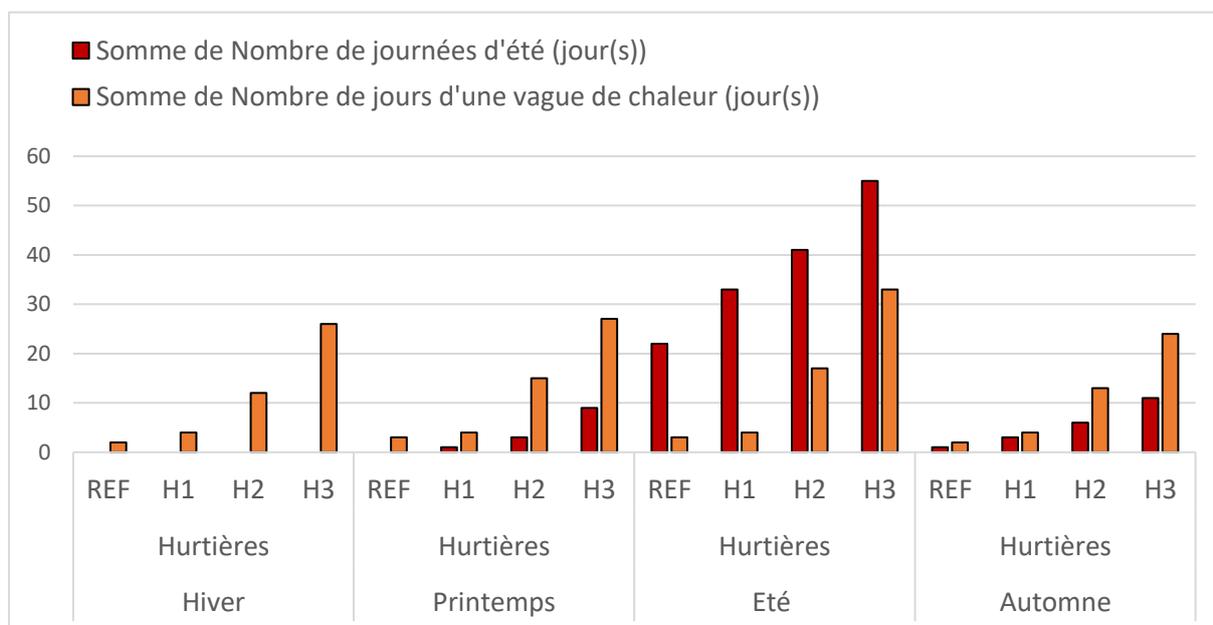
Le manteau neigeux diminuant en épaisseur et sur la durée, l'indicateur d'équivalence en eau suit la même dynamique que les indicateurs précédents. La baisse est aussi plus accentué en fonction de l'altitude. On observe des valeurs assez impressionnante de perte de pratiquement 50% d'équivalence en eau à 1200m entre REF et H2, alors qu'elle est de -15% à 2100m.



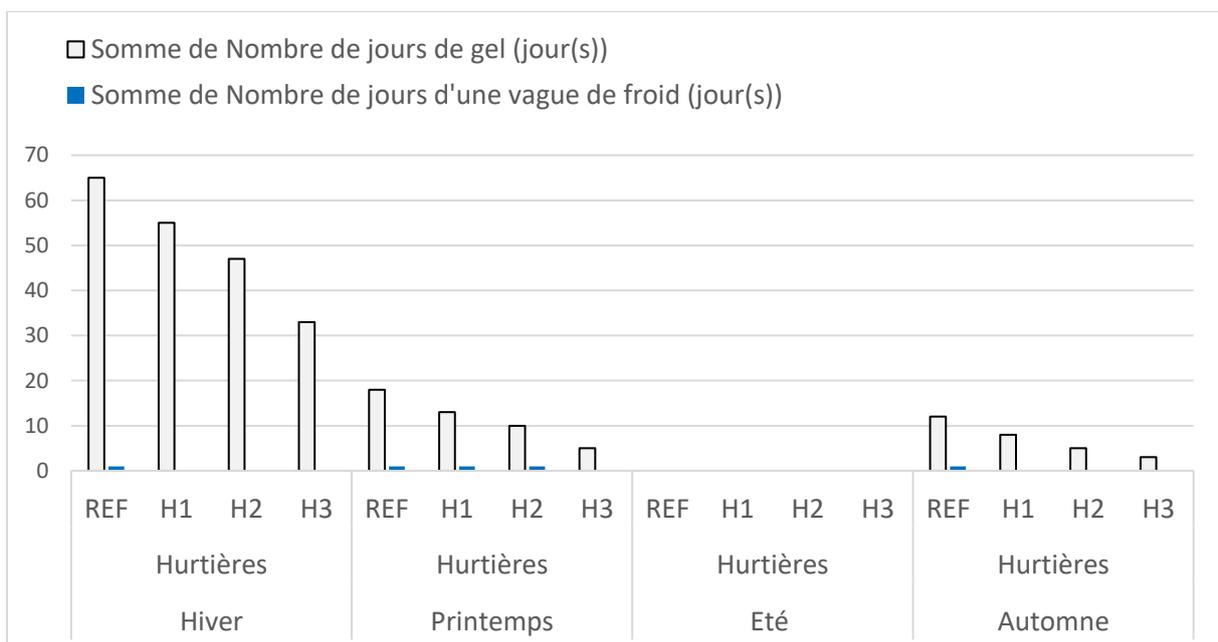


Massif de Belledonne (Hurtières)

Les indicateurs de températures



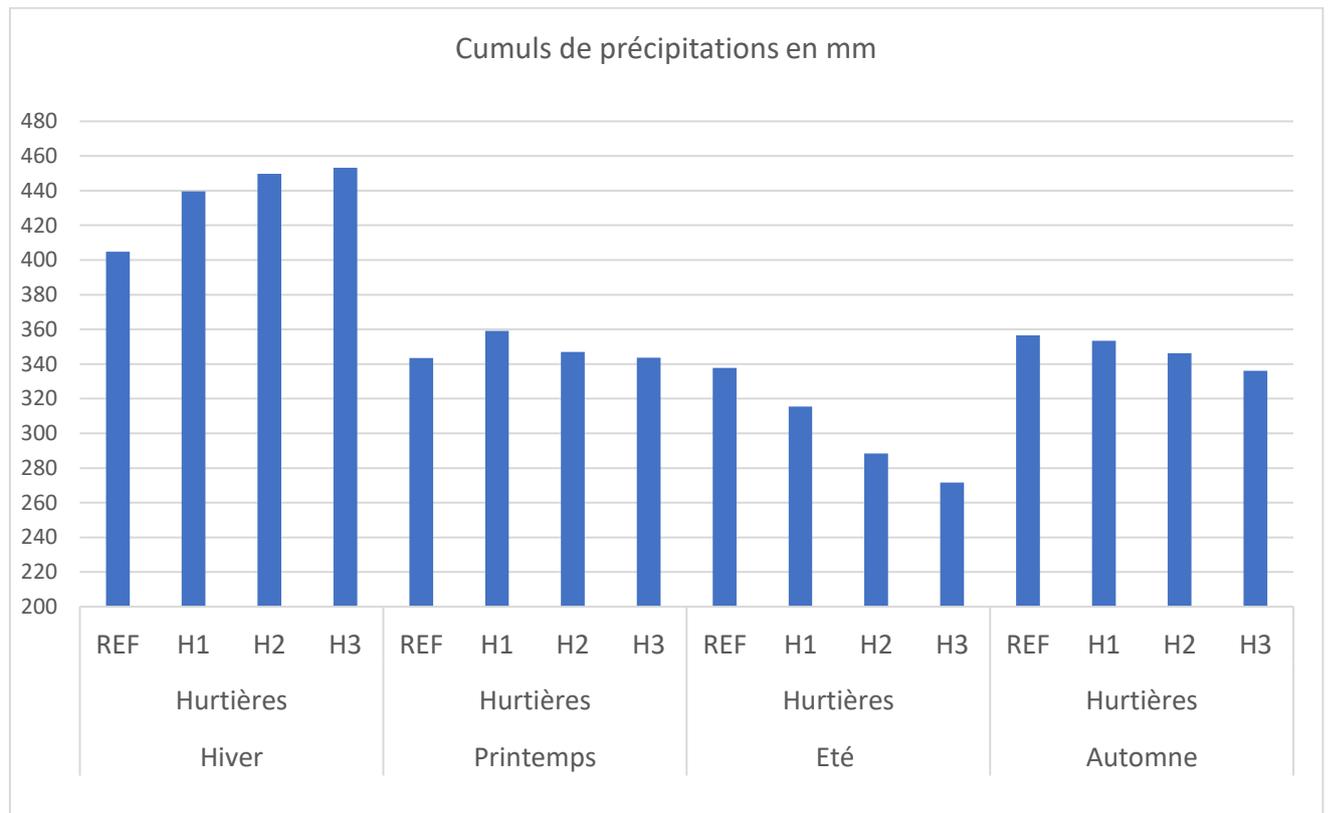
A une altitude approximative de 1200m, le climat du Massif des Hurtières devrait aussi évoluer vers une augmentation significative des températures sur toutes les saisons. L'indicateur vagues de chaleur, qui décrit l'enchaînement de journées anormalement chaudes (anomalies des TX > 5°C) et donc l'installation durable de types de temps doux en hiver et très chauds en été, atteint des écarts importants par rapport au climat actuel, tout d'abord multiplié par 3 ou 4 en H2, et par 10 en été en H3, comme le montre le graphique ci-dessus. Cela pourrait se traduire par 2 semaine par mois d'été de vagues de chaleur ou deux à trois longues vagues de chaleurs (plus de 10j). Ces vagues de chaleur estivale sont concomitantes avec l'augmentation des journées > 25°C. Contrairement aux massifs plus élevés, on observe des journées chaudes au printemps et en automne, principalement sur mai et septembre, et une forte augmentation en été, de l'ordre de 10j tous les 30 ans, pour atteindre 55 j à la fin du siècle, soit 2/3 de la saison estivale.



