

AMÉLIORATION DU CALAGE DU MODÈLE HYDROLOGIQUE DU BASSIN DE LA GRANDE-EAU EN SUISSE AVEC DES PRODUITS SPATIALISÉS DE PRÉCIPITATION, TEMPÉRATURE ET COUVERTURE DE NEIGE

Alain Foehn⁽¹⁾, Javier García Hernández⁽²⁾, Giovanni De Cesare⁽¹⁾ & Javier Fluixá Sanmartín⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), GC A3 5054, Station 18, 1015 Lausanne, Suisse, e-mail: secretariat.lch@epfl.ch

⁽²⁾Centre de recherche sur l'environnement alpin (CREALP), Rue de l'Industrie 45, 1951 Sion, Suisse, e-mail: crealp@crealp.vs.ch

La prévision hydrologique en milieu alpin continue de représenter un défi majeur malgré le développement technologique, notamment en lien avec la forte variabilité spatiale des précipitations ainsi que l'importance de la fonte nivale au printemps. Cet article explore l'utilisation de divers produits de précipitation pour le calage d'un bassin alpin en Suisse, le bassin de la Grande-Eau (153.9 km²). Deux réseaux de stations de mesure ainsi que deux produits d'estimation quantitative de précipitation sont examinés. Parallèlement à cette variation des données d'entrée, deux approches de calage sont explorées. La première approche, conventionnelle, utilise les données de débit pour caler les paramètres du modèle hydrologique. La seconde étudie une division en deux phases du calage : dans un premiers temps, les coefficients de fonte nivale sont estimés à l'aide de données satellitaires ; les autres paramètres sont ensuite calés comme dans l'approche conventionnelle en utilisant les données de débit. Les résultats du cas d'étude montrent que l'utilisation de produits spatialisés de précipitation ne permet pas forcément d'améliorer la valeur des indicateurs de performance. Sur le bassin étudié, l'utilisation de ces produits semble renforcer le problème de biais négatifs en termes de volume déjà observé en utilisant les valeurs aux stations météorologiques. Concernant la division en deux phases de la procédure de calage, une légère amélioration des indicateurs de performance est observée.

MOTS CLEFS : modèle hydrologique, précipitations spatialisées, équivalent en eau de la neige.

Improved calibration of the hydrological model of the Grande-Eau catchment in Switzerland with spatialized products of precipitation, temperature and snow cover

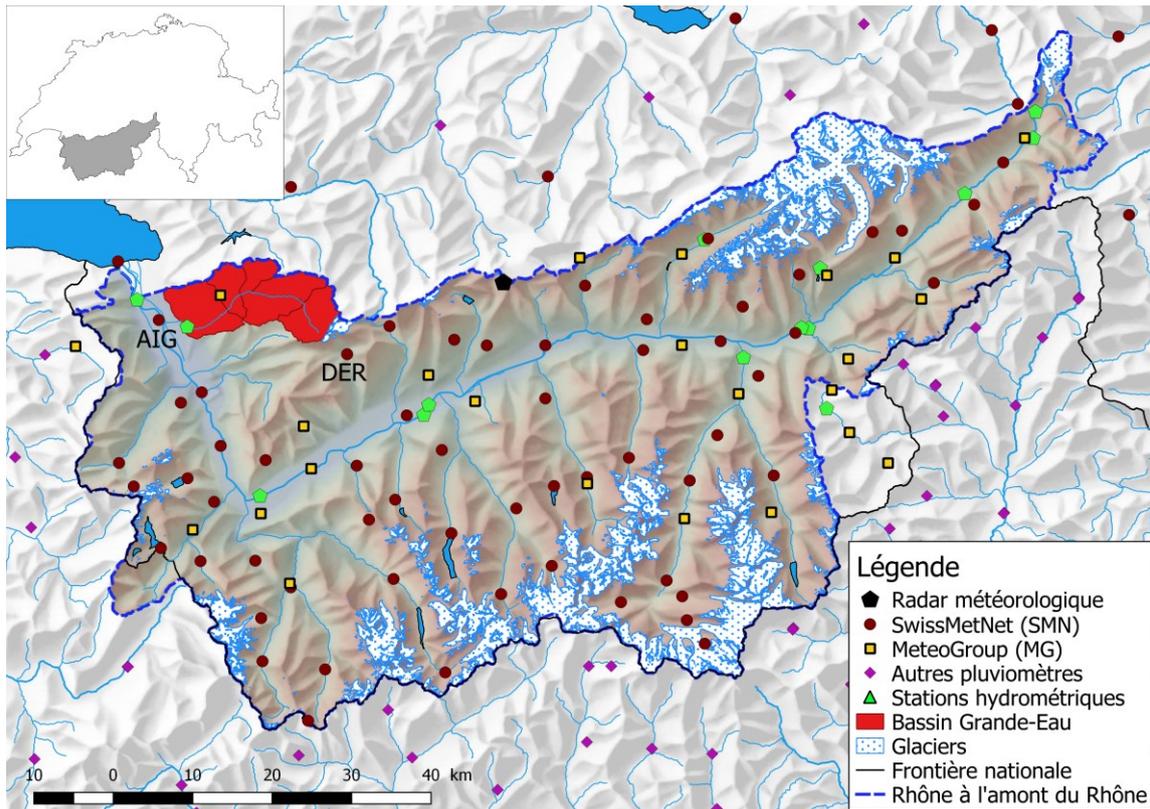
Hydrological forecasting in Alpine environments continues to represent a major challenge despite of technological development. The spatial variability of precipitation as well as the importance of snow-melt in spring are two major issues. The present article explores the use of various precipitation products for the calibration of an Alpine catchment in Switzerland, the Grande-Eau catchment (153.9 km²). On one side, it analyses the combination of two networks of different quality. On the other side, it studies the use of two products of quantitative precipitation estimates. In addition to this input variation, two calibration approaches are explored. The first approach consists of a traditional calibration of the parameters of the model using discharge data. In the second approach, a division into two steps of the calibration is investigated. In a first step, the snow-melting coefficients are estimated using data from the Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on board the Terra and Aqua satellites. The analysis is done pixel by pixel using spatialized products of precipitation, temperature and snow cover. Pixel values are then aggregated over altitude bands to be used in the semi-distributed model used for the hydrological simulation. In the second step, the other parameters are calibrated as in the traditional approach with discharge data. In order to allow a comparison between the precipitation products, the multiplier coefficient of precipitation is maintained fixed to 1 for all the methods. The results of the case study show that the use of spatialized products of precipitation does not necessarily improve the performance of the hydrological model. Over the studied basin, the use of these quantitative precipitation estimates seems to increase the negative bias issue in the simulated flow already observed when using data from the meteorological stations. Regarding the 2-step calibration, a slight improvement in the performance indicators is observed, which tends to support the explored approach.

