



NEIGE ET CRUE

EXPERIENCE EDF

*Frédéric GOTTARDI - Rémy GARÇON (EDF-DTG)
Journées techniques
prévision des crues en montagne*

22 Janvier 2020

DTG



Importance de la neige dans l'hydrologie

Chambon



Serre-Ponçon



Mont Cenis



Grand'Maison



Girotte



Bious-Artigues



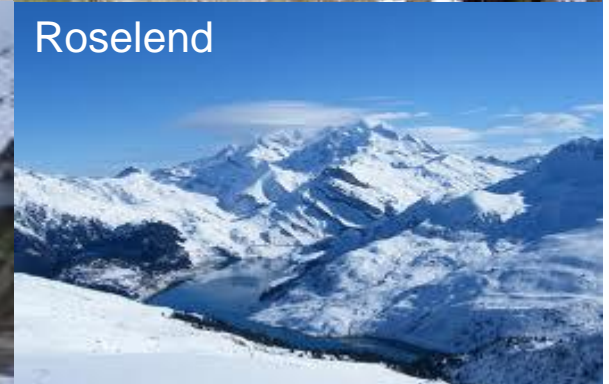
Tignes



Migouelou



Roselend



Importance de la neige dans l'hydrologie

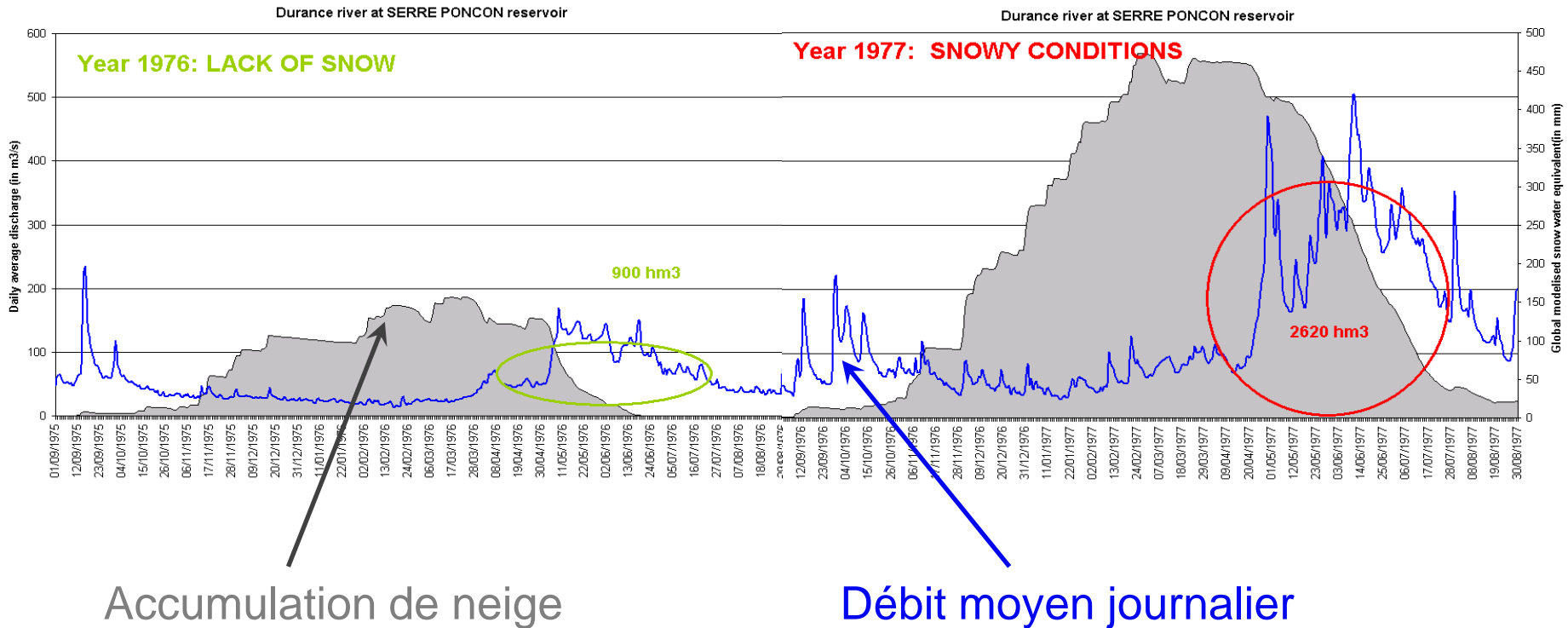
La neige a d'autant plus de poids en hydrologie que le climat est froid
(latitudes ou altitudes élevées)

Exemple de la Durance à Serre-Ponçon (3600 km², altitude médiane 2100m)

Apports annuels au lac : **2500 millions de m³**

Chutes de neige annuelles à l'amont : **1850 millions de m³**
d'équivalent en eau (chiffres moyens sur les 50 dernières années)

De la neige au débit



Le décalage temporel entre accumulation et fonte offre une opportunité particulière de prévision

Sommaire

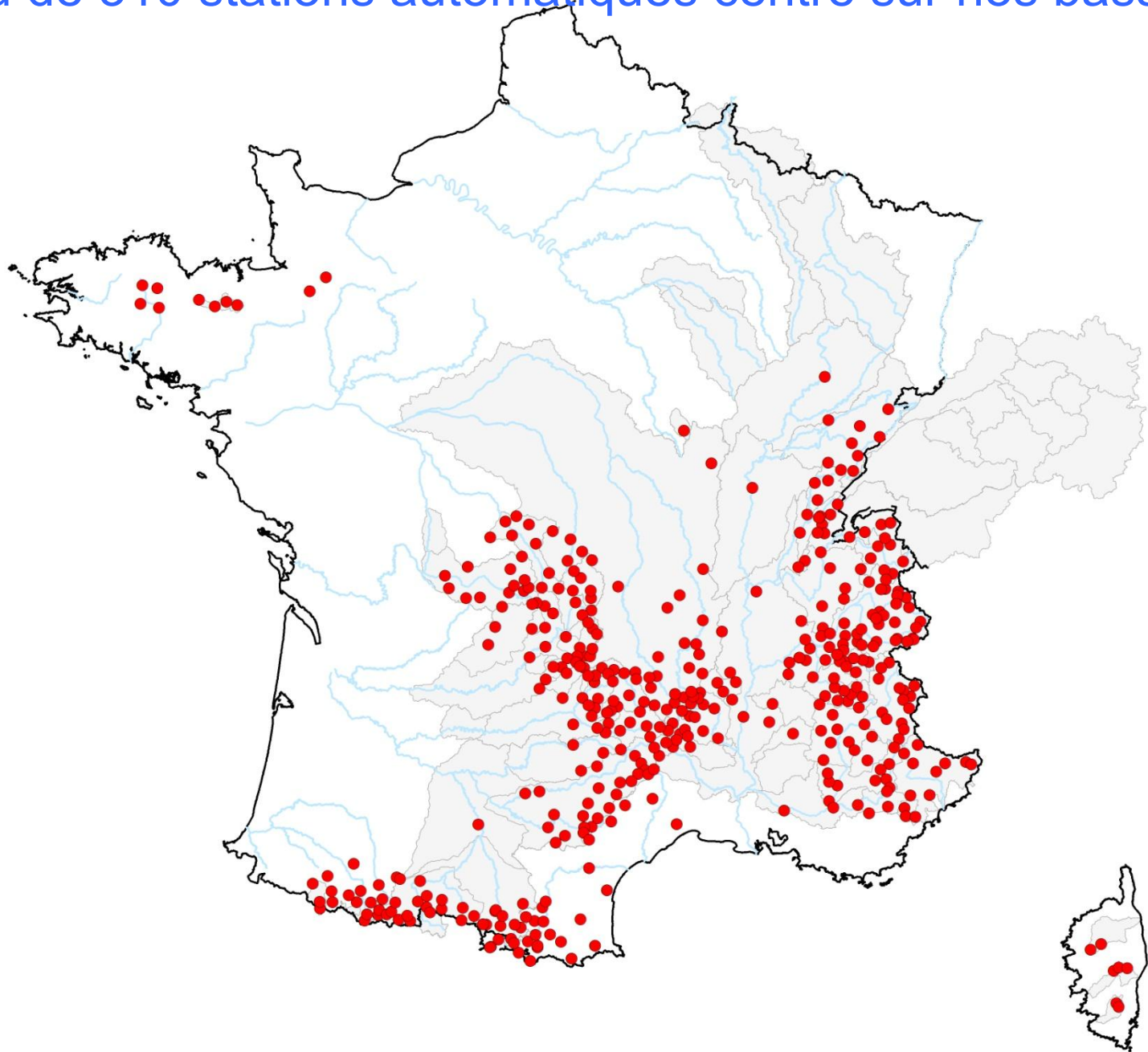
- **Présentation du réseau d'observation de la neige EDF**
- **Estimation du stock de neige par modélisation**
- **Étude de quelques cas remarquables**

La mesure de la neige

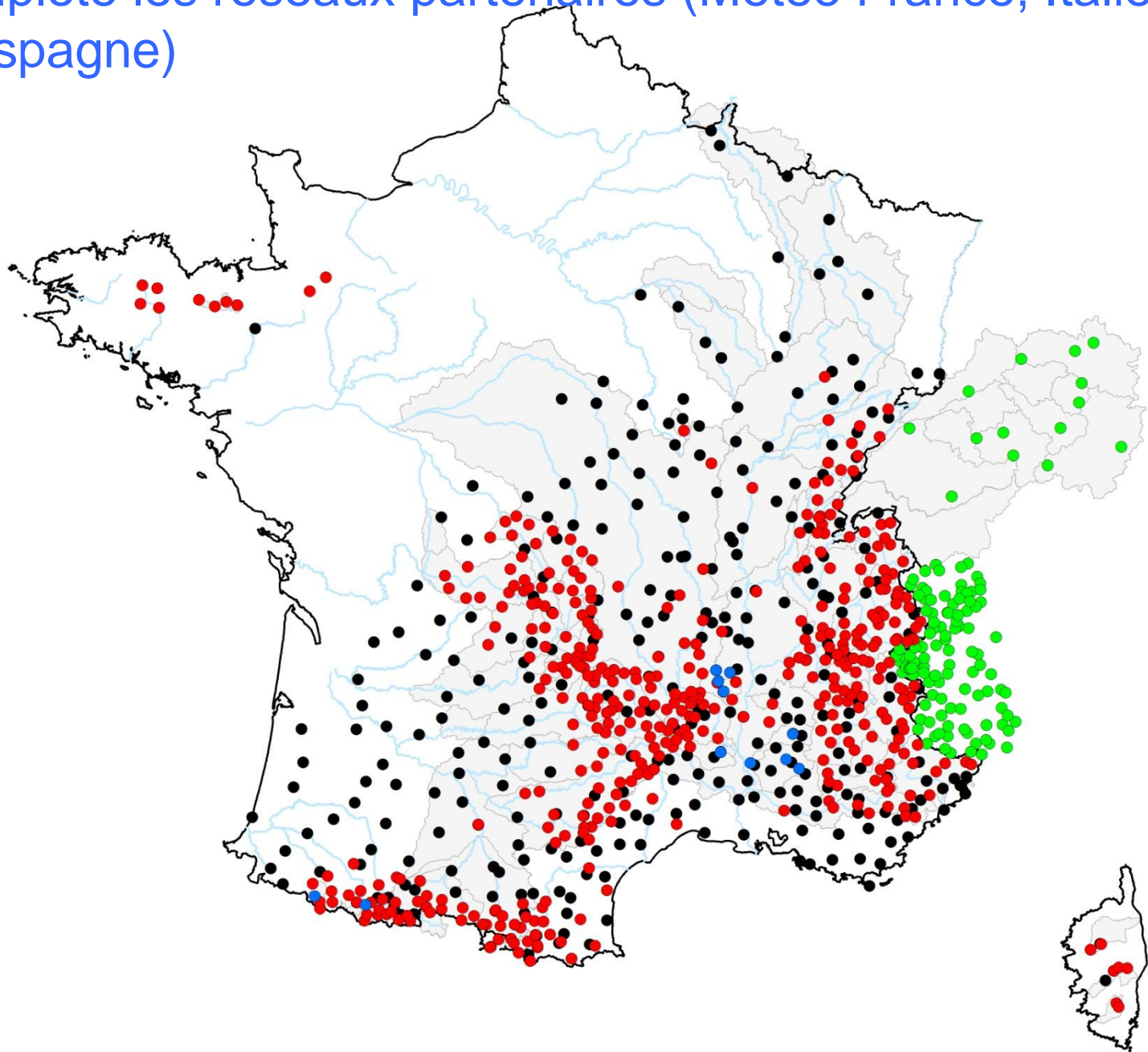
→ Précipitation neigeuse

→ Accumulation

Un réseau de 310 stations automatiques centré sur nos bassins...