Le nombre de jour de gel à cette altitude diminue fortement, de -15% en H2 (15j en moins) à -50% en H3 en hiver, et ainsi que sur le printemps et l'automne.

Le nombre de jour de vagues de froid tombent à zéro puisque les températures minimales restent proche ou même supérieure à la normale (ref) dans un climat réchauffé (décalage vers la médiane).

Les indicateurs de précipitations

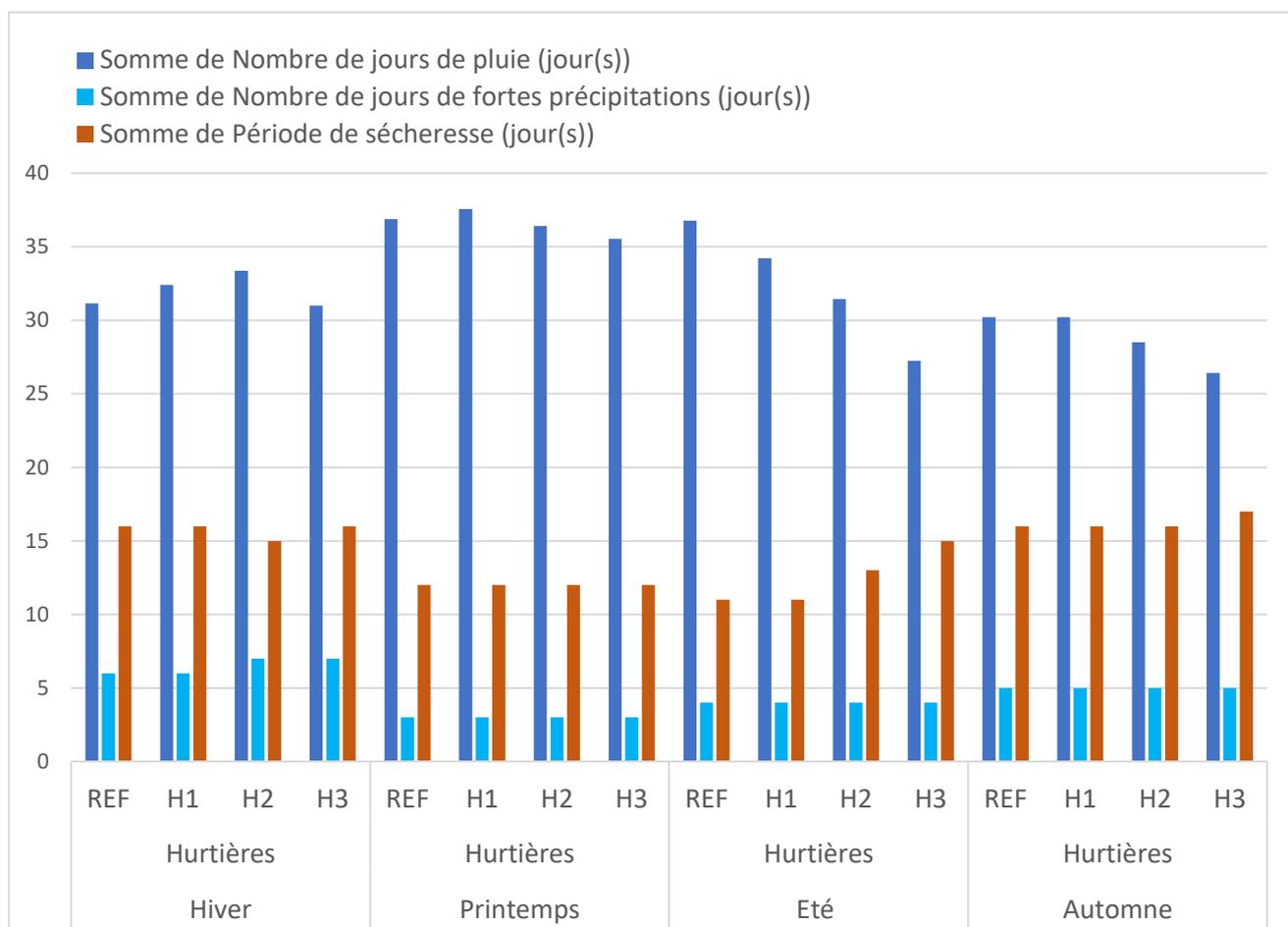


L'ensemble multi-modèle propose une augmentation en hiver de 50mm, soit 13%, une stagnation au printemps, une légère baisse en automne sur la fin de siècle, et une baisse significative en été en H2 (-15%) puis en H3 (-20%). Sur des cumuls annuels, la tendance est à la stagnation en H2.

Sur le court et moyen terme, la variabilité interannuelle l'emporte sur une tendance précise, les cumuls moyens resteront proche de la normale, avec des années et des saisons plus sèches ou humides, mais au fur et à mesure du changement climatique d'origine anthropique, les cumuls devraient diminuer en été et en début d'automne.

Le nombre de jours de pluie baisse de façon importante en été et en automne dans le même temps. Le nombre de jours de fortes précipitations évoluent légèrement à la hausse en hiver. L'évolution de l'indicateur période de sécheresse est plus marquée en été et début d'automne, que sur les autres massifs.

En conclusion, des perspectives de pluies plus faibles et moins bien réparties sur les saisons estivales et automnales, alternant avec des périodes de vagues de chaleur plus longues et plus intenses. Attention toutefois à l'évolution de la pluviométrie qui reste encore soumise à de nombreuses incertitudes.