KEY WORDS : Hydrological model, spatial interpolation of precipitation, snow water equivalent.

50 **I INTRODUCTION**

51 Le projet MINERVE pour la prévision et la gestion des crues dans le bassin du Rhône à l'amont
52 du Lac Léman (Valais, Suisse) a débuté en 2002. Un modèle hydrologique-hydraulique capable de
53 modéliser à l'aide d'une approche semi-distribuée des bassins complexes ainsi qu'un système
54 d'aide à la décision pour la gestion des barrages ont été développés [Jordan, 2007 ; Tobin, 2012 ;
55 García Hernández et al., 2014]. Depuis 2011, le système est opérationnel et génère chaque deux
56 heures une nouvelle prévision hydrologique pour l'ensemble du bassin.

57 Le bassin du Rhône à l'amont du Lac Léman (Figure 1) se situe dans les Alpes Suisses et couvre
58 la majeure partie du Canton du Valais et une partie du Canton de Vaud. La surface du bassin est de
59 5524 km², dont environ 10% est couverte de glaciers. L'altitude varie entre 372 et 4634 m s.m.



60
61 Figure 1 Bassin du Rhône à l'amont du Lac Léman et le sous-bassin de la Grande-Eau en rouge. L'abréviation des
62 stations SwissMetNet d'Aigle (AIG) et de Derborence (DER) sont indiquées. Source de données: Swisstopo [2017a]
63 pour les rivières et lacs, Swisstopo [2013] pour les glaciers (avec modifications), Swisstopo [2005] pour le modèle
64 numérique de terrain, Swisstopo [2012] pour le relief et Swisstopo [2017b] pour la frontière nationale.

65 Le système MINERVE est une source d'information essentielle pour les organes compétents du
66 Canton du Valais en lien avec la prise de décision telle que la vidange préventive d'aménagements
67 hydro-électriques ou l'évacuation de zones habitées. Le système exploite les observations
68 météorologiques de deux réseaux de stations de mesure (le réseau SwissMetNet (SMN) de l'Office
69 Fédéral de météorologie et climatologie MétéoSuisse et le réseau de la société privée MeteoGroup
70 (MG) Switzerland AG) ainsi que le produit opérationnel d'estimation quantitative de précipitation
71 de MétéoSuisse [Sideris et al., 2014] combinant les données radar et les mesures du réseau SMN.
72 Le système utilise également les données de débit de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV)
73 ainsi que les prévisions météorologiques de MétéoSuisse (produits COSMO-1 et COSMO-E).

74 Sur la base de ces données, le système MINERVE génère, à l'aide d'un modèle hydrologique, des
75 prévisions de débit pour l'ensemble du bassin. Un système d'envoi automatique de messages
76 informe du dépassement de seuils prédéfinis aux principaux points de contrôle du bassin.

77 La présente étude, appliquée au bassin de la Grande-Eau, vise d'une part à évaluer le gain
78 potentiel d'une décomposition en deux phases de la procédure de calage en découplant l'évaluation

79 des coefficients de fonte nivale du reste du calage hydrologique. Elle explore, d'autre part,
80 l'utilisation de différents jeux de données d'entrée de précipitation.

81 Parajka et Blöschl [2008] ont démontré que l'utilisation des données de couverture neigeuse du
82 *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), embarqué sur les satellites Terra et
83 Aqua [Hall et al. 2016], permet une amélioration des performances de la modélisation de la neige.
84 He et al. [2014] proposent une méthode pour l'estimation sans calage des facteurs degré-jour à
85 partir de la couverture neigeuse de MODIS et de mesures au sol de la hauteur de neige. Pistocchi et
86 al. [2017] ont également obtenus de bons résultats en utilisant des valeurs journalières de
87 température et de précipitation et les données MODIS. Ils ont mis en avant l'importance de la
88 qualité des précipitations et des températures utilisées comme données d'entrée. Contrairement à He
89 et al [2014], la présente étude utilise uniquement les données MODIS et non pas de hauteurs de
90 neige mesurées au sol. De plus, une différence avec Pistocchi et al. [2017] réside dans l'utilisation
91 de données horaires plutôt que journalières ainsi qu'un pas de temps horaire pour les simulations.

92 **II BASSIN D'ÉTUDE ET DONNÉES D'ENTRÉE**

93 Le bassin de la Grande-Eau, un sous-bassin du bassin MINERVE situé dans sa partie nord-ouest,
94 couvre une superficie de 153.9 km² dont seulement environ 1% est couvert par de la glace.
95 L'altitude varie entre 378 et 3200 m s.m. L'écoulement y est légèrement perturbé par une
96 installation hydro-électrique mais l'effet étant limité, cela n'a pas été modélisé.

97 Le bassin de la Grande-Eau ne dispose pas à l'intérieur de son territoire de station du réseau
98 SwissMetNet (SMN), considéré comme le réseau de référence de par la qualité des équipements
99 installés. Deux stations SMN, Aigle et Derborence (respectivement AIG et DER sur la Figure 1)
100 sont cependant proches du bassin. La station Leysin du réseau MeteoGroup (MG) est quant à elle
101 située dans le bassin. Il faut cependant noter ici qu'une comparaison entre les deux réseaux de
102 stations météorologiques a démontré une tendance des stations MG à relever moins de précipitation
103 que les stations du réseau SMN [Foehn et al., 2018]. Deux cas de figure sont donc explorés :
104 i) utilisation des données SMN uniquement ; ii) utilisation des données SMN et MG combinées.