...qui complète les réseaux partenaires (Météo France, Italie, Suisse, Espagne)



Mesure de la précipitation neigeuse

Un exemple de station climatologique
« standard » EDF

Abri pour la sonde
de température

Le PG2000
Pluviographe
2000 cm²

La neige, comme la pluie, se mesure en mm (de valeur en eau)

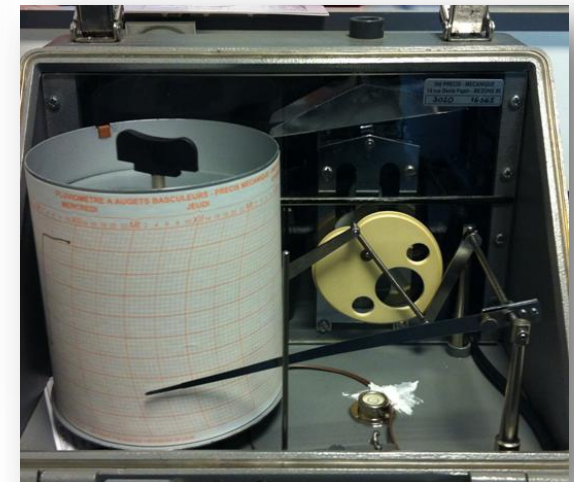
Mesure de la précipitation neigeuse



Cône de captation



Précis mécanique
à augets basculants



**Systeme de
chauffage pour faire
fondre la neige**

Mesure de la précipitation neigeuse : difficultés récurrentes

La légèreté de la neige, surtout quand elle est froide, la rend difficile à capter dès que le vent souffle.

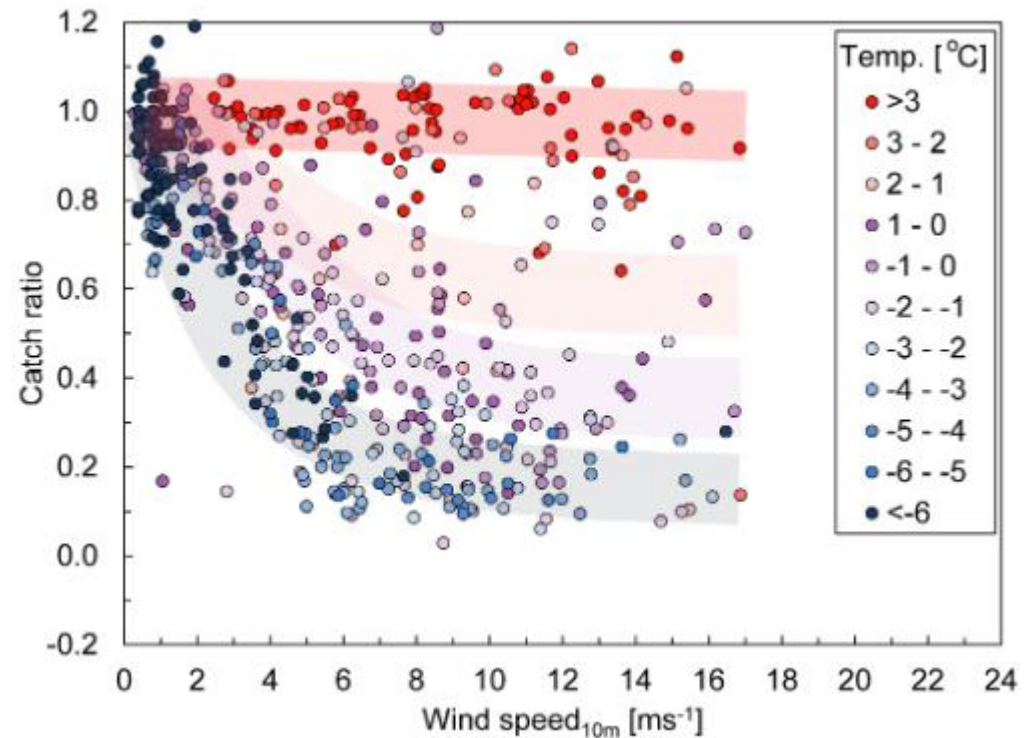
Les systèmes de chauffage eux-mêmes ajoutent des turbulences

La sous-captation est systématique et augmente avec l'altitude malgré les aménagements (cône protecteur de Nipher)

Mesure de la précipitation neigeuse : sous-estimation due au vent

Avec des températures inférieures à -2°C , les précipitations seraient sous-estimées :
de **20%** avec un vent de **2m/s** et
de **80%** au-dessus de **8m/s**

(Wolff et al. - 2015)



Mesure de l'accumulation

Du fait de l'irrégularité spatiale des dépôts et des dynamiques de fonte, en montagne, les sites de mesure sont matérialisés par des perches à neige...



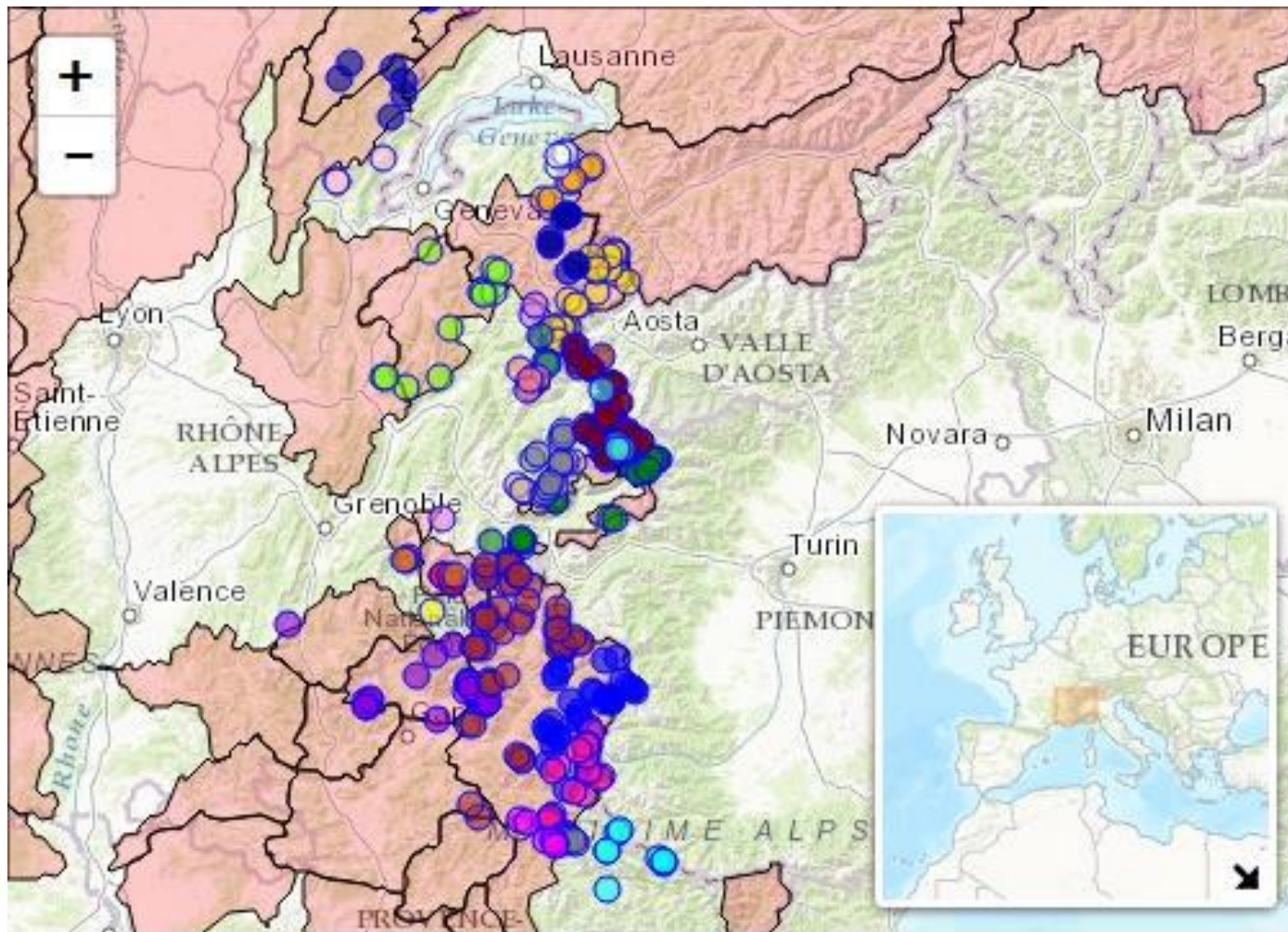
... depuis longtemps déjà !

Mesure de l'accumulation

120 emplacements encore actifs dans les Alpes

Relevés par des professionnels de la montagne

Fréquences hebdomadaire/quinzaine/mois suivant les enjeux



La mesure de la hauteur suffit-elle ?

Pour l'hydrologue, c'est la valeur en eau de la neige qui est pertinente
*(EEN, équivalent en eau de la neige
ou SWE pour les anglophones, en mm)*

*1 mètre de neige froide et récente (50kg/m^3) n'a pas la même conséquence
qu'un mètre de neige mûre de printemps (500kg/m^3)*

La mesure de l'équivalent en eau

La mesure manuelle la plus directe se fait par carottage et pesée :



Le matériel de mesure de l'équivalent en eau

Couteau



Carottiers

Potence

Barre de
cisaillement

Balance

Support de
pesée

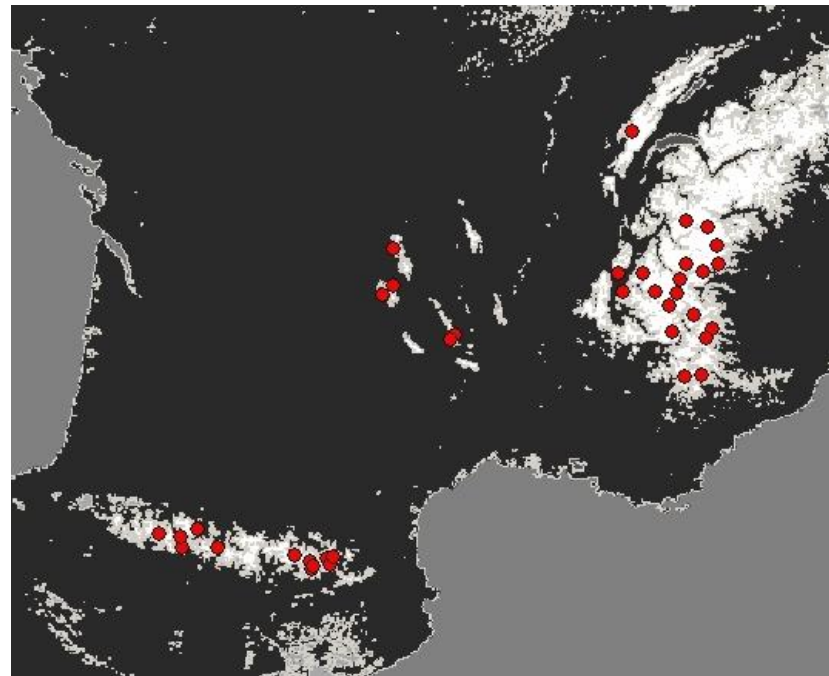
Sonde graduée

Un réseau automatique !