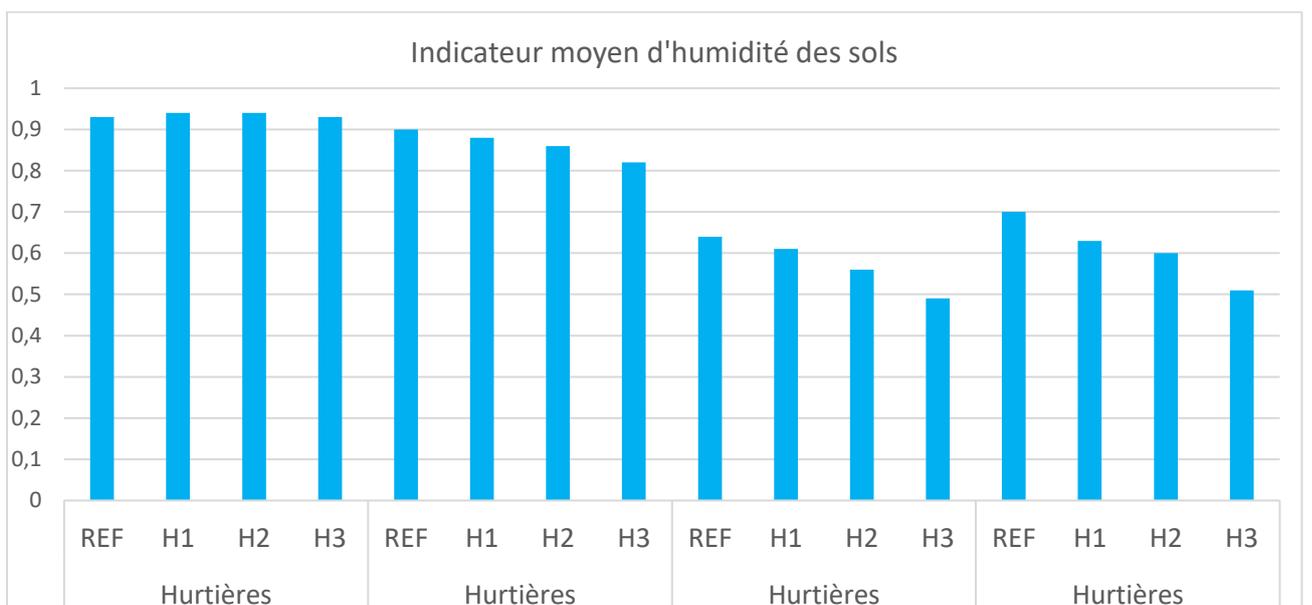
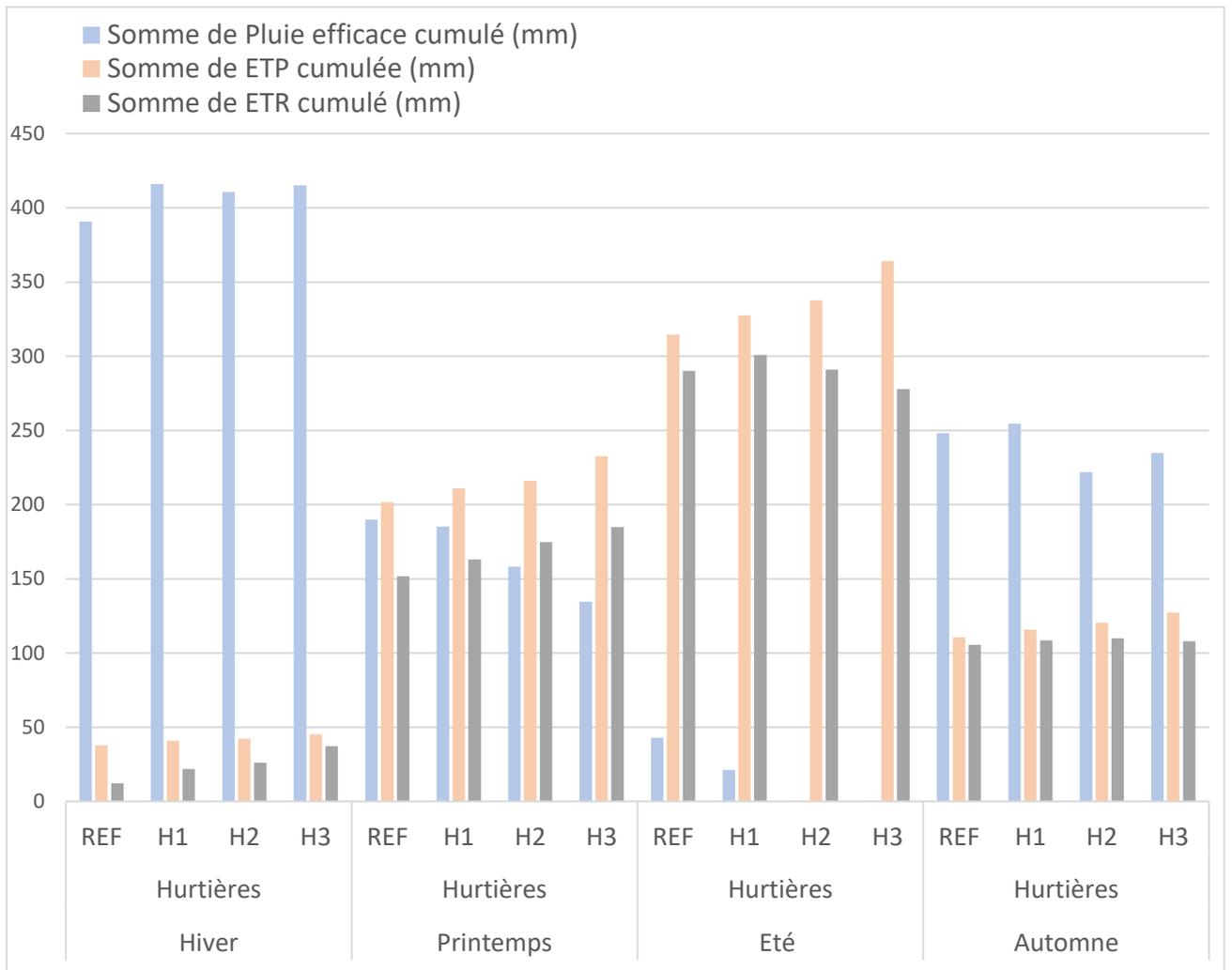


Les indicateurs hydriques

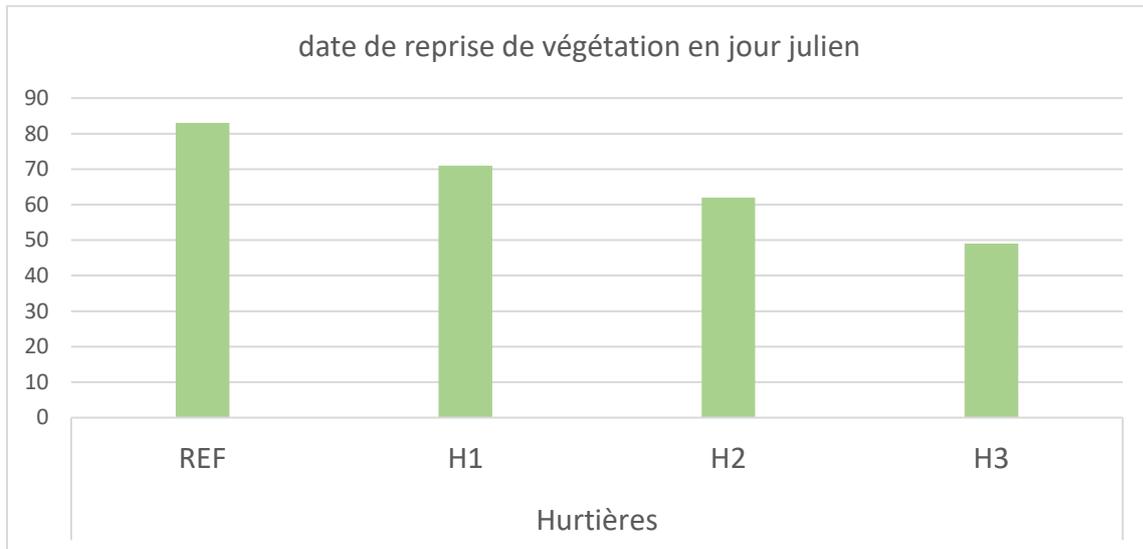
Comme attendu, les valeurs d'ETP augmentent de façon significative au printemps et surtout en été (jusqu'à 15% pour H3). En été, lorsque cette augmentation de l'ETP est concomitante avec une baisse des cumuls de pluie, l'indicateur pluies efficaces, en H2 et H3, passe de 70mm à zéro. Les valeurs d'ETP sont les plus élevées des trois massifs, à cause de l'altitude plus basse.

En termes de cumuls annuels de pluie efficaces, pour 871mm en période de référence, c'est une perte de -7% en H2 et -12% en H3. La baisse est importante en été, avec des sécheresses hydrologiques qui apparaissent en H2. Le bilan est toutefois légèrement moins négatif que pour la Vanoise, car le massif des Hurtières est plus arrosé. Il est toutefois à prévoir des intensités de sécheresses hydriques plus importantes que dans les autres massifs, du fait de l'altitude plus basse.

L'indicateur d'humidité des sols suit cette tendance avec une stagnation en hiver, mais des baisses printanières, estivales et automnales. En H3, les SWI, bien que plus faibles, restent toutefois supérieurs à 0.5, ce qui indique une très faible probabilité d'occurrence de sécheresse des sols par rapport à la situation de référence.