105 En plus des réseaux de mesure au sol, deux produits d'estimations quantitatives de précipitation
106 sont employées dans cet article: 1) le produit opérationnel horaire de MétéoSuisse [Sideris et al.,
107 2014], ci-après noté EQP1, combinant les données des radars météorologiques de MétéoSuisse avec
108 les données du réseau SMN ; 2) le produit décrit dans Foehn et al. [2018], ci-après noté EQP2,
109 utilisant les mêmes données que EQP1 mais intégrant également les données du réseau MG comme
110 variable secondaire dans un co-krigeage avec régression. Dans les deux cas, la résolution spatiale
111 des produits est de 1km·1km et la résolution temporelle de 1 heure. Il faut relever que le produit
112 EQP1 ne fournit pas de valeur pour 50 à 80 heures par année en moyenne, soit entre 0.5 et 1% du
113 temps. Une pluie de 0 mm/h sur tout le territoire est attribuée pour ces heures.

114 Concernant les températures, un produit spatialisé de température (PST) a été calculé à partir des
115 stations météorologiques à disposition sur le bassin. L'interpolation de ce produit a été réalisée avec
116 un krigeage avec dérive externe utilisant un modèle numérique de terrain. Cela permet de fournir
117 des valeurs de température avec la même résolution temporelle et spatiale que les produits de
118 précipitation.

119 **III MODÉLISATION HYDROLOGIQUE**

120 Le bassin d'étude est modélisé avec les modèles hydrologiques semi-distribués SOCONT et GSM
121 [García Hernández et al., 2018], illustrés dans la Figure 2. Le Tableau 1 fournit une description des
122 principaux paramètres de chaque modèle.

123 Pour la modélisation hydrologique du bassin, ce dernier a été divisé en 6 sous-bassins, sous-
124 divisés en 23 bandes d'altitude non-glaciaires (SOCONT) et 2 bandes d'altitude glaciaires (GSM).
125 L'utilisation de bandes d'altitude permet de reproduire de manière adaptée les processus liés à la
126 température et donc à l'altitude, telles que la fonte nivale ou glaciaire.

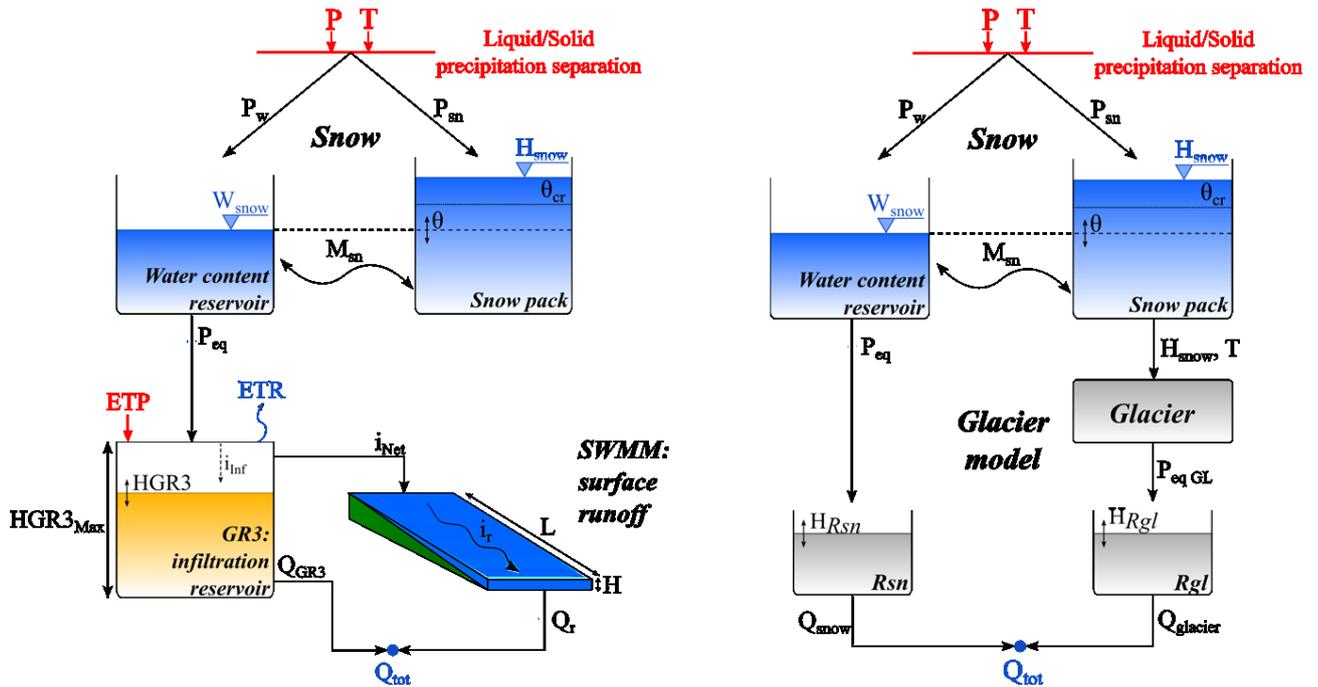


Figure 2 Modèle SOCONT (gauche) et GSM (droite). Source : García Hernández et al. [2018].

Tableau 1 Principaux paramètres des modèle SOCONT et GSM.