37 Nivomètres à Rayonnement Cosmique



Principe: Mesure de l'équivalent en eau du manteau neigeux par atténuation du rayonnement cosmique



Atténuation du rayonnement cosmique, le NRC

- ① Flux de neutrons variable dans le temps
Nécessité d'une référence

- ② Interception par l'atmosphère et
- ③ l'environnement du site de mesure

- ④ Interception par le manteau neigeux



Comptage des neutrons

Atténuation du rayonnement cosmique, le NRC

Trace du capteur au sol :



Le capteur sur site:



Atténuation du rayonnement cosmique, le NRC



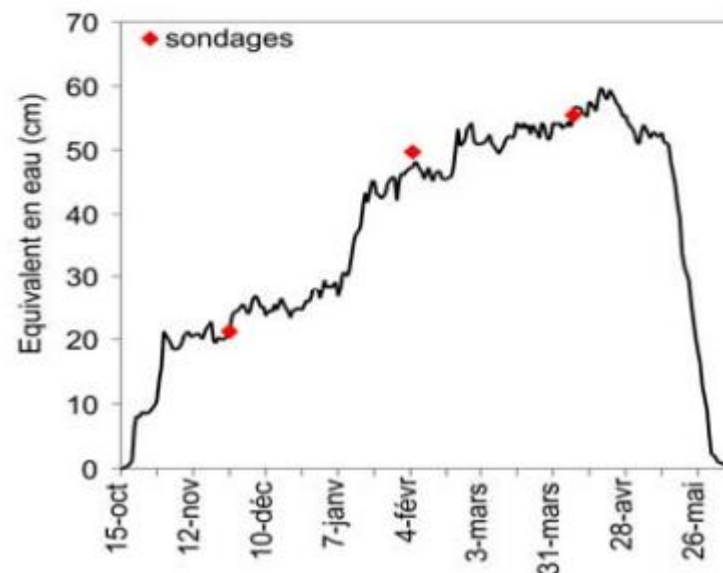
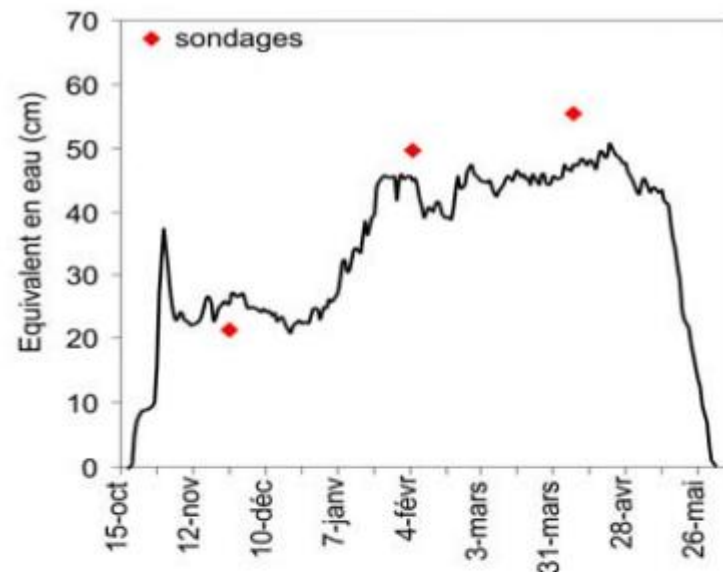
Dispositif complet (mesure de la hauteur de neige, du vent, de la température de l'air, de la pression atmosphérique, autonomie énergétique, communication)

Atténuation du rayonnement cosmique, le NRC

La mesure est perturbée par :

- La variabilité du rayonnement cosmique sur la planète (effets astronomiques)
- La pression atmosphérique
- L'environnement du site (nature et humidité du sol)

On a donc recours à des procédures de correction et à des recalages basés sur des mesures manuelles locales



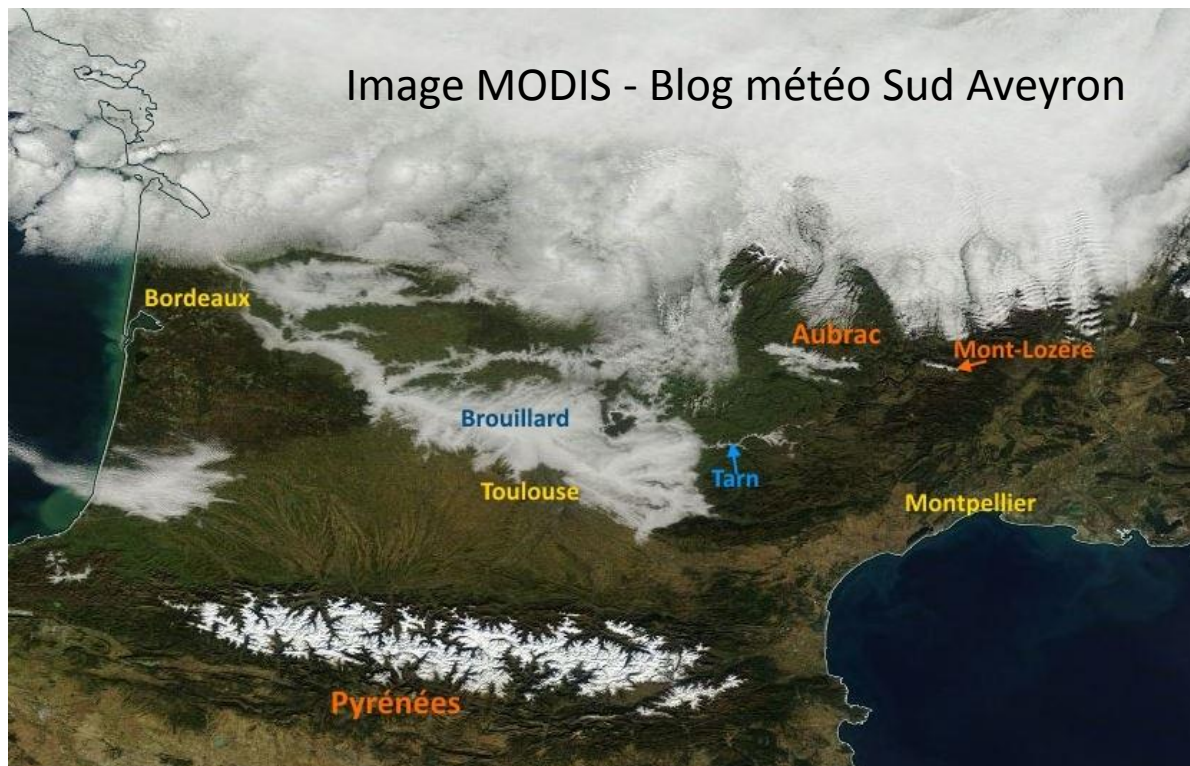
Estimation du stock de neige - limites de la mesure directe au sol

La mesure ponctuelle est onéreuse et, du fait de la variabilité spatiale, la donnée résultante est affectée d'une représentativité spatiale limitée.

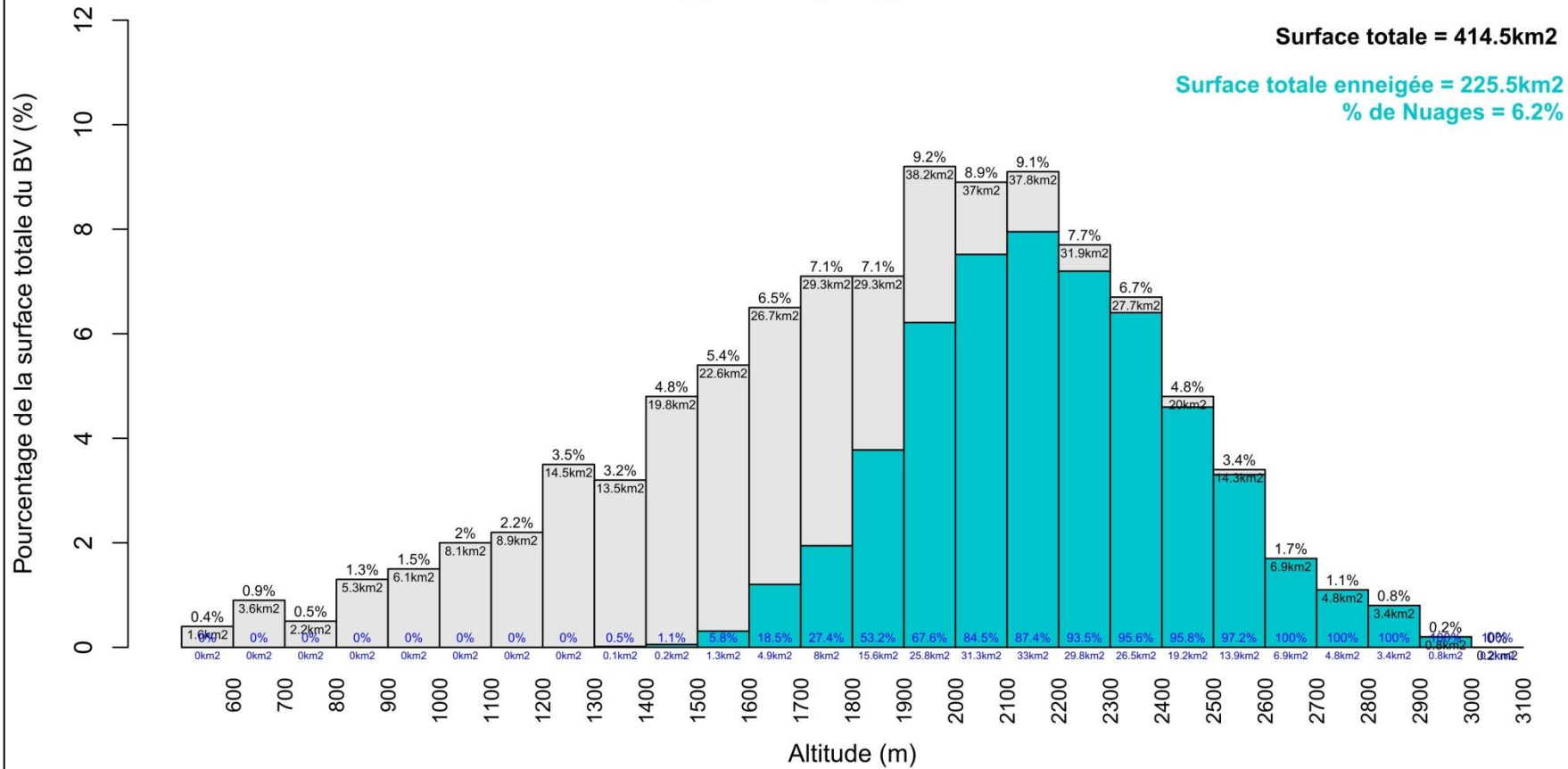
Les données de télédétection apportent déjà des informations sur l'existence ou non, en tout point, d'un couvert neigeux (données MODIS, radiomètres)

mais elles peinent à estimer son équivalent en eau malgré quelques espoirs (radars embarqués en bande X notamment)

Image MODIS - Blog météo Sud Aveyron



Surface enneigée par bande de 100m le 26/05/2013 bv_gavedepau_pescaдрere



Estimation du stock de neige par modélisation

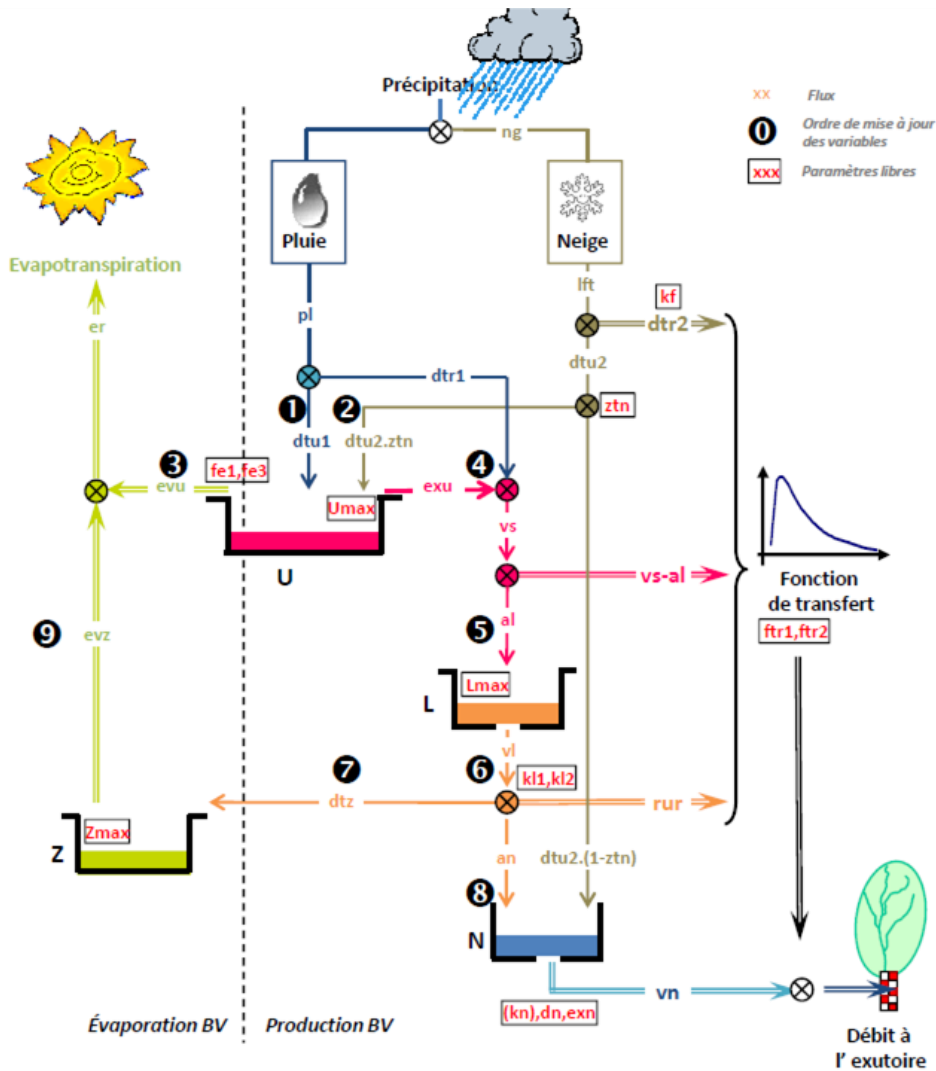
Estimation du stock de neige - intérêt de la modélisation

Face à ces limites, il est tentant de chercher à modéliser l'équivalent en eau à partir de données de précipitations et de températures d'air, un peu plus régulières dans l'espace, en tenant compte néanmoins des effets orographiques.