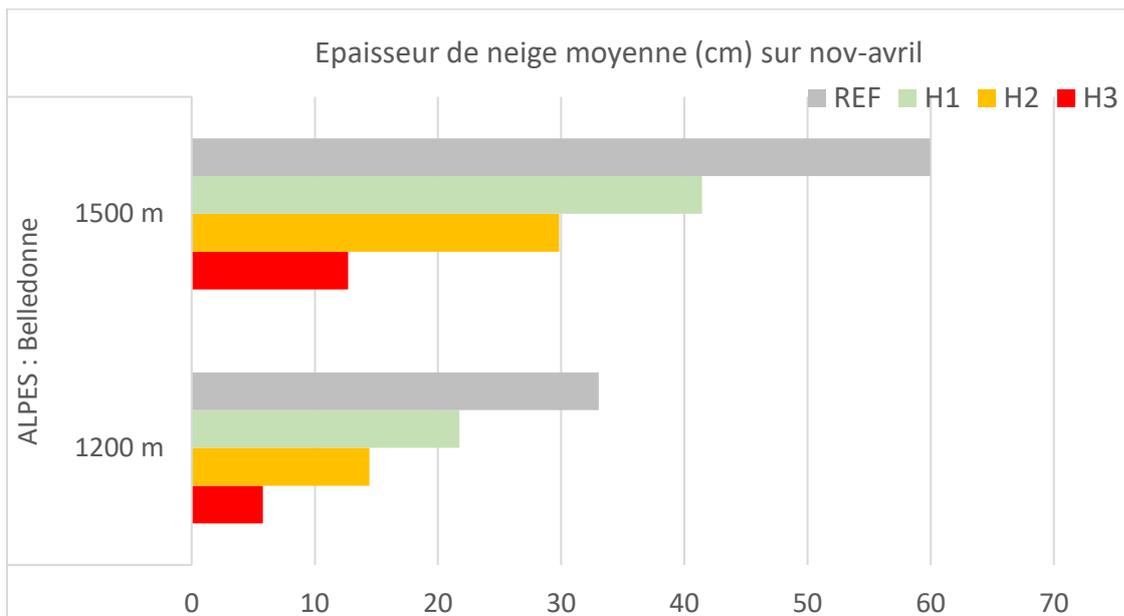
Indicateur agro-climatique



REF : 24 mars ; H1 : 12 mars ; H2 : 3 mars ; H3 : 18 février

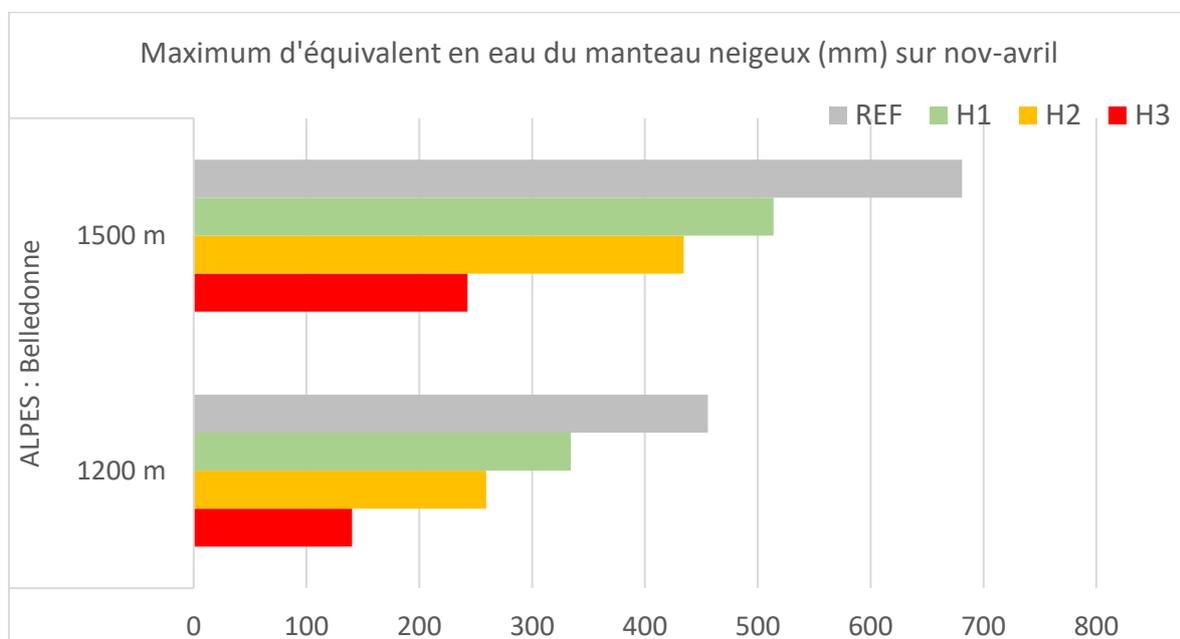
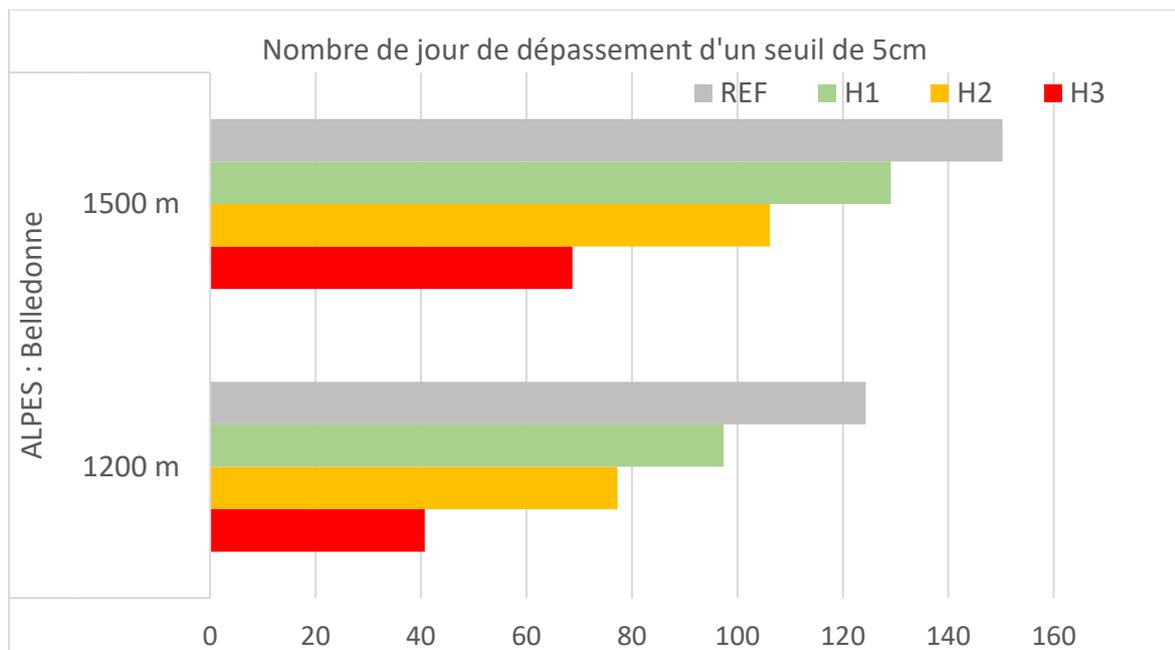
Les indicateurs d'enneigement

Sur les altitudes 1200 et 1500m, les modèles proposent une diminution de -35% de l'épaisseur moyenne de neige entre REF et H1 puis H2, puis de 50% entre H2 et H3, soit une réduction importante qui atteint 80% entre REF et H3. Cette réduction progresse plus rapidement sur les mois de mars et avril. Les pics de hauteur passe dès H2 de mars à février.



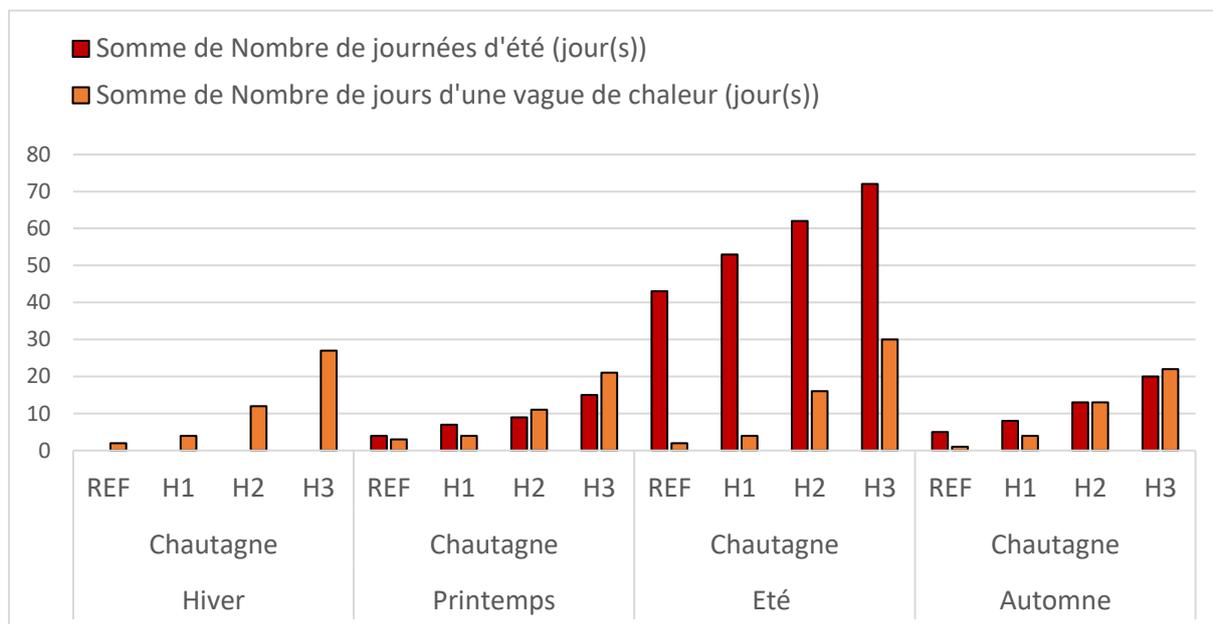
Sur le nombre de jour de neige au sol > 5cm, le constat est à la diminution sur les ailes de saisons (nov, dec, avril) et moins sur le cœur de l'hiver et le mois de mars. La diminution concerne un mois de réduction de neige au sol en H2 et à 1500m. La situation en avril est la plus préoccupante avec une réduction rapide de la couverture neigeuse, par exemple à 1200m, où elle pourrait devenir inexistantes certaines années dès H1.

Le manteau neigeux diminuant en épaisseur et sur la durée, l'indicateur d'équivalence en eau suit la même dynamique que les indicateurs précédents : -30% à 1500m entre REF et H2, et la baisse dépasse largement les 50% en H3, et même 80% sur avril.