Variable	Unité	Modèle SOCONT
Asn	mm/°C/j	Coefficient degré-jour de fonte nivale
HGR3Max	m	Hauteur maximale du réservoir d'infiltration
KGR3	1/s	Coefficient de vidange du réservoir d'infiltration
Kr	m ^{1/3} /s	Coefficient de Strickler pour l'écoulement de surface
Variable	Unité	Modèle GSM
Asn	mm/°C/j	Coefficient degré-jour de fonte nivale
Agl	mm/°C/j	Coefficient degré-jour de fonte glaciaire

L'implémentation et les calculs sont réalisés avec le logiciel RS MINERVE [Foehn et al., 2018; García Hernández et al., 2018], basé sur la programmation orientée objet et permettant la modélisation hydrologique et hydraulique avec une approche semi-distribuée. En plus de simuler les processus hydrologiques tels que les écoulements de surface et de sub-surface ou la fonte nivale et glaciaire, le logiciel permet également d'incorporer des éléments de contrôle hydraulique comme des barrages, déversoirs, dérivations, turbines ou pompes. Les données météorologiques (précipitation et température) sont estimées pour chaque bande d'altitude à partir des données fournies. L'évapotranspiration est estimée pour chaque bande d'altitude et pour l'ensemble de la période de simulation à partir des données de température selon la formule de Turc [1961].

Toutes les autres opérations, incluant l'acquisition de données, la génération d'images ou l'interaction avec le logiciel RS MINERVE sont effectuées à l'aide du langage de programmation R [R Core Team, 2018].

IV MÉTHODOLOGIE DE CALAGE ET DE VALIDATION

Les différents produits de précipitations présentés précédemment sont utilisés pour le calage selon 2 approches. La première approche consiste en un calage conventionnel des paramètres sur la base des données de débit à l'exutoire du bassin. La seconde approche découple la procédure de calage en ajoutant une première phase permettant d'évaluer les coefficients de fonte nivale sur la base de données satellitaires, avant de caler dans la seconde phase le restant des paramètres sur la base du débit observé. Le Tableau 2 liste les paramètres calés dans chaque phase pour les deux approches.

150 Tableau 2 Les deux approches de calage avec les paramètres calés dans chaque phase.

	Paramètre calé dans la phase 1	Paramètres calés dans la phase 2
Calage conventionnel	-	HGR3Max ; KGR3 ; Kr ; Asn ; Agl
Calage en 2 phases	Asn	HGR3Max ; KGR3 ; Kr ; Agl

151

152 La première phase considère une variabilité spatiale du paramètre Asn. La seconde phase, et donc
153 le calage conventionnel, fixe par contre une valeur unique sur l'ensemble du bassin pour chaque
154 paramètre calé.

155 Pour le calage basé sur les observations de débit, les périodes listées dans le Tableau 3 ont été
156 considérées. Une période d'initialisation d'un an a été considérée autant pour le calage que la
157 validation, afin de définir des conditions initiales adéquates pour le modèle.

158

159 Tableau 3 Période utilisée pour le calage et la validation du modèle hydrologique.

Utilisation	Période
Calage	1.9.2015 – 1.9.2017
Validation	1.9.2012 – 1.9.2015

160

161 La fonction objectif permettant à l'algorithme de calage d'évaluer la performance de chaque
162 itération est composée de deux indicateurs [García Hernández et al., 2018] :

163 Fonction objectif = $0.5 \cdot \text{Nash-Sutcliffe} + 0.5 \cdot \text{coefficient de corrélation de Pearson}$.

164 Pour l'approche en deux phases (Figure 3), l'évaluation des valeurs de Asn s'effectue sur la base
165 d'une analyse pixel par pixel, en calant le paramètre de fonte de neige afin de reproduire le
166 comportement de la couverture neigeuse fourni par le *Moderate-Resolution Imaging*
167 *Spectroradiometer* (MODIS) [Hall et al. 2016]. Les valeurs journalières du Normalized Difference
168 Snow Index (NDSI), entre 0 et 100, peuvent être considérées comme un pourcentage
169 d'enneigement, et sont fournies par chacun des deux satellites. Elles sont combinées pour fournir
170 une valeur journalière de couverture neigeuse. La résolution spatiale du produit MODIS est de
171 500m·500m et définit la résolution spatiale utilisée pour la présente étude.

172 Pour chaque pixel, les valeurs de précipitation, de température et de couverture neigeuse sont
173 extraites d'une base de données spatiale. Le modèle de fonte nivale des modèles SOCONT et GSM
174 est ensuite utilisé pour simuler un équivalent en eau de la neige sur la période considérée. Afin de
175 permettre une comparaison avec les valeurs de couverture neigeuse, ces dernières ne fournissant pas
176 d'estimation quantitative de l'équivalent en eau de la neige, une binarisation de l'information est
177 réalisée. Pour ce faire, les seuils présentés dans le Tableau 4 sont utilisés pour définir la présence ou
178 l'absence de neige [Parajka et Blöschl, 2008].