De telles modélisations, reproduisant à la fois l'accumulation et la fonte, sont souvent implicitement incluses dans les modèles hydrologiques

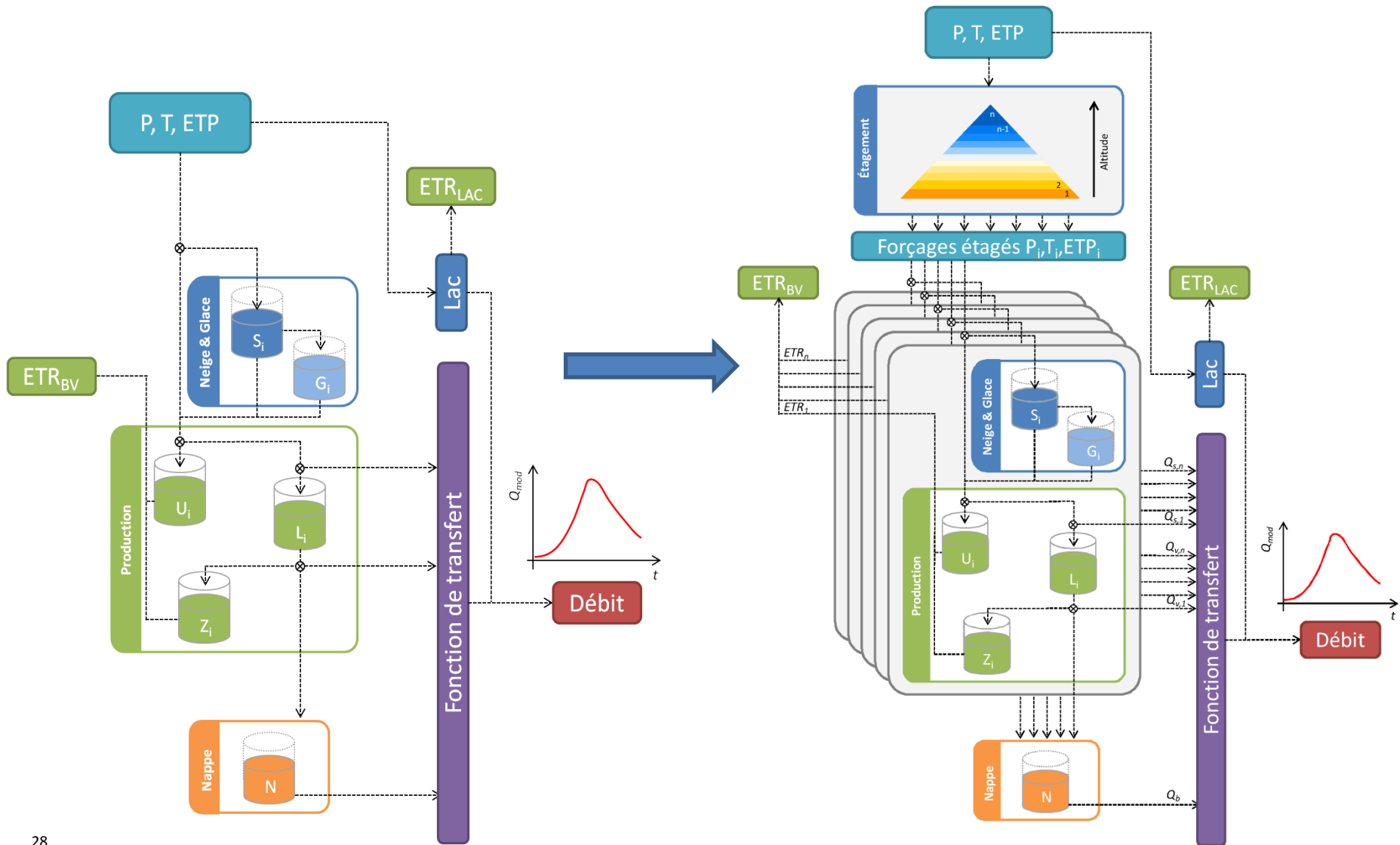
Exemple : avec le modèle MORDOR (EDF-DTG)

Estimation du stock de neige - intérêt de la modélisation



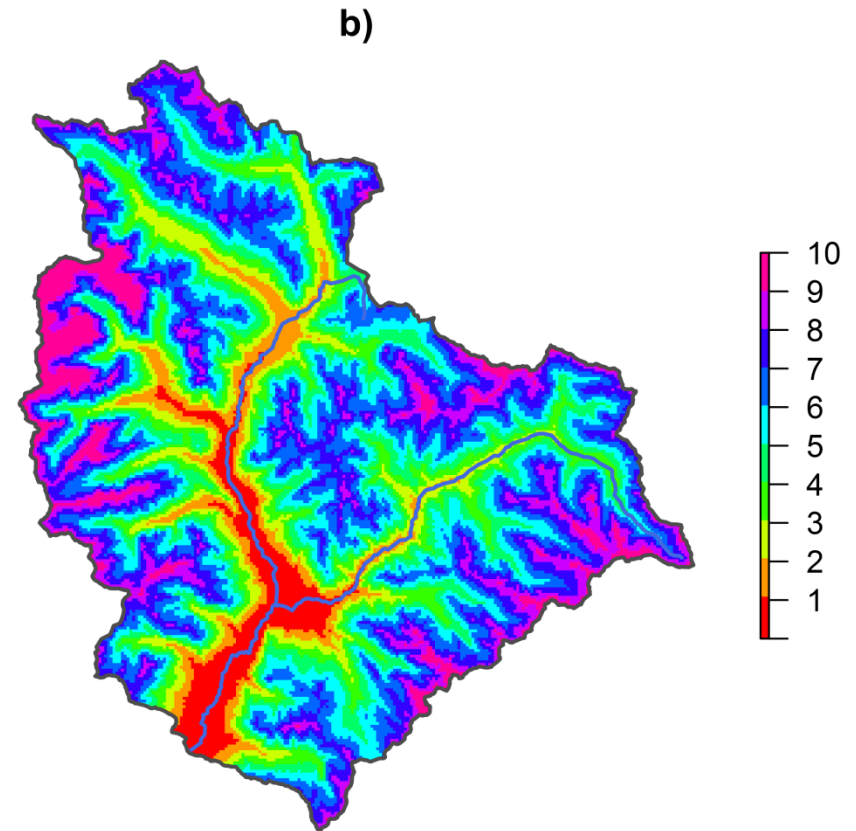
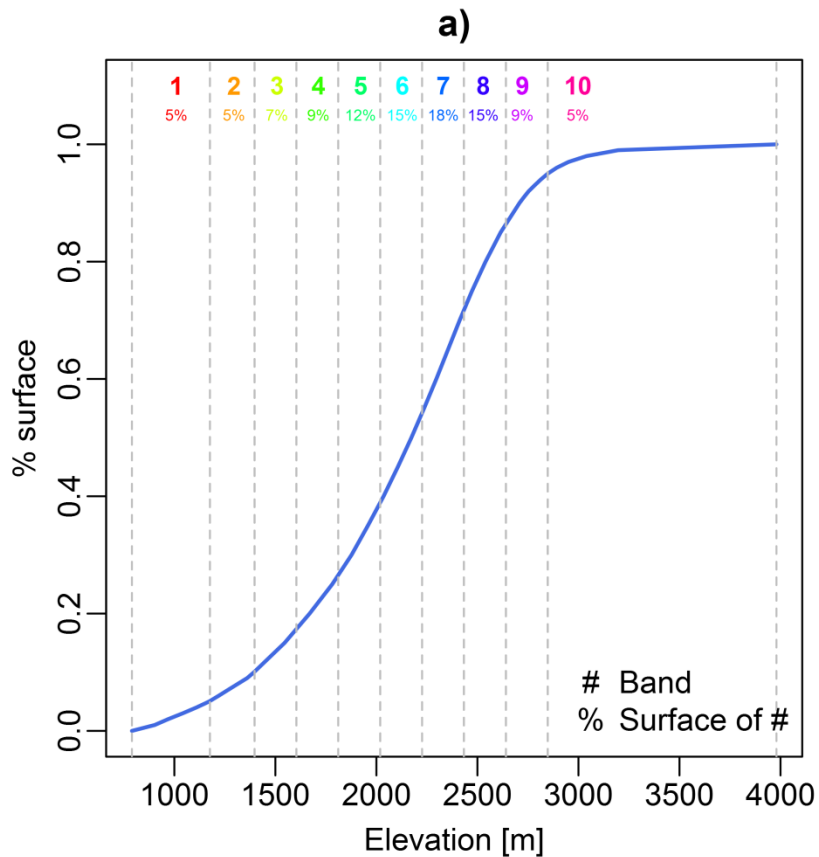
Le modèle MORDOR dans sa version historique (1990)
Utilisé depuis à EDF-DTG pour la prévision opérationnelle, l'estimation des crues extrêmes, la critique des données, etc...