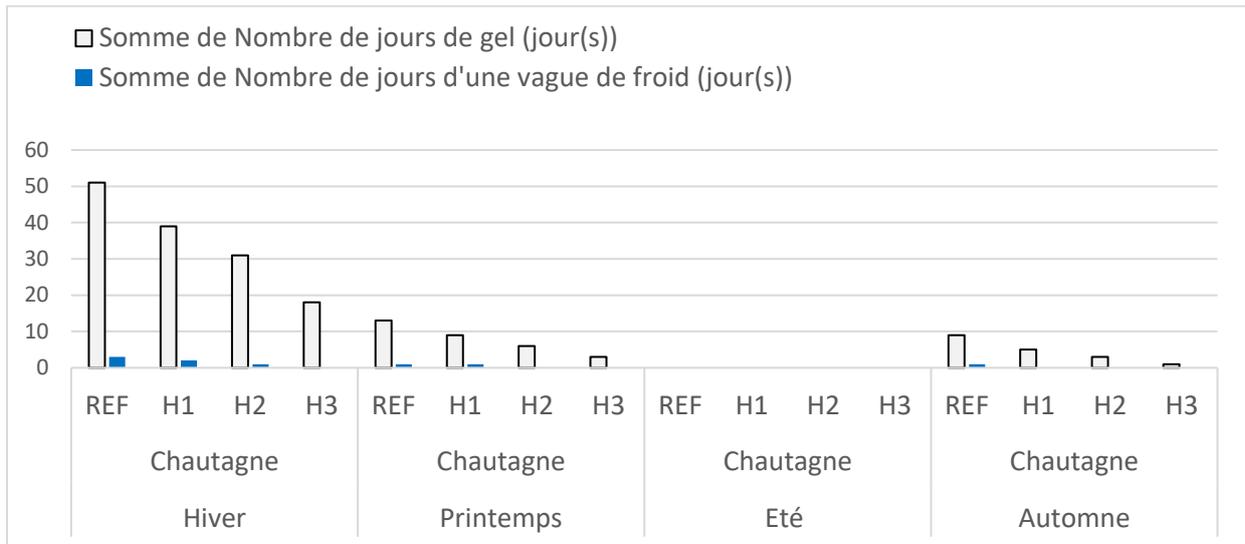
Plaine de la Chautagne

Les indicateurs de températures

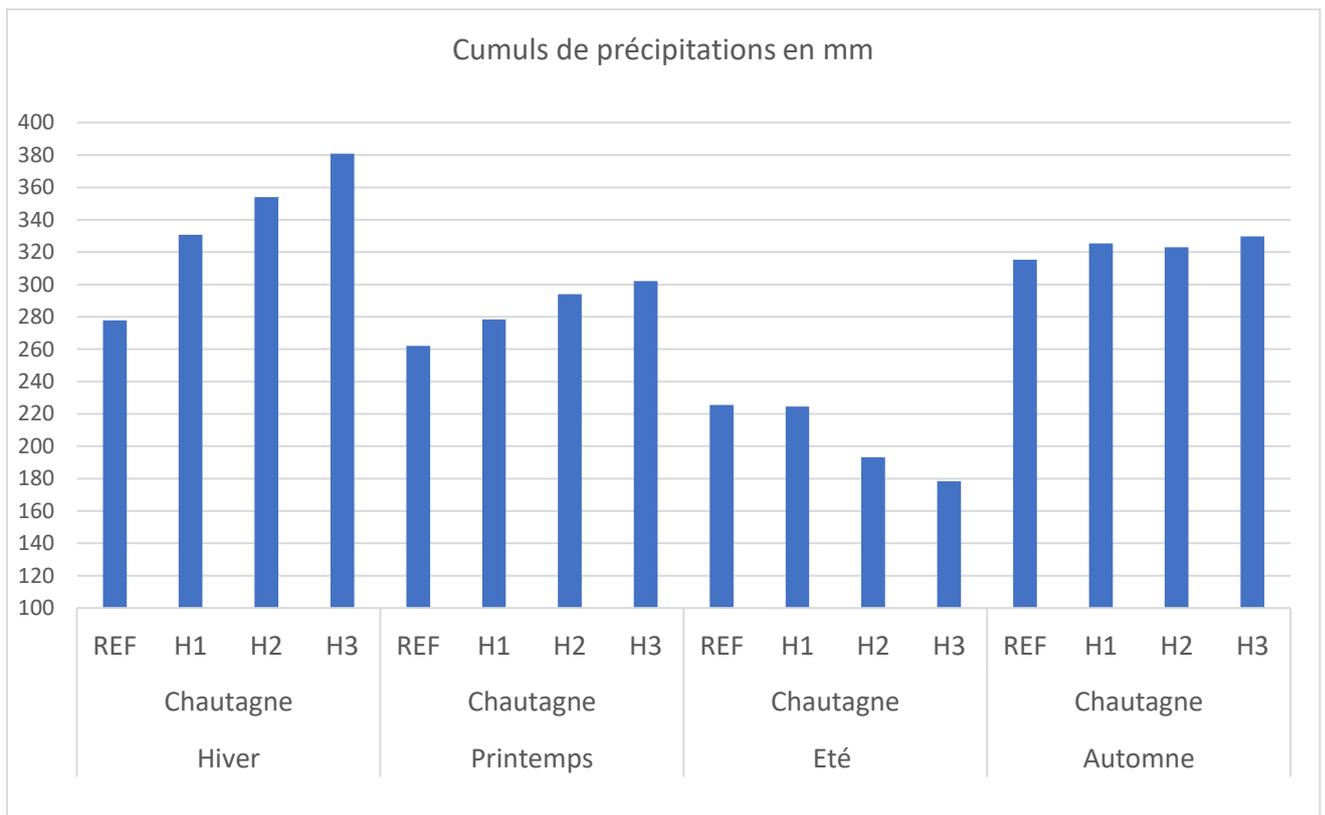


En plaine, le climat de la Chautagne devrait évoluer vers une augmentation significative des températures sur toutes les saisons. L'indicateur vagues de chaleur, qui décrit l'enchaînement de journées anormalement chaudes (anomalies des TX > 5°C) et donc l'installation durable de types de temps doux en hiver et très chauds en été, atteint des écarts importants par rapport au climat actuel, tout d'abord multiplié par 2 ou 3 en H2, et par 10 en été en H3, comme le montre le graphique ci-dessus. Cela pourrait se traduire par 1 semaine à 2 semaines par mois d'été de vagues de chaleur ou deux à trois longues vagues de chaleurs (plus de 10j). Ces vagues de chaleur estivale sont concomitantes avec l'augmentation des journées > 25°C. En forte augmentation au printemps et en été (x2 à 3 en H2), elle passerait de 43 en été à 62 en H2 et 70 en H3, soit quasiment 2 mois et demi de températures > 25°C.

Le nombre de jour de gel diminue de 10j / périodes, soit -50% entre H1 et H3. Le nombre de jour de vagues de froid tombent diminuent dans le même sens en hiver.



Les indicateurs de précipitations



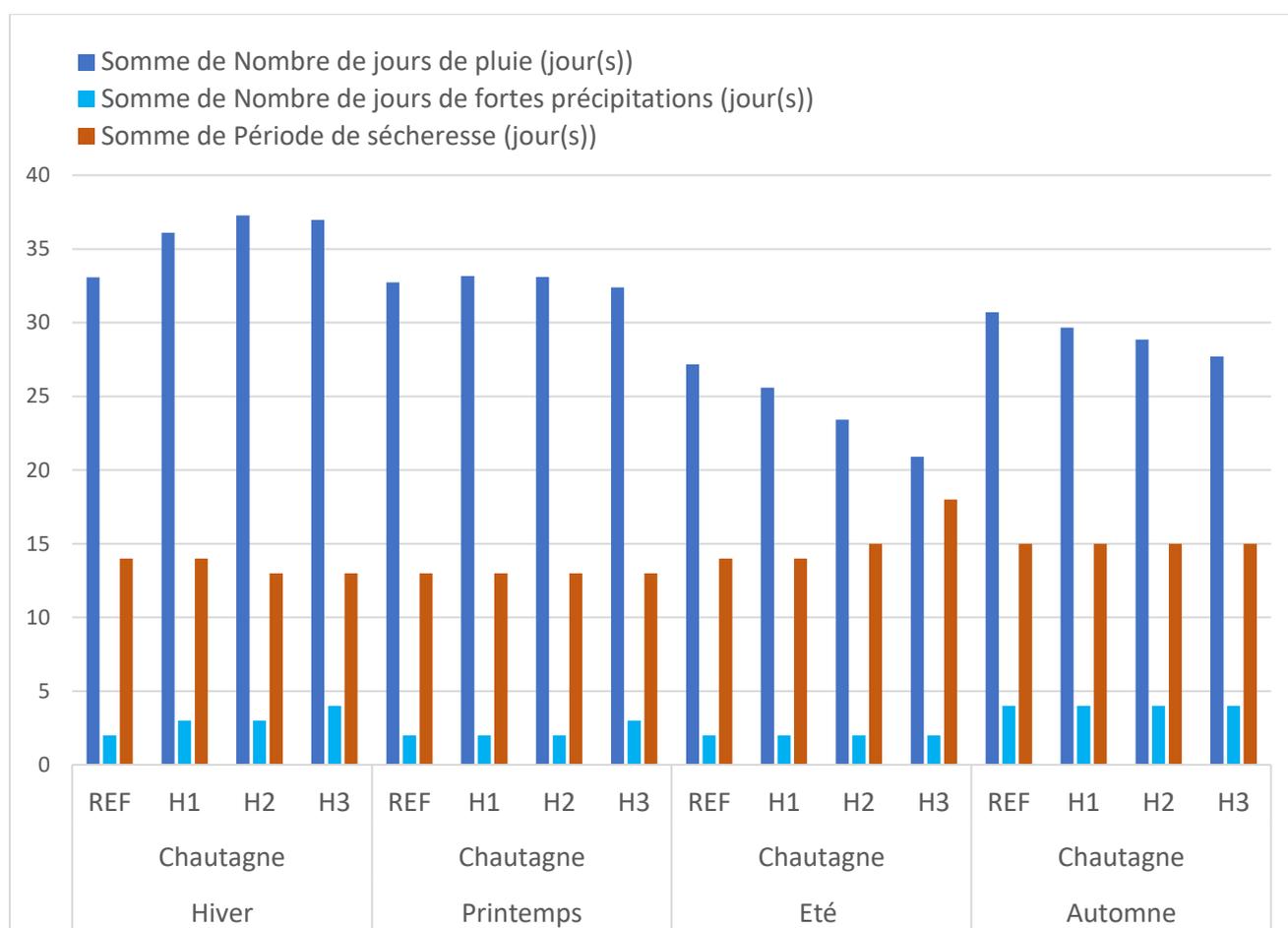
Dans cette étude, l'ensemble multi-modèle propose une forte augmentation en hiver et dès H1 (+25% entre REF et H2), une augmentation au printemps, une stagnation en automne, et une baisse en été en en H2 (-15%) puis en H3 (-20%). Sur des cumuls annuels, on observe une augmentation de 10%.