179

180 Tableau 4 Seuil pour définir la présence de neige ou non.

Variable	Seuil
Equivalent en eau simulé	0.1 mm
NDSI (MODIS)	25%

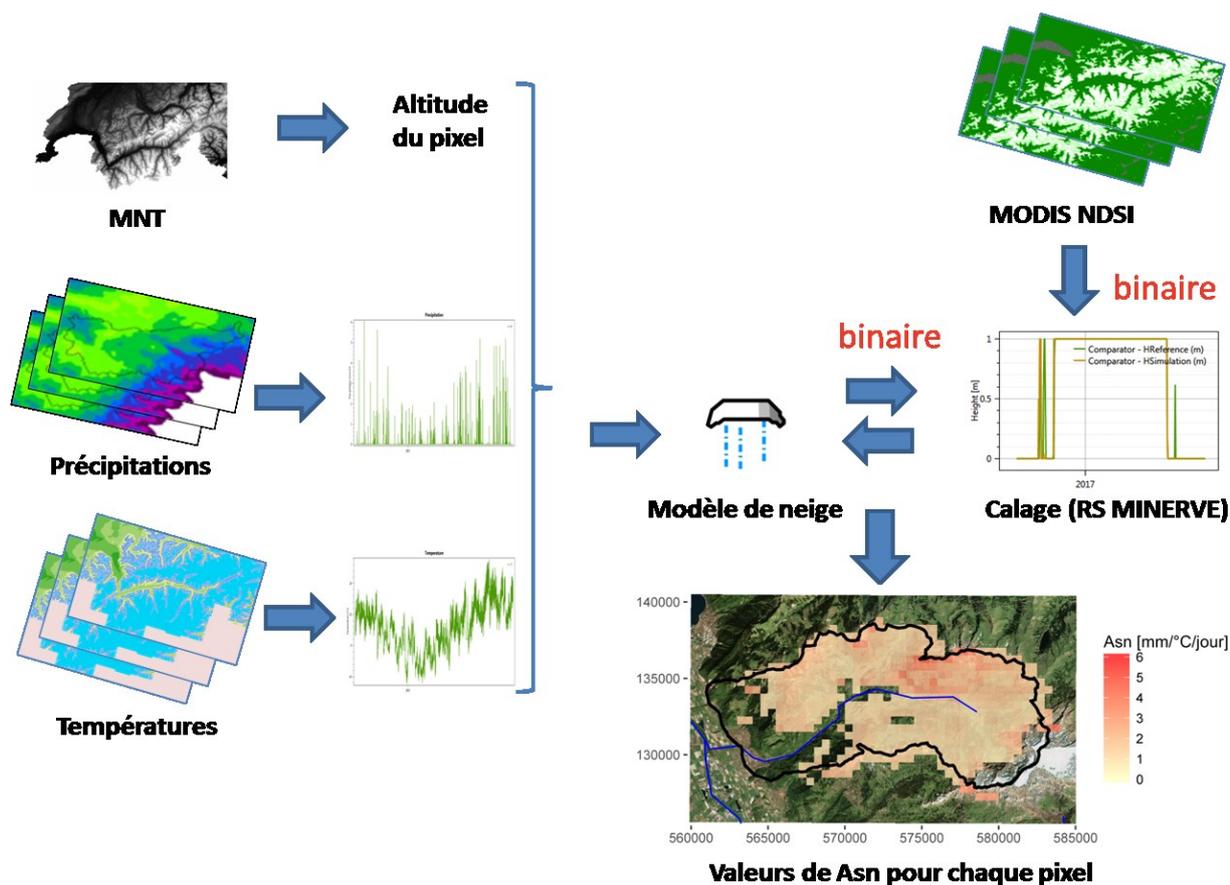


Figure 3 Schéma du calage du paramètre Asn (Phase 1 du calage en 2 phases).

181
182

183 Le paramètre Asn est ensuite calé de manière automatique à l'aide de la fonctionnalité du logiciel
184 RS MINERVE permettant de travailler en ligne de commande [García Hernández et al., 2018]. Le
185 calage se base sur le coefficient de performance de Nash-Sutcliffe (NS) comme unique indicateur et
186 est réalisé sur une période de 5 ans (1.9.2012-1.9.2017). Le calcul est réalisé sur tous les pixels du
187 bassin à l'exclusion des pixels glaciaires. En effet, la présence de glace toute l'année ne permet pas
188 de déterminer la présence de neige.

189 Une fois le calage réalisé sur tous les pixels, les valeurs sont agrégées par bande d'altitude. Afin
190 de ne considérer dans l'agrégation que les pixels pour lesquels le comportement observé a pu être
191 bien reproduit, seuls les pixels ayant obtenu une valeur de NS de 0.6 ou plus sont utilisés. Le seuil
192 de 0.6 a été défini sur la base d'une analyse pour assurer notamment l'exclusion des pixels les
193 moins élevés en altitude et sur lesquels les jours avec neige étaient trop peu nombreux pour
194 permettre un calage robuste. De plus, un minimum de 5 pixels valables par bande d'altitude est
195 exigé. Pour les bandes d'altitude en contenant moins, la valeur agrégée de la bande d'altitude la plus
196 proche respectant cette condition est considérée. Pour les bandes glaciaires, la valeur de Asn est
197 définie en considérant la valeur de la bande d'altitude non-glaciaire la plus proche.

198 Afin de permettre une comparaison entre les produits, aucun coefficient multiplicateur des
199 précipitations n'a été appliqué lors du calage. La valeur de ce coefficient est donc fixé à 1 afin
200 d'identifier d'éventuels problèmes de biais dans les résultats. En considérant les différents jeux de
201 données d'entrée et les différentes approches de calage précitées, six méthodes de calage ont été
202 retenues et sont présentées dans le Tableau 5.

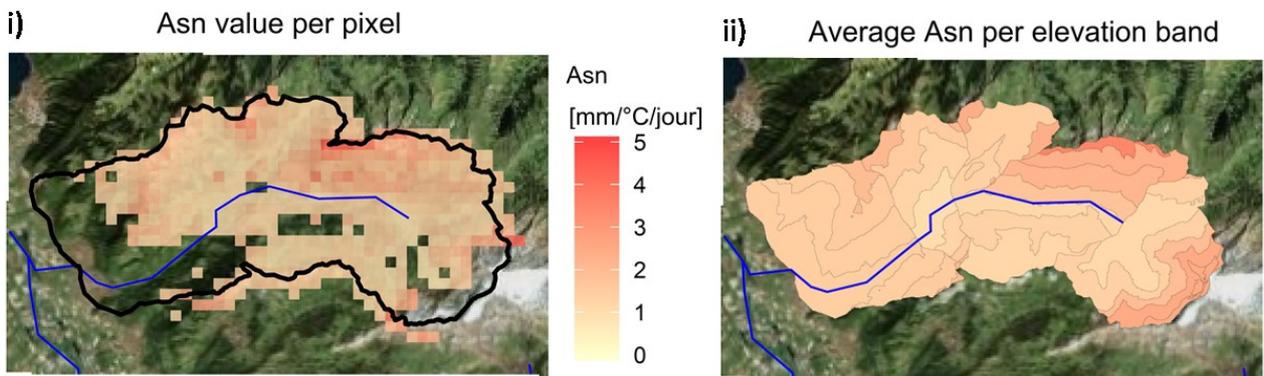
203 V RÉSULTATS

204 La première partie de cette section détaille les résultats concernant le calage des coefficients de
205 fonte de neige. La seconde partie présente les résultats globaux, avec une comparaison entre les
206 différentes méthodes ainsi qu'une discussion du gain du calage en deux phases.