Passage à une version distribuée par bandes d'altitude



Passage à une version distribuée par bandes d'altitude

Exemple de la Durance à la Clapière (2170 km²)

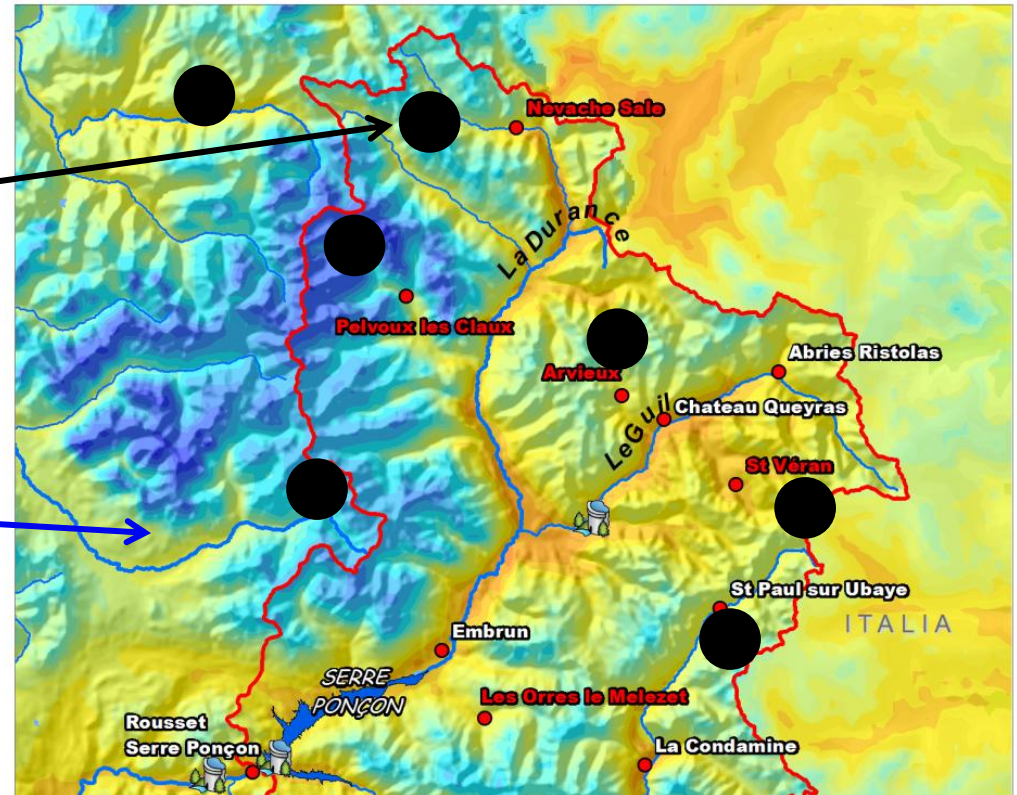


Mesure de précipitation et d'accumulation de neige sur la Durance amont

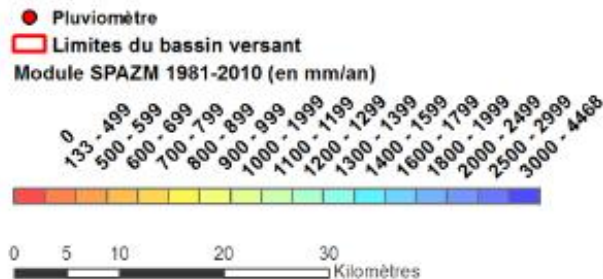
NRC de Chardonnet (2450m) →

Précipitation moyenne annuelle
Méthode SPAZM

(interpolation prenant en compte les effets orographiques et les types de circulation atmosphérique)

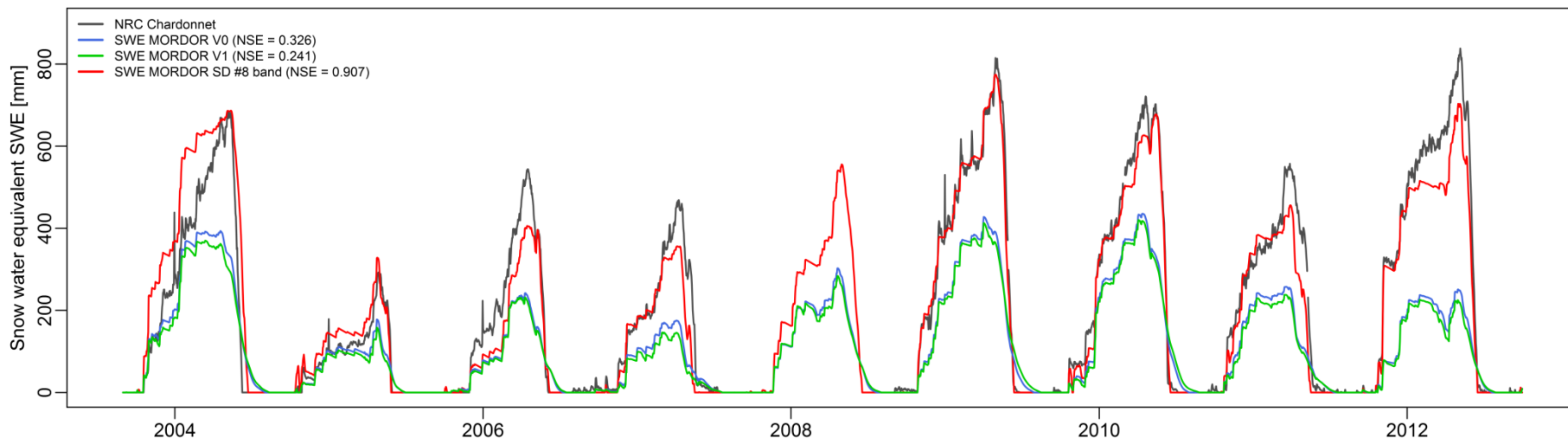


La Durance au barrage de Serre-Ponçon (3574 km²)



Valeur en eau de l'enneigement à Chardonnet

Confrontation de la modélisation aux observations du NRC



En noir, les observations du NRC

En bleu et vert, modélisation globale sur le bassin

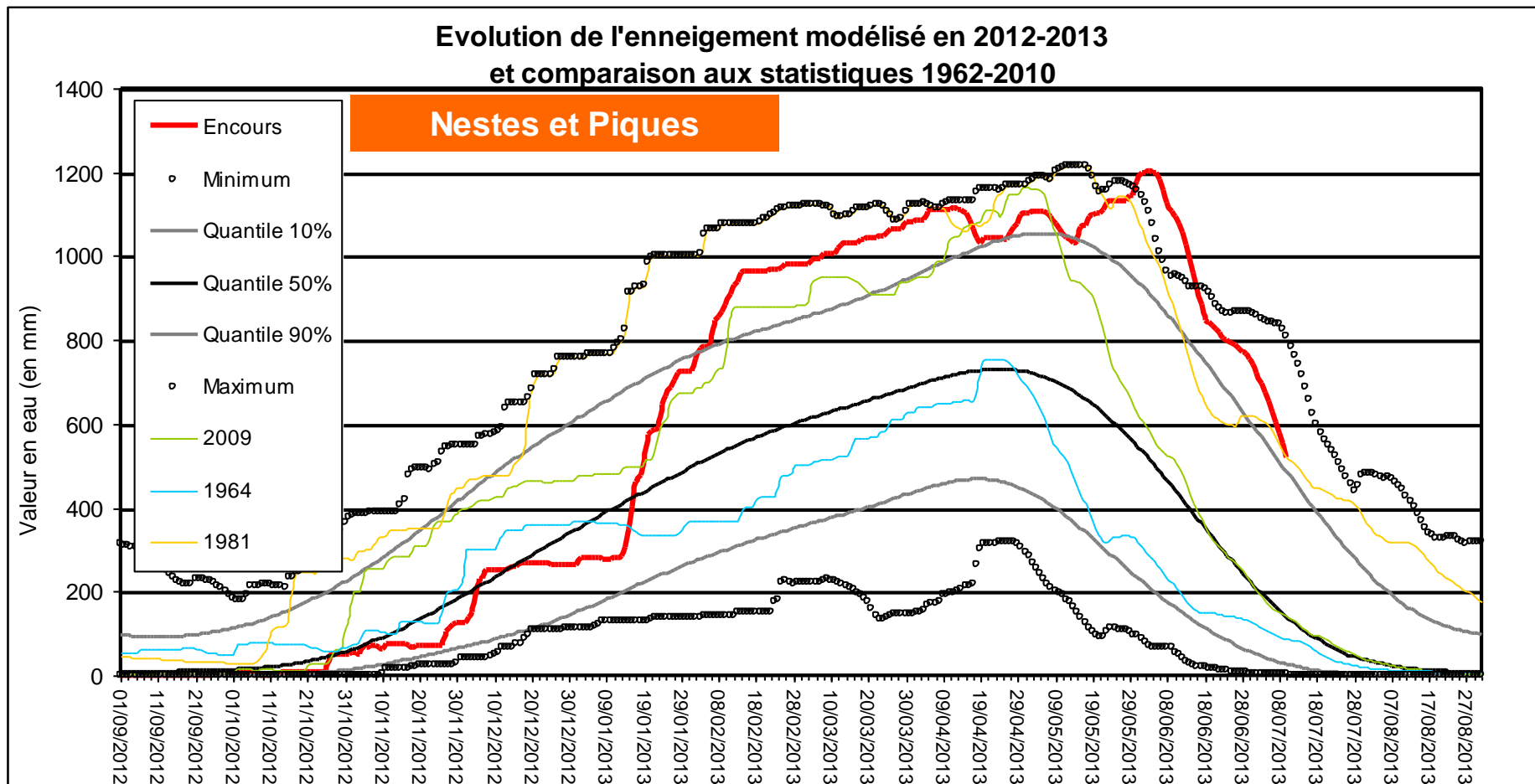
**En rouge, modélisation par bandes, résultats correspondant à la bande 8
(2430m à 2640m)**

De la complexité de la physique à l'observation empirique

Étude de quelques cas

Cas n°1 : les crues de juin 2013

Contexte : suite à un hiver perturbé et à un printemps frais et humide, l'enneigement atteint des valeurs records sur l'amont des Gaves, des Nestes et de la Pique



Cas n°1 : les crues de juin 2013

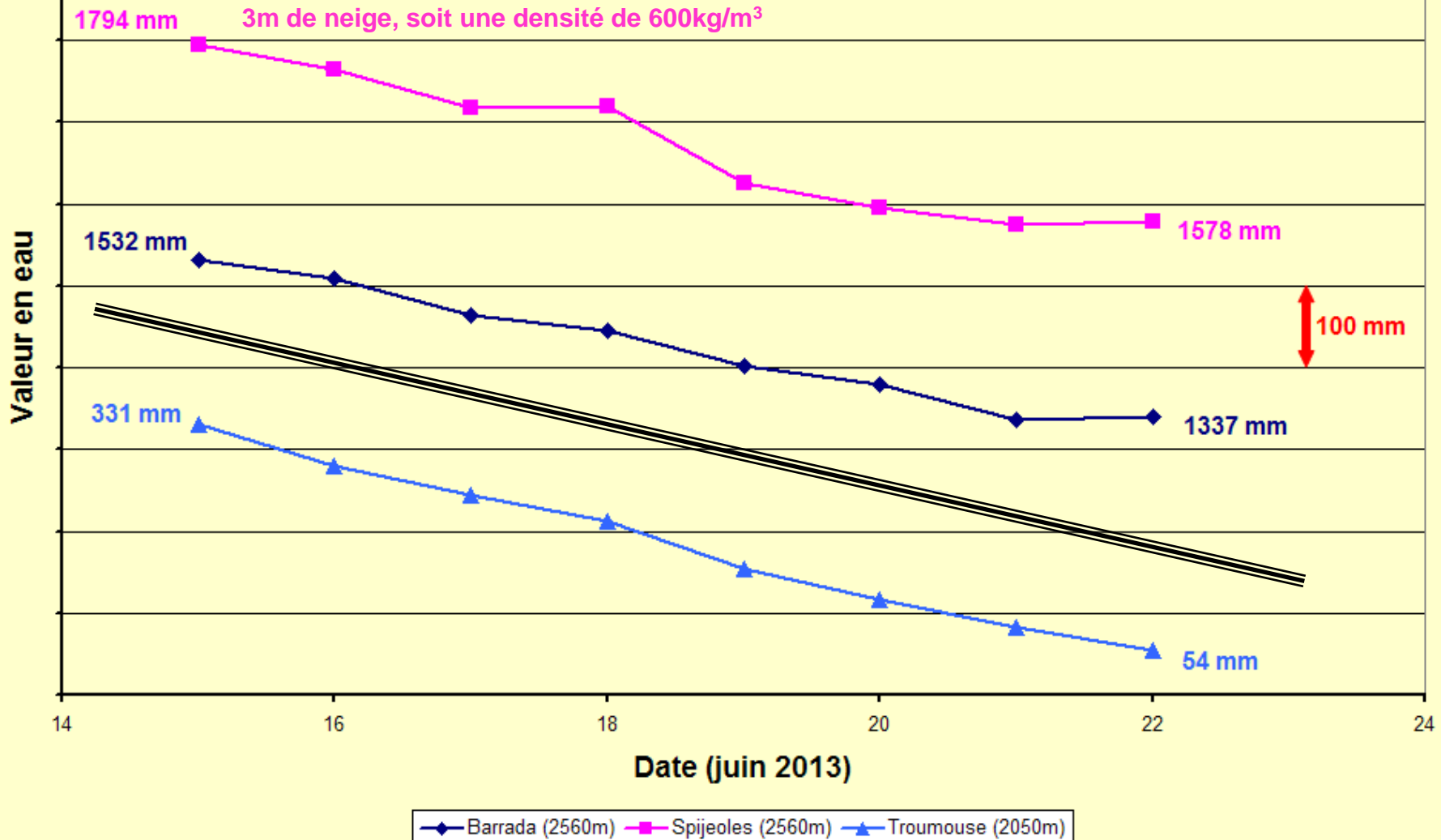
Contexte : suite à un hiver perturbé et à un printemps frais et humide, l'enneigement atteint des valeurs records sur l'amont des Gaves, des Nestes et de la Pique.