Sur le court et moyen terme, la variabilité interannuelle l'emporte sur une tendance précise, les cumuls moyens resteront proche de la normale, avec des années et des saisons plus sèches ou

humides, mais au fur et à mesure du changement climatique d'origine anthropique, les cumuls devraient diminuer en été.

Le nombre de jours de pluie baisse de façon importante en été et en automne, augmente en été. Le nombre de jours de fortes précipitations augmente en été. L'évolution de l'indicateur période de sécheresse est observable en H2 et H3 de la saison estivale (de 14 à 18) mais de façon mesurée.

En conclusion, des perspectives de pluies plus faibles et moins bien réparties sur les saisons estivales et automnales, alternant avec des périodes de vagues de chaleur plus longues et plus intenses. Un peu plus de pluie et beaucoup plus chaleur, voilà ce qui attendu. Attention toutefois à l'évolution de la pluviométrie qui reste encore soumise à de nombreuses incertitudes.

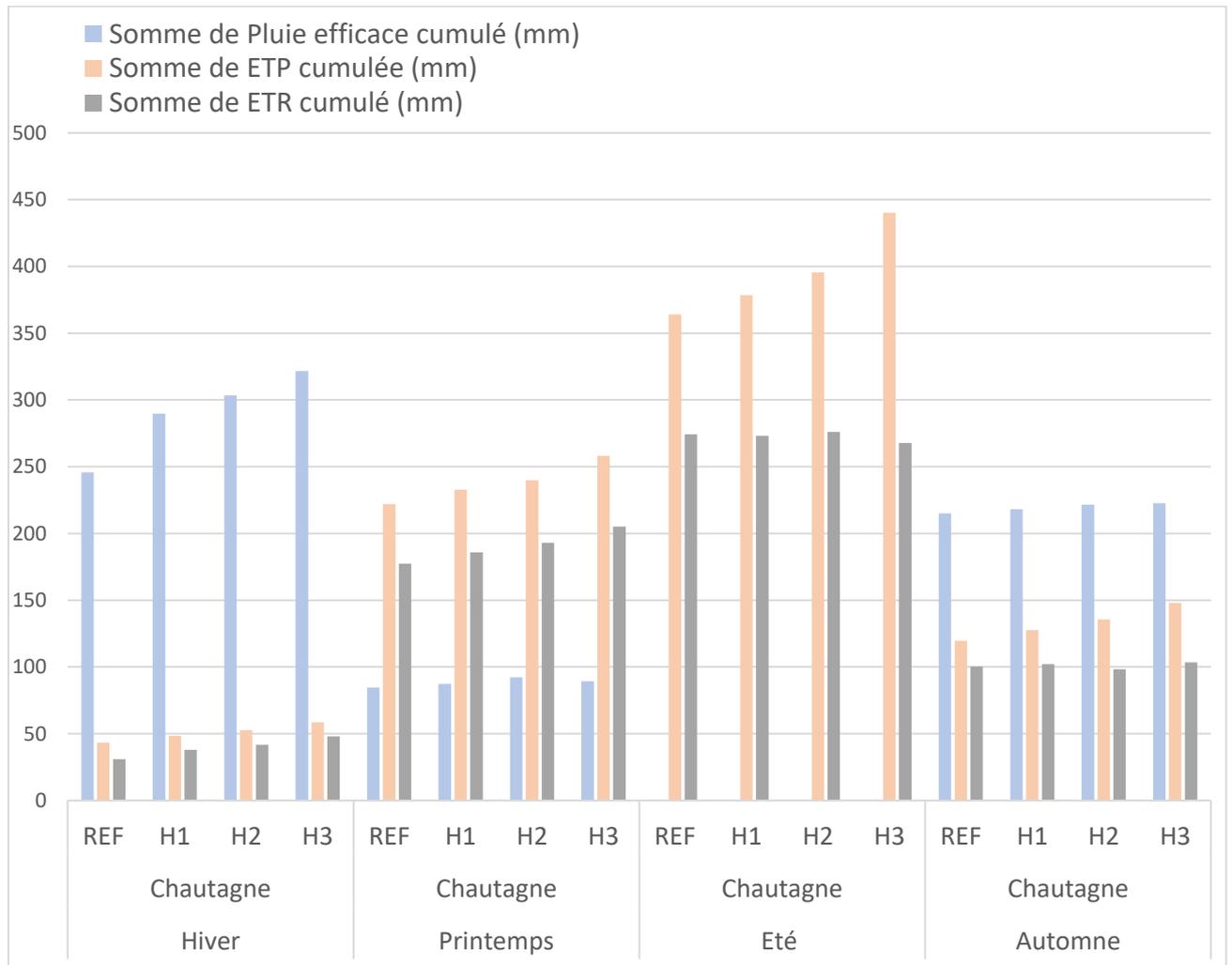


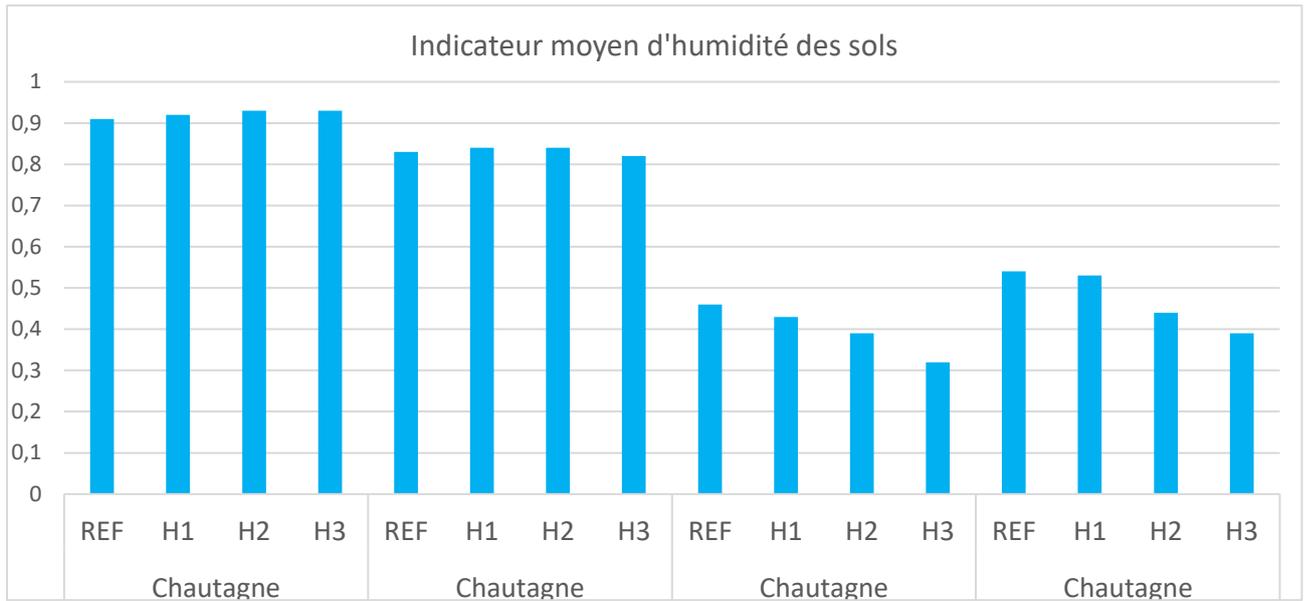
Les indicateurs hydriques

Comme attendu, les valeurs d'ETP augmentent de façon significative au printemps et surtout en été. Le bilan hydrique reste négatif sur tous les horizons en été. Il faut donc s'attendre à des périodes de sécheresses hydrologiques très intenses en été.