Méthode	Données Précipitation	Données Température	Approche
Stations_SMN	Stations (SMN)	Stations (SMN)	Calage conventionnel
Stations_SMN+MG	Stations (SMN + MG)	Stations (SMN + MG)	Calage conventionnel
EQP1_1step	EQP1 (radar ; SMN)	PST (MNT ; SMN + MG)	Calage conventionnel
EQP2_1step	EQP2 (radar ; SMN + MG)	PST (MNT ; SMN + MG)	Calage conventionnel
EQP1_2steps	EQP1 (radar ; SMN)	PST (MNT ; SMN + MG)	Calage en 2 phases
EQP2_2steps	EQP2 (radar ; SMN + MG)	PST (MNT ; SMN + MG)	Calage en 2 phases

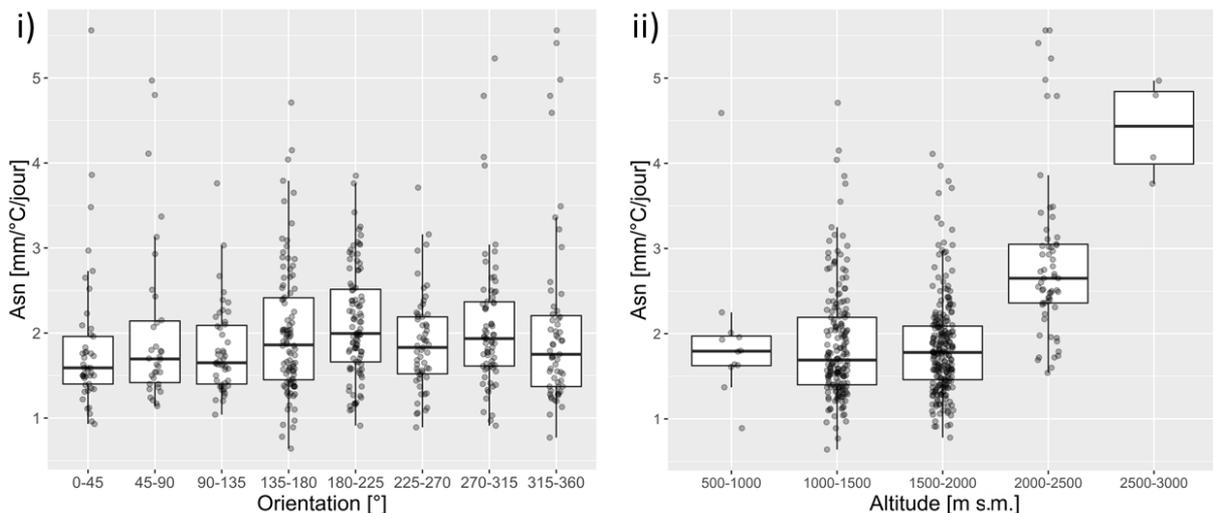
208 **V.1 Calage des coefficients de fonte de neige**

209 Nous présentons ici les résultats obtenus pour l'estimation des coefficients de fonte de neige avec
 210 les méthodes EQP1_2steps et EQP2_2steps. La Figure 4 présente les valeurs obtenues avec la
 211 méthode EQP1_2steps (gauche) et le résultat après agrégation par bande d'altitude (droite). Seules
 212 les valeurs des pixels ayant obtenu une valeur de NS supérieure à 0.6 lors du calage sont affichées.



213 Figure 4 Valeurs du coefficient Asn obtenus i) pixel par pixel avec la méthode EQP1_2steps ; ii) par bande d'altitude
 214 après agrégation des pixels présenté en i). Source de données : Bing Maps pour le fond de carte.
 215

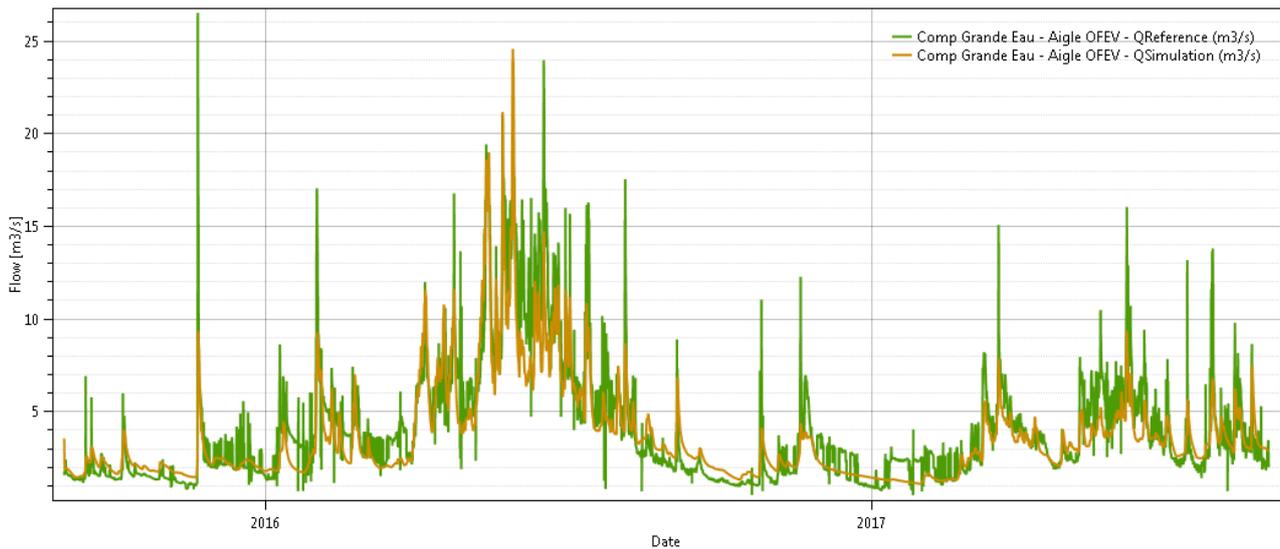
216 La Figure 5 présente la distribution des valeurs de Asn en fonction de l'orientation (par rapport au
 217 nord et dans le sens horaire) et de l'altitude. L'orientation de chaque pixel a été définie à partir
 218 d'une analyse du modèle numérique de terrain en considérant des pixels de 150m·150m. La
 219 comparaison avec l'orientation illustre l'ensoleillement plus important sur les faces orientées sud,
 220 traduit par des valeurs de Asn plus élevées, synonymes d'une fonte plus rapide. Concernant
 221 l'altitude, les valeurs ont tendance à augmenter avec l'altitude, peut-être expliqué en partie par un
 222 effet proportionnellement plus important en altitude du rayonnement par rapport à la température.