Dans la première semaine de juin, les températures oscillent enfin autour de leur normale saisonnière, culminant le 16 (33°C à Luchon)

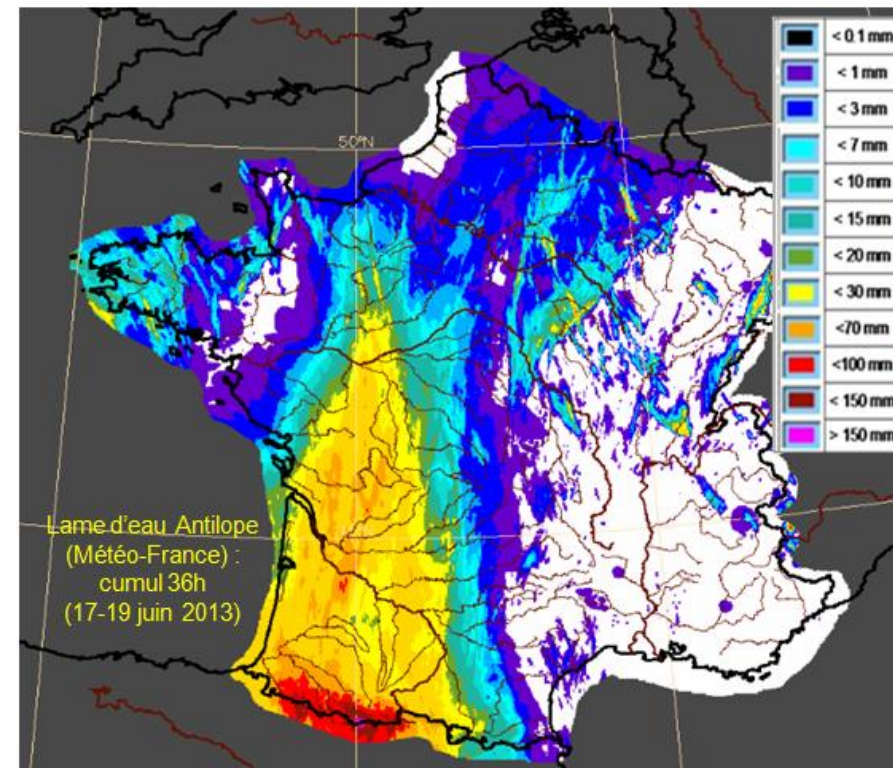
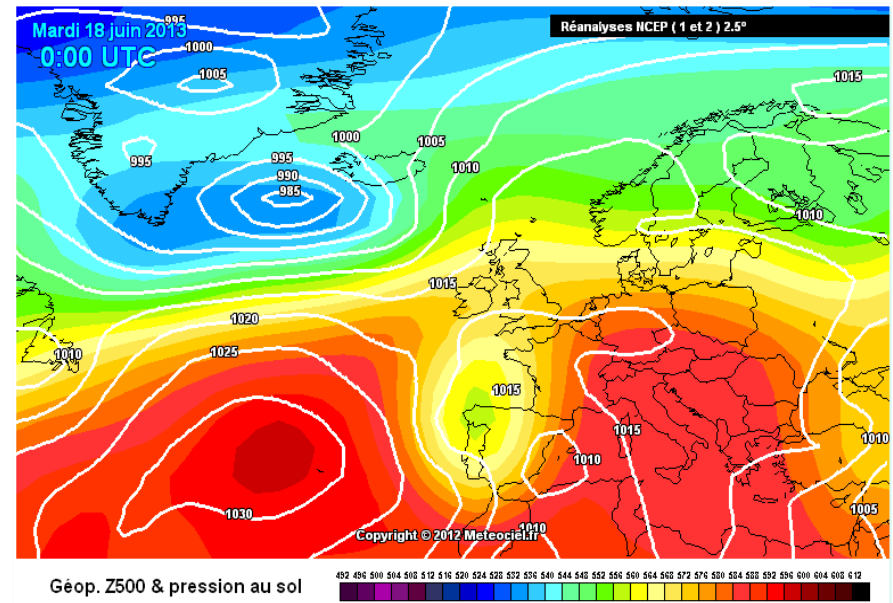
La neige s'humidifie dans un premier temps puis la lame de fonte quotidienne progresse pour atteindre de très fortes valeurs à partir du 15.

Que montrent les nivomètres ?

Une perte de valeur en eau de 30 à 40mm/jour, valeurs classiques pour un pic de fonte annuel en haute montagne

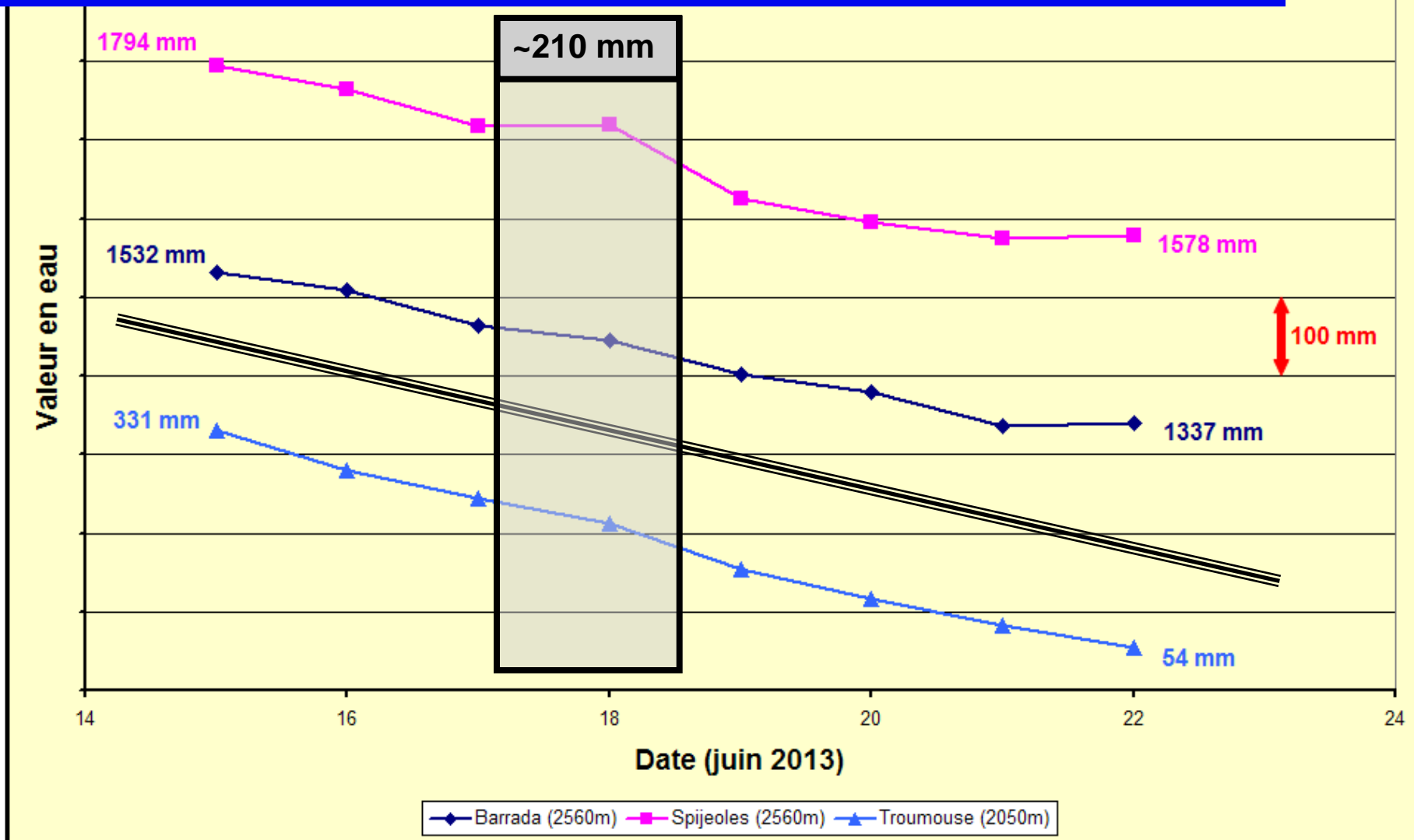


Cas n°1 : les crues de juin 2013 - L'épisode pluvieux



Que montrent les nivomètres ?

Une pente régulière, même pendant un épisode pluvieux exceptionnel
→ Pas de « lessivage » apparent



Que produit cette fonte ?

Perte de 30mm/j à 2600m (40 sur le val d'Aran)

Perte de 40mm/j à 2000m (50 sur le val d'Aran)

Rappel : 43,2mm/j valent 500l/s.km²

Quelques débits enregistrés le 17 avant la pluie

Attention, valeurs parfois imprécises (détarages depuis la crue du 19-10-2012)

Gave d'Aspe - 425 km² : ~ 200l/s.km²

Gave d'Ossau - 46 km² : ~ 500l/s.km²

Gave d'Estaubé - 18 km² : ~ 400l/s.km²

Gave de Pau - 412 km² : ~ 400l/s.km²

Garonne - 459 km² : ~ 250l/s.km²

Garonne - 2100 km² : ~ 140l/s.km²

Des rendements proches de 100% sur les hauts bassins

**Des débits spécifiques plus faibles sur les bassins intégrant
des surfaces non enneigées**

Et pendant l'épisode pluvieux ?

La contribution du couvert neigeux varie peu pendant l'épisode
Les débits spécifiques de pointe fluctuent entre 1 et 2,5 m³/s.km²
sur les bassins enneigés.

Le surplus d'écoulement dû à la pluie se situe entre 2,5mm/h et
8mm/h, pas très loin de l'intensité pluvieuse moyennée sur les
temps caractéristiques des bassins.