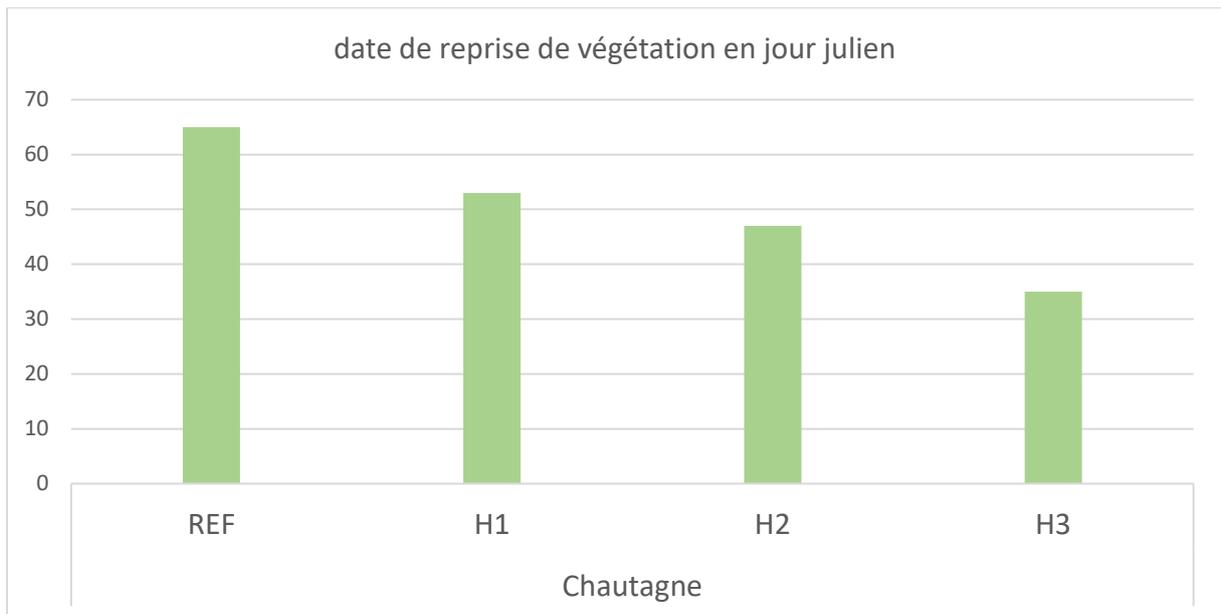
Notons que les cumuls annuels de pluie efficaces augmentent avec le temps, grâce à la période hivernale.

L'indicateur d'humidité des sols passe en dessous des 0.5 et même 0.4 en été, induisant un fort risque de sécheresse des sols récurrents à partir de H2.