223 Figure 5 Distribution des coefficients Asn en fonction de i) l'orientation et ii) l'altitude. Chaque point correspond à un
 224 pixel de l'analyse. Seuls les pixels ayant obtenu une valeur de NS supérieure à 0.6 sont affichés.
 225

226 **V.2 Résultats du calage avec les données de débit**

227 Pour toutes les méthodes listées dans le Tableau 5, le calage basé sur les données de débit a été
 228 réalisé. Pour les méthodes avec un calage en 2 phases, les valeurs pour le paramètre Asn obtenues
 229 lors de la première phase ont été intégrées dans le modèle avant le calage sur les débits (seconde
 230 phase). La Figure 6 fournit le résultat de la validation pour la méthode Stations_SMN, résultat d'un
 231 calage uniquement sur les données de débit et employant les données du réseau SMN comme
 232 données d'entrée. Une bonne correspondance entre débits simulé observé est constatée. Pour les
 233 autres méthodes, la correspondance est légèrement moins bonne, avec des débits simulés tendant à
 234 être inférieurs que les débits observés, essentiellement les six premiers mois de chaque année.



235 Figure 6 Débits observé et simulé pour la méthode Stations_SMN, résultat d'un calage en une phase utilisant
 236 uniquement les données de débit comme référence et alimenté par les données du réseau SwissMetNet pour les données
 237 d'entrée météorologiques.
 238

239 L'analyse des indicateurs de performance obtenus (Tableau 6) montre que l'utilisation de produits
 240 d'estimation quantitative des précipitations n'entraîne pas forcément une augmentation de la
 241 performance. En effet, lors du calage, la meilleure valeur a été obtenue par la méthode n'utilisant
 242 que les valeurs du réseau SMN. Cela n'est par contre pas le cas pour la validation, où les méthodes
 243 utilisant les produits spatialisés de précipitation fournissent en partie de meilleures performances.

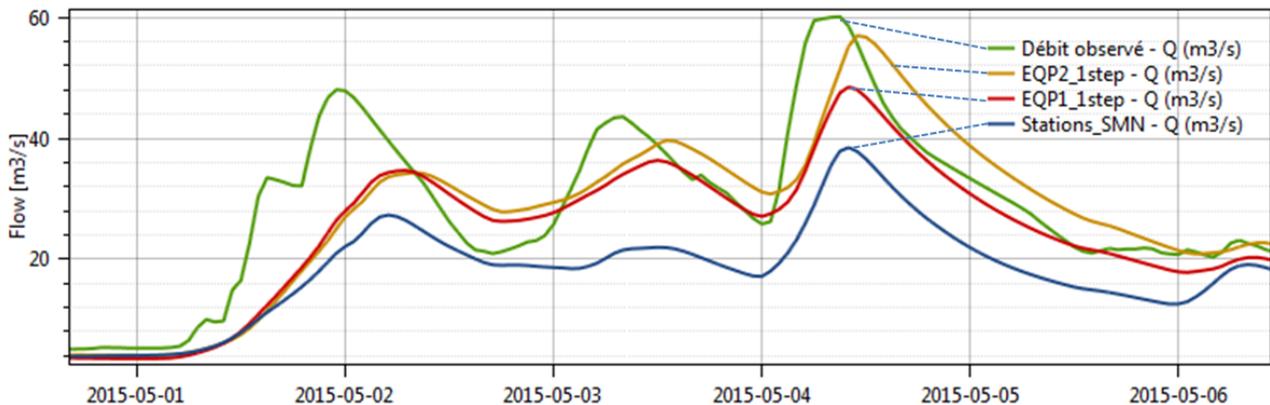
244 Un autre résultat évident est la sous-estimation des volumes totaux constatée pour toutes les
 245 méthodes. La différence s'observe notamment de janvier à juin et suggère une sous-estimation de la
 246 fonte nivale, vraisemblablement expliquée par une sous-estimation des précipitations solides.

247
 248 Tableau 6 Valeurs obtenues pour les indicateurs de performance lors du calage et de la validation.

Méthode	Calage (2015-2017)				Validation (2012-2015)		
	Fonction objectif	NS	Corrélation de Pearson	Biais de volume [%]	NS	Corrélation de Pearson	Biais de volume [%]
Stations_SMN	0.85	0.80	0.91	-9.9	0.60	0.85	-24.8
Stations_SMN+MG	0.84	0.78	0.91	-18.2	0.58	0.87	-31.6
EQP1_1step	0.75	0.62	0.88	-28.1	0.62	0.89	-31.7
EQP2_1step	0.75	0.62	0.88	-27.3	0.64	0.85	-17.4
EQP1_2steps	0.76	0.61	0.91	-30.0	0.60	0.88	-33.2
EQP2_2steps	0.76	0.63	0.89	-27.1	0.69	0.87	-17.0

251 Concernant le calage en 2 phases, l'approche semble fournir de meilleurs résultats que le calage
252 conventionnel selon l'indicateur de performance NS, mais tend à péjorer la performance selon le
253 coefficient de corrélation de Pearson. Ces résultats encouragent à poursuivre le développement de
254 cette approche. Il faut cependant noter que la présente analyse se base uniquement sur une période
255 limitée et que la méthode devra être appliquée à d'autres bassins avant de pouvoir tirer des
256 conclusions plus générales.