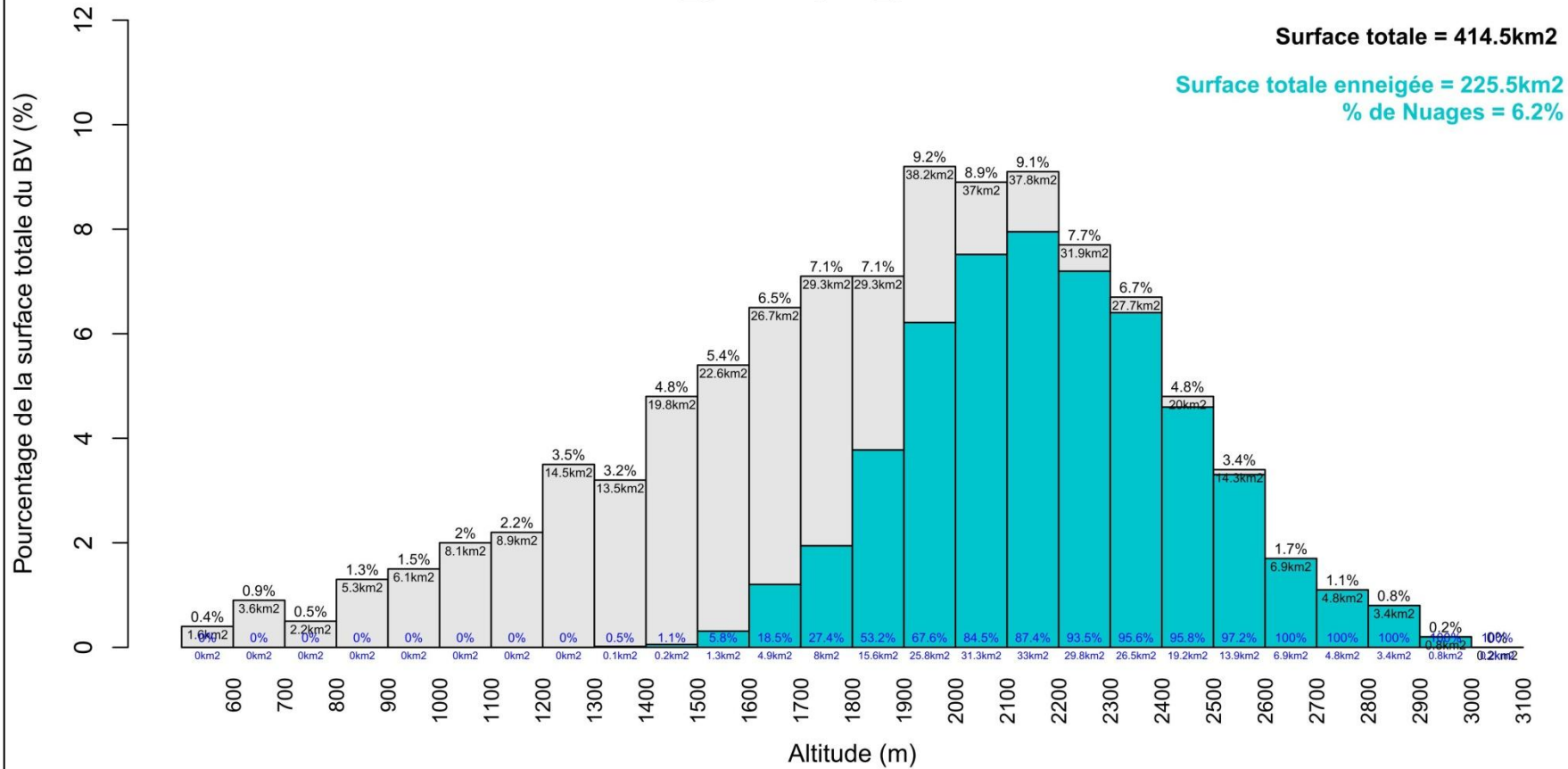


Des rendements proches de 100% sur les hauts bassins

Interprétation : la pluie sur la neige mûre



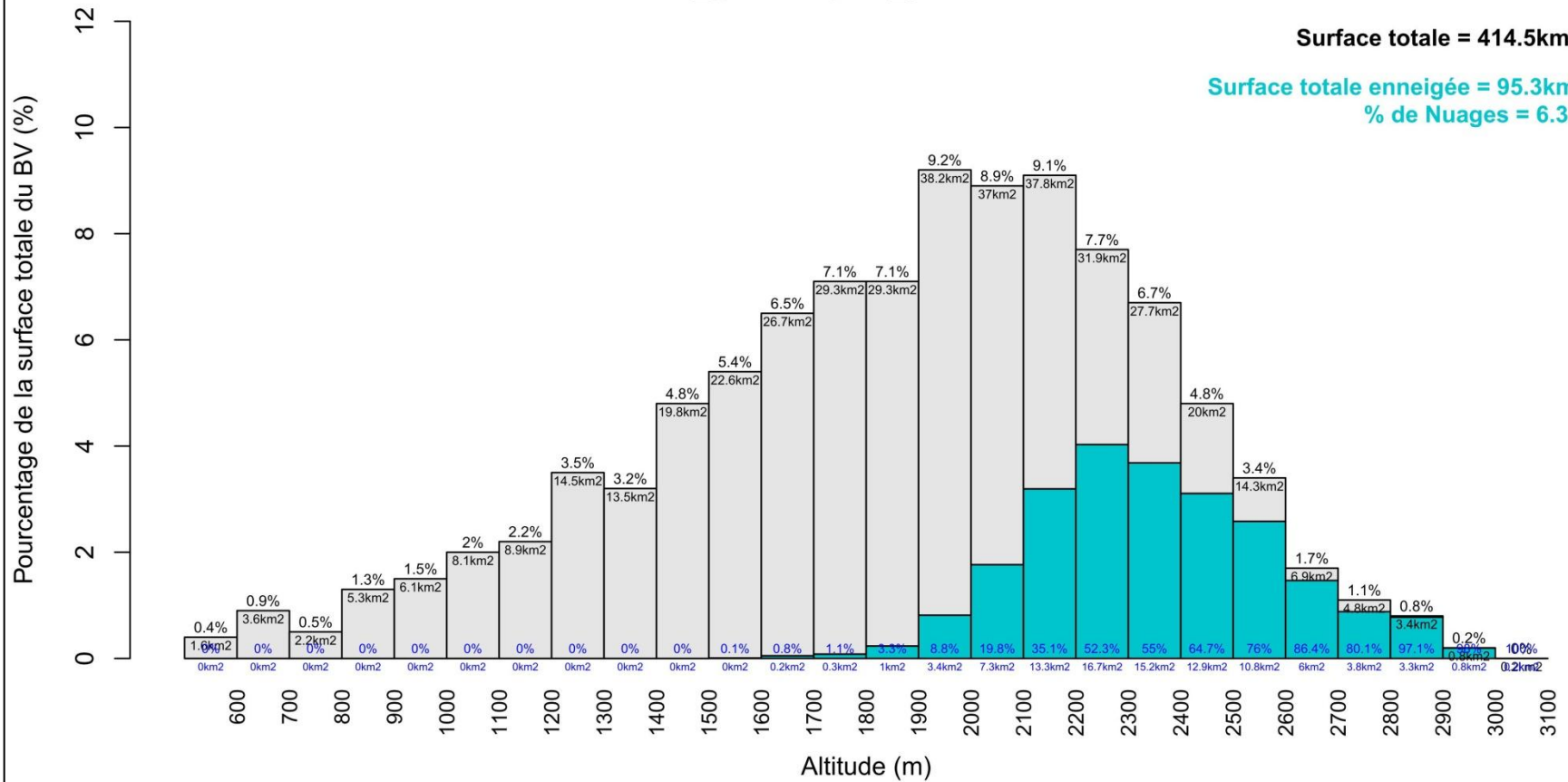
Surface enneigée par bande de 100m le 26/05/2013 bv_gavedepau_pescaдрere



Surface enneigée par bande de 100m le 16/06/2013 bv_gavedepau_pescaдрere

Surface totale = 414.5km²

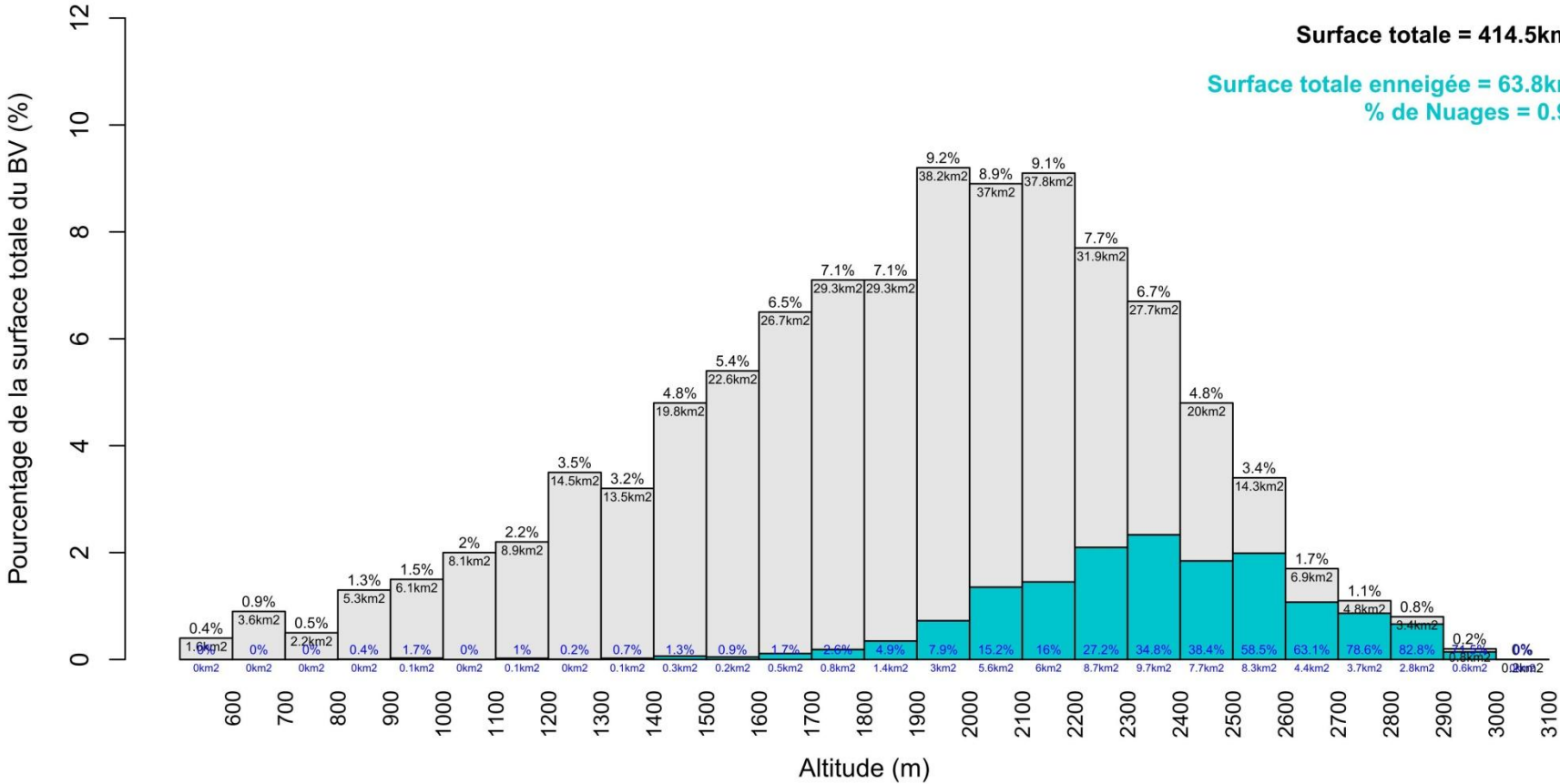
**Surface totale enneigée = 95.3km²
% de Nuages = 6.3%**



Surface enneigée par bande de 100m le 24/06/2013 bv_gavedepau_pescadrere

Surface totale = 414.5km²

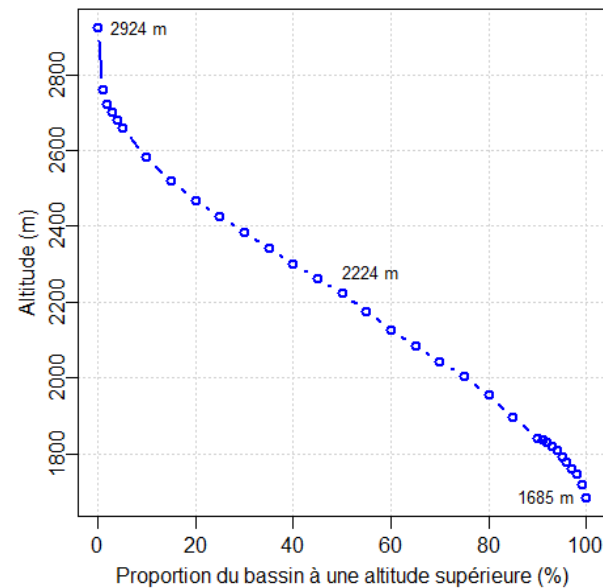
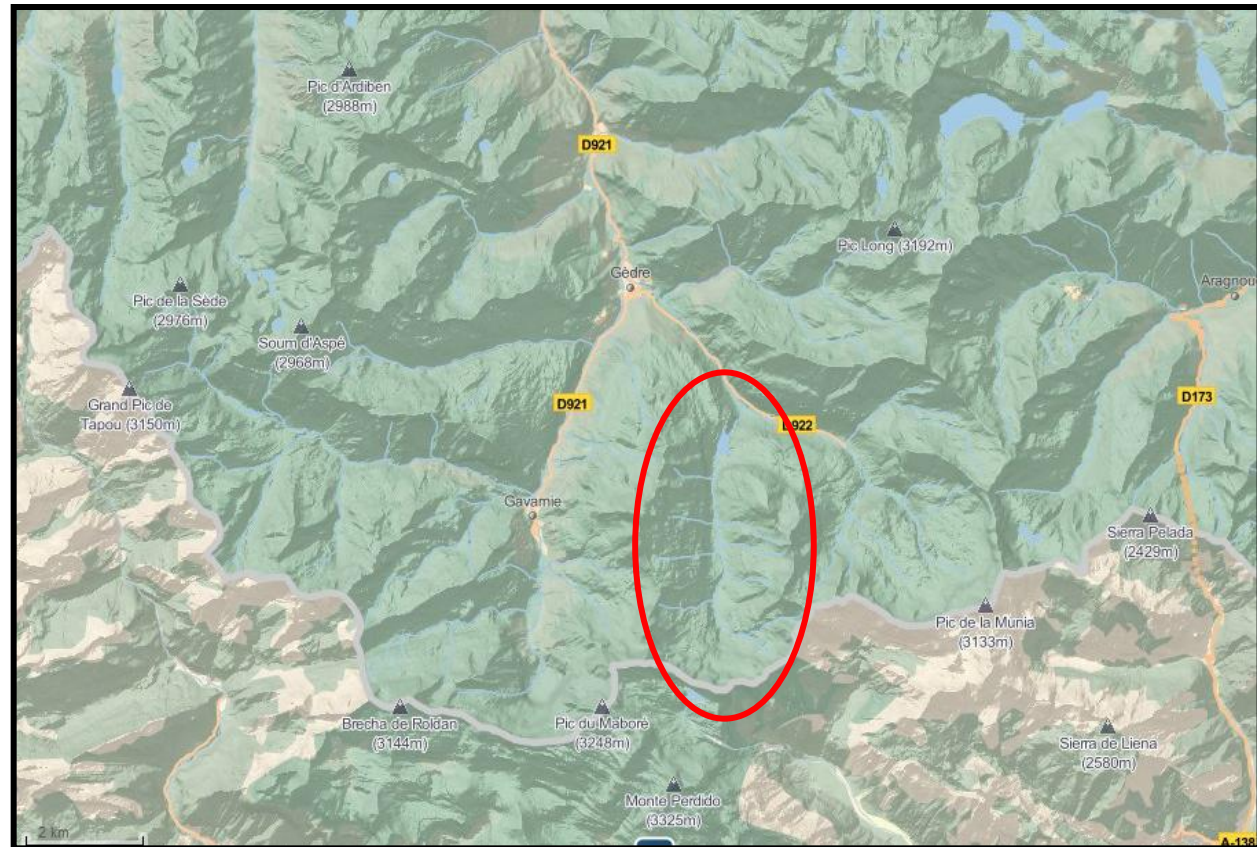
**Surface totale enneigée = 63.8km²
% de Nuages = 0.9%**