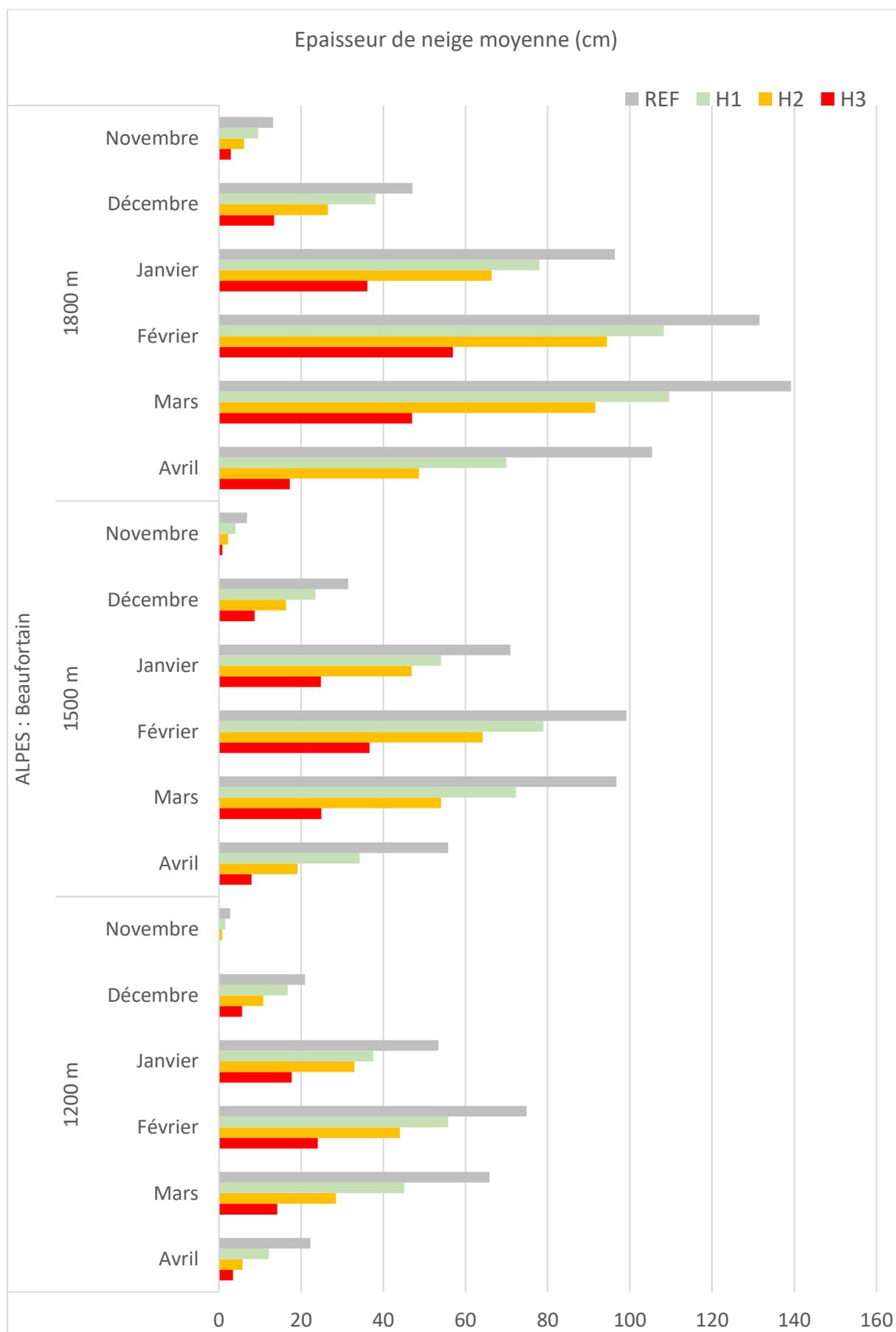


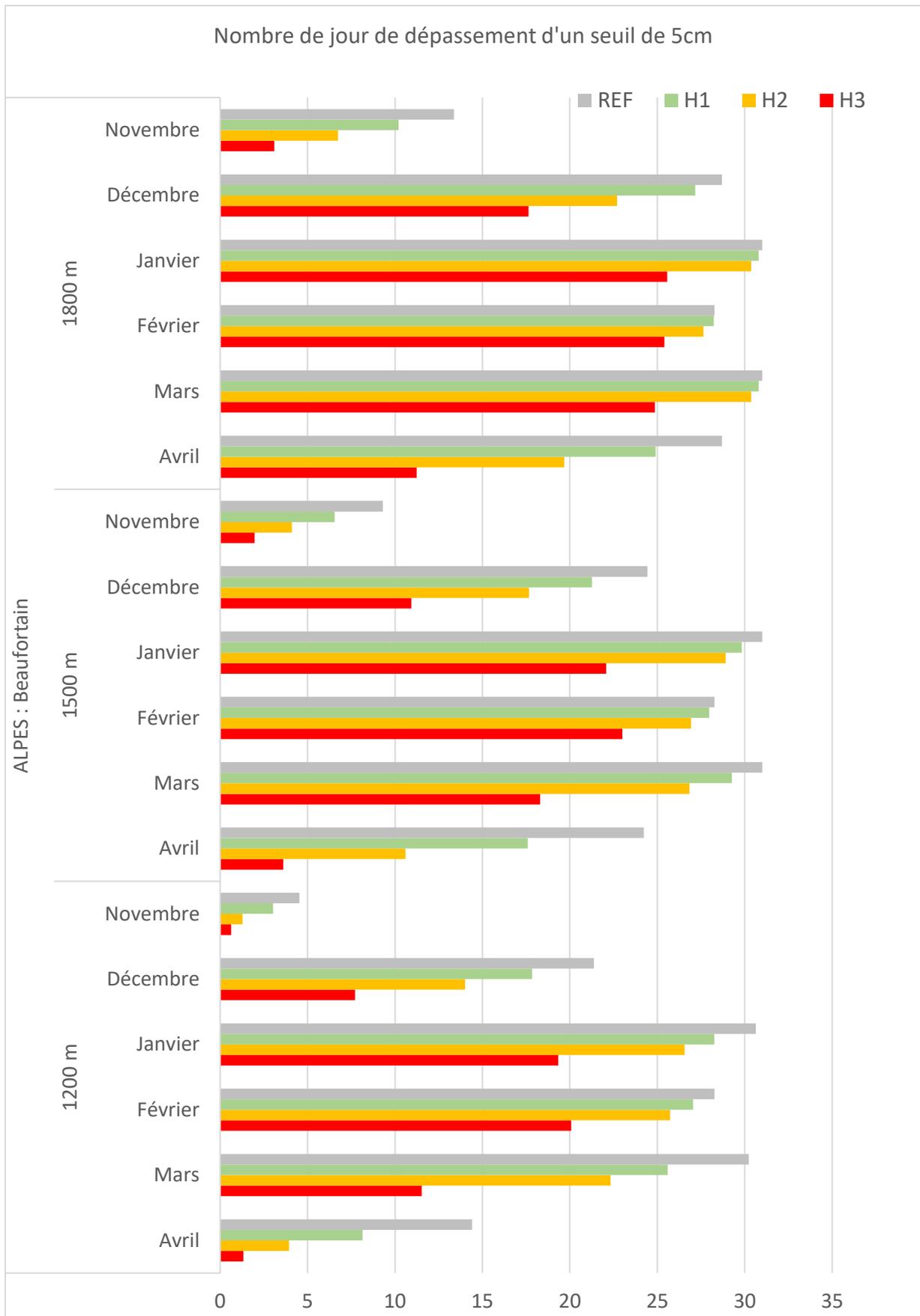
Indicateur agro-climatique

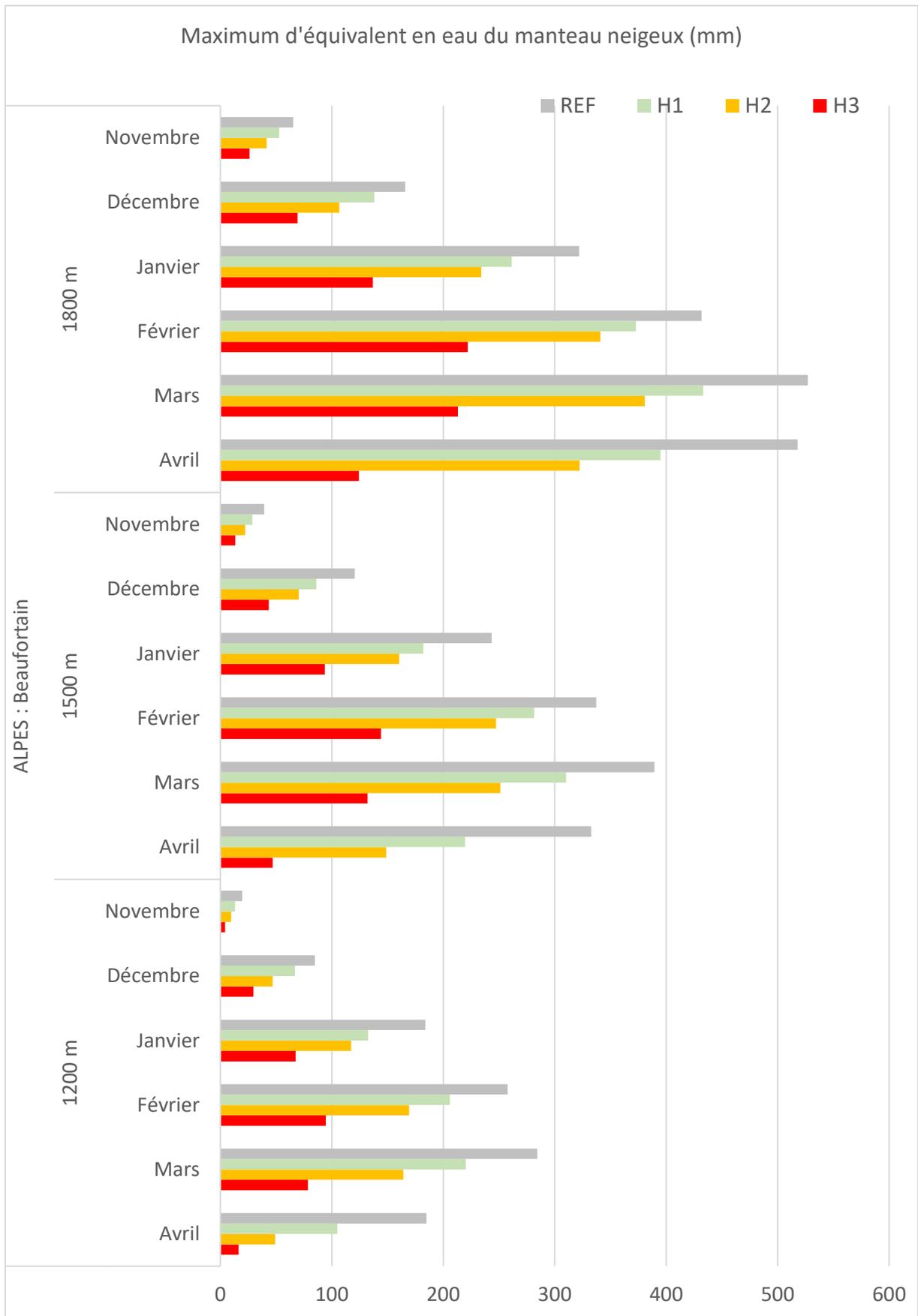


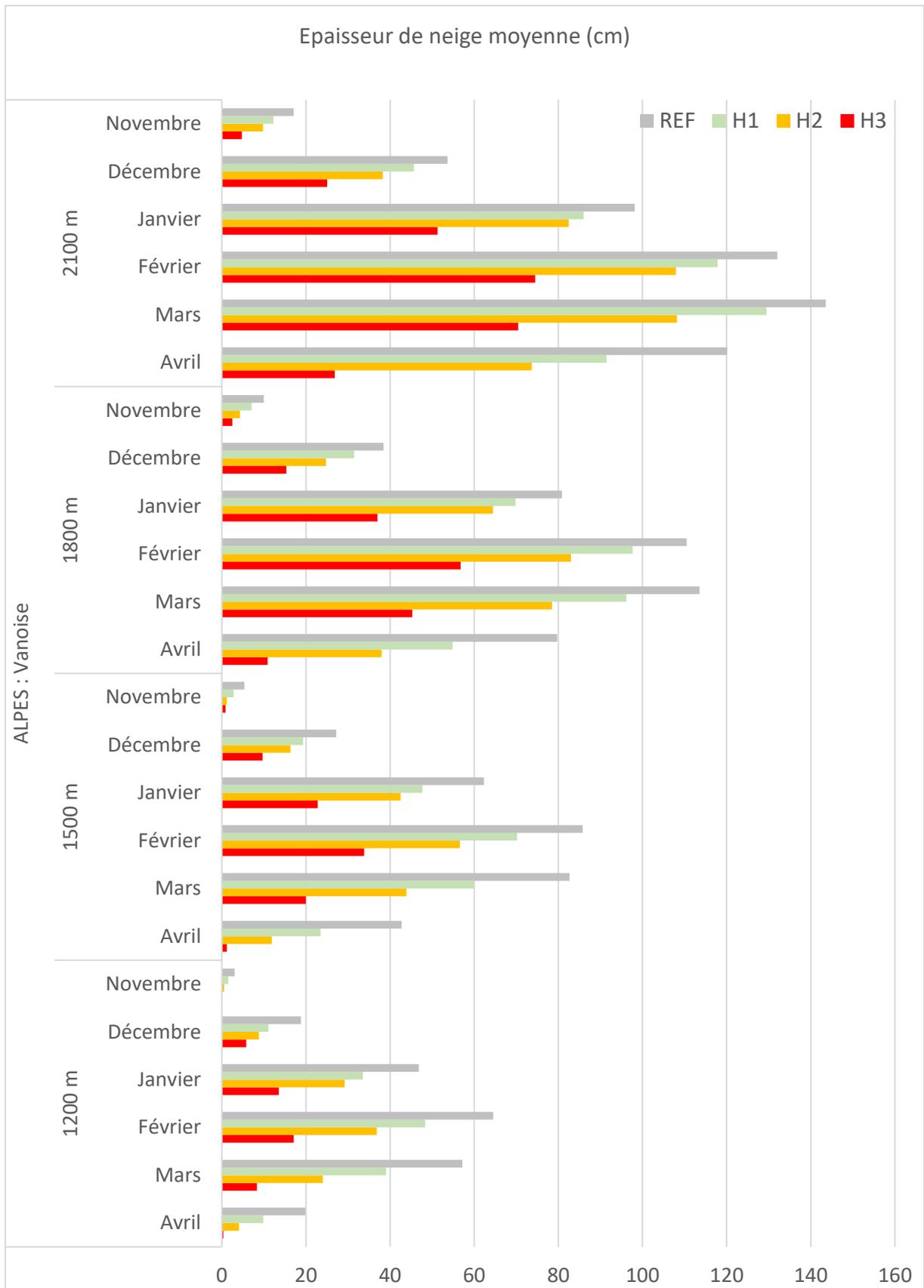
REF : 6 mars ; H1 : 22 février ; H2 : 16 février ; H3 : 4 février

ANNEXES









Nombre de jour de dépassement d'un seuil de 5cm