257 De plus, dans une perspective de prévisions de crues, la seule crue survenue durant la période de
258 validation, en mai 2015, a été analysée (Figure 7). Les produits spatialisés ont permis une
259 reproduction bien meilleure du débit observé et du pic de crue, la méthode Stations_SMN souffrant
260 notamment d'une forte sous-estimation du débit sur l'événement étudié.



261 Figure 7 Comparaison entre le débit observé et les débits simulés selon différentes méthodes pour la crue de mai 2015
262 (période de validation).
263

264 VI CONCLUSION

265 Le présent article étudie l'utilisation de différents produits de précipitation pour le calage d'un
266 bassin hydrologique, avec d'une part des mesures ponctuelles et d'autre part l'utilisation de produits
267 spatialisés de précipitation. L'analyse explore également une division en deux phases du calage
268 hydrologique, avec l'introduction d'une première phase permettant de caler les paramètres de fonte
269 de neige sur la base de données satellitaires.

270 Les résultats montrent que l'utilisation de produits spatialisés de précipitation n'entraîne pas
271 forcément de meilleures performances du modèle. Par contre, lors d'une crue en 2015 (période de
272 validation), l'utilisation de produits spatialisés de précipitation a permis une meilleure
273 représentation des débits observés. Un biais négatif en termes de volume est en outre observé sur le
274 bassin d'étude pour toutes les méthodes.

275 Concernant le calage en 2 phases, l'estimation a priori des coefficients de fonte de neige a permis
276 d'obtenir en partie de meilleures performances lors de la validation que le calage basé uniquement
277 sur les données de débit. La méthode devra encore être appliquée à d'autres bassins et sur une plus
278 longue période afin de pouvoir tirer des conclusions plus générales.

279 VII REMERCIEMENTS

280 Le projet de thèse de doctorat dont est issu cet article est réalisé à l'Ecole Polytechnique Fédérale
281 de Lausanne (EPFL) en Suisse et est cofinancé par le Centre de recherche sur l'environnement alpin
282 (CREALP), situé à Sion (Suisse) et l'Office Fédéral de l'Energie. Les données de stations de
283 mesure utilisées pour le projet proviennent du réseau SwissMetNet de MétéoSuisse et du réseau de
284 la société MeteoGroup Switzerland AG. Les données radar ainsi que le produit d'estimation
285 quantitative de précipitation sont également fournis par MétéoSuisse. Les données de débit
286 proviennent de l'Office fédéral de l'Environnement. Les auteurs expriment leurs remerciements à
287 tous les fournisseurs de données.

288 **VIII REFERENCES**

- 289 Foehn, A., García Hernández, J., Roquier, B. and Paredes Arquiola, J. (2018). RS MINERVE – User’s
290 manual v2.10. *RS MINERVE Group, Switzerland*.
- 291 Foehn, A., García Hernández, J., Schaepli, B. and De Cesare, G. (2018). Spatial interpolation of precipitation
292 from multiple rain gauge networks and weather radar data for operational applications in Alpine catchments.
293 *Journal of Hydrology*, 563, 1092-1110. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.05.027
- 294 García Hernández, J., Claude, A., Paredes Arquiola, J., Roquier, B. and Boillat, J.-L. (2014). Integrated flood
295 forecasting and management system in a complex catchment area in the Alps – Implementation of the
296 MINERVE project in the canton of Valais. *Swiss Competences in River Engineering and Restoration*,
297 Schleiss, Speerli & Pfammatter Eds, 87-97. Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02676-6,
298 doi:10.1201/b17134-12
- 299 García Hernández, J., Paredes Arquiola, J., Foehn, A. and Roquier, B. (2018). RS MINERVE – Technical
300 manual v2.16. *RS MINERVE Group, Switzerland*.
- 301 Hall, D., Salomonson, V. and Riggs, G. (2016), « MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid,
302 Version 6 » and « MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6 ».
- 303 He, Z.H., Parajka, J., Tian, F.Q. and Blöschl, G. (2014). Estimating degree-day factors from MODIS for
304 snowmelt runoff modeling. *Hydrology and Earth System Sciences* 18, 4773–4789. doi:10.5194/hess-18-
305 4773-2014
- 306 Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues. Optimisation des opérations des
307 aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue. *PhD Thesis N° 3711*,
308 *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne*.
- 309 Parajka, J. and Blöschl, G. (2008). The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating
310 conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 358(3-4). 240–258. ISSN 00221694. doi:
311 10.1016/j.jhydrol.2008.06.006.
- 312 Pistocchi, A., Bagli, S., Callegari, M., Notarnicola, C. and Mazzoli, P. (2017). On the Direct Calculation of
313 Snow Water Balances Using Snow Cover Information. *Water* 9, 848. doi:10.3390/w9110848
- 314 R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical
315 Computing, Vienna, Austria, ISBN 3-900051-07-0, <https://www.R-project.org/>.
- 316 Sideris, I. V., Gabella, M., Erdin, R. and Germann, U. (2014). Real-time radar-rain-gauge merging using
317 spatio-temporal co-kriging with external drift in the alpine terrain of Switzerland: Real-time radar-rain-gauge
318 merging. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680). 1097–1111. ISSN 00359009. doi:
319 10.1002/qj.2188.
- 320 Swisstopo, 2005. DHM25 – The digital height model of Switzerland.
- 321 Swisstopo, 2012. Swiss Map Raster 1000 – National map of Switzerland 1:1million.
- 322 Swisstopo, 2013. swissTLM3D – large-scale topographical landscape model of Switzerland.
- 323 Swisstopo, 2017a. Vector200 – The small-scale landscape model of Switzerland.
- 324 Swisstopo, 2017b. swissBOUNDARIES3D - Administrative units of Switzerland.
- 325 Tobin, C. (2012). Improving alpine flood prediction through hydrological process characterization and
326 uncertainty analysis. *PhD Thesis N°5416, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne*.
- 327 Turc, L. (1961). Evaluation des besoins en eau d’irrigation, formule climatique simplifiée et mise à jour.
328 *Ann. Agro. 12: 13-49, INRA*.