Zoom sur le bassin du Gave d'Estaubé



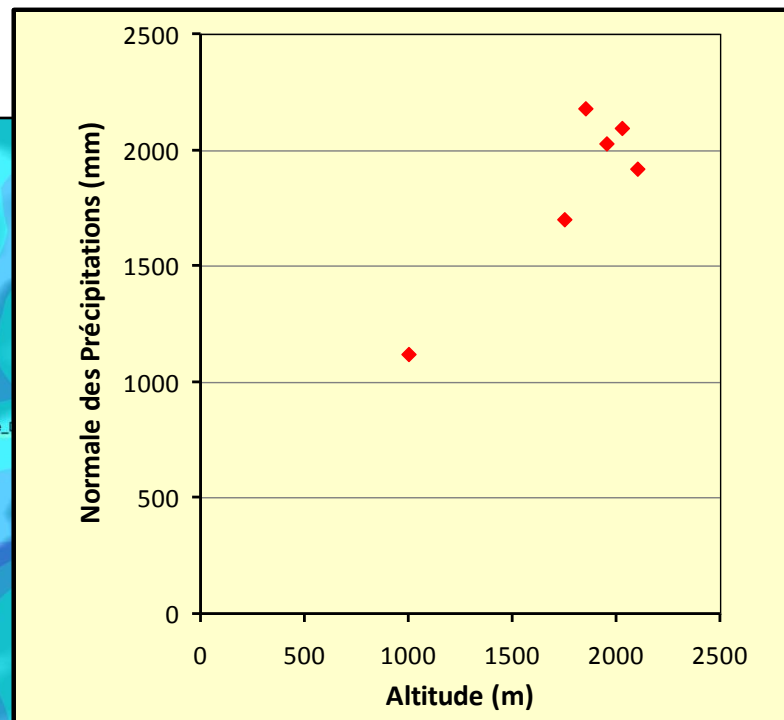
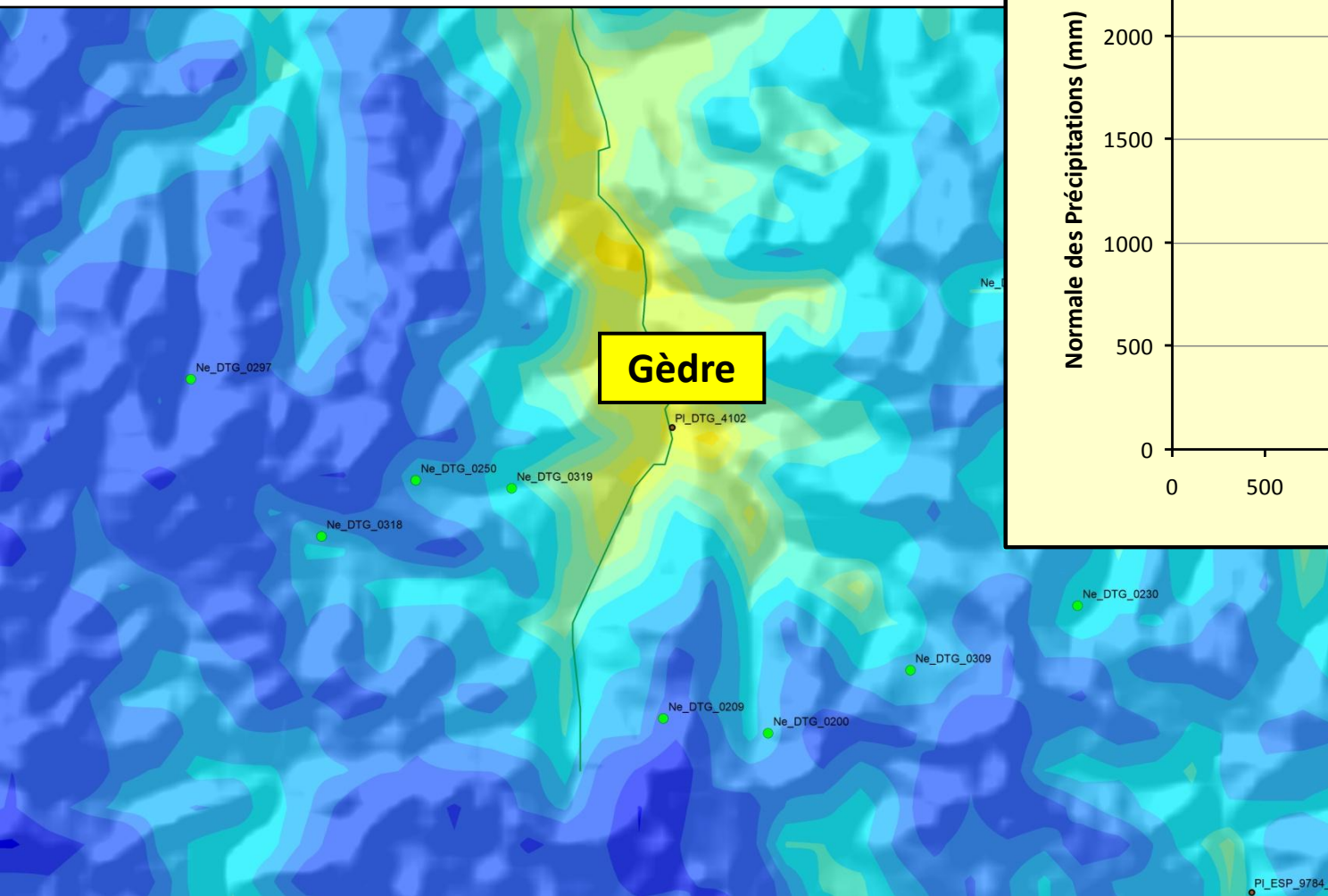
Bassin de 18,5 km² à la station en amont de la retenue de Gloriettes



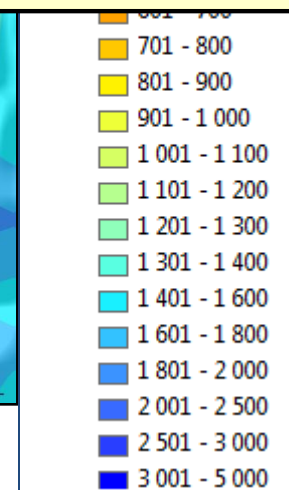
Le bassin du Gave d'Estaubé



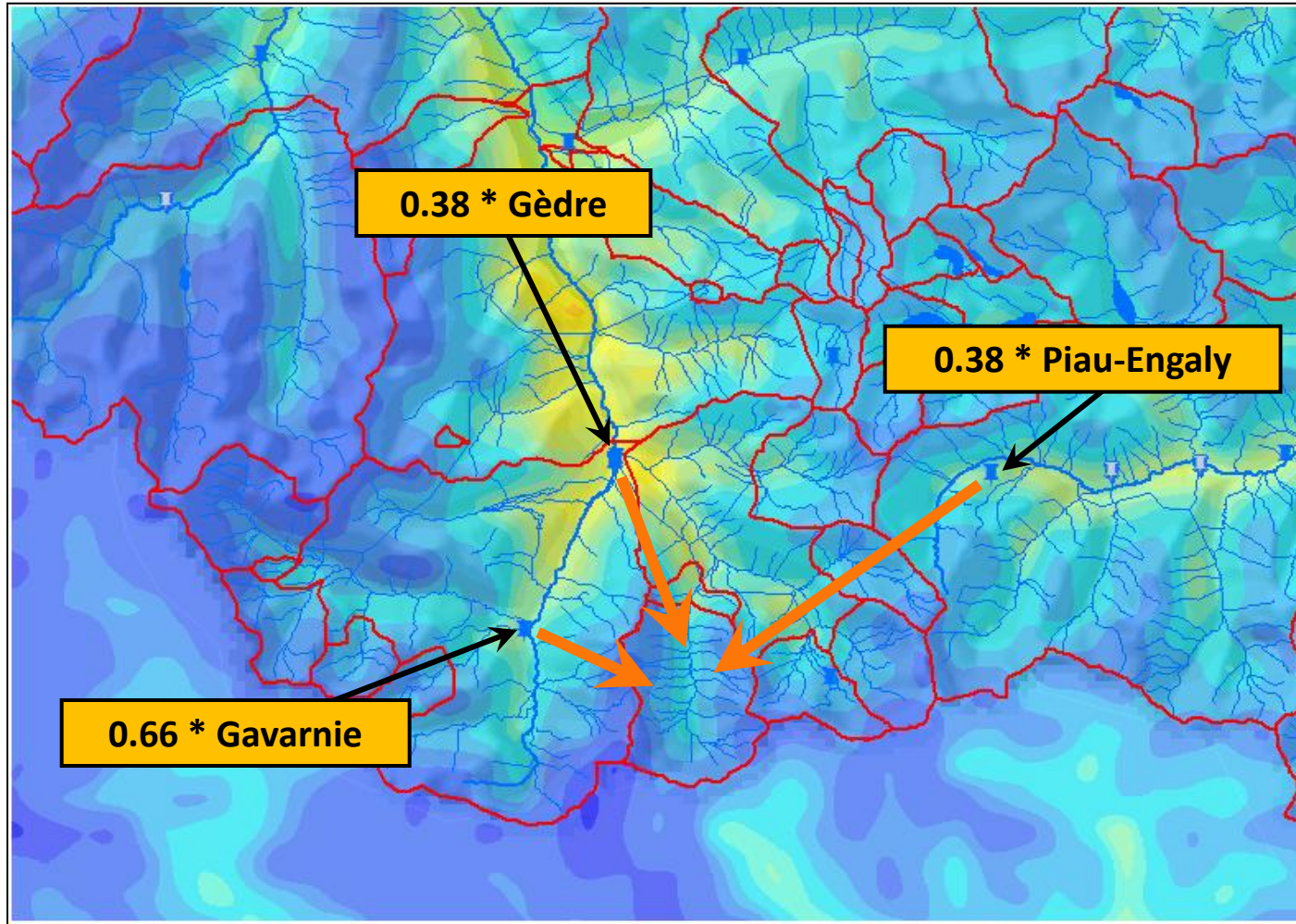
Le bassin du Gave d'Estaubé



Normales annuelles de précipitation SPAZM (Gottardi, 2009)



Constitution de la lame d'eau précipitée (à partir de données pluviométriques temps réel)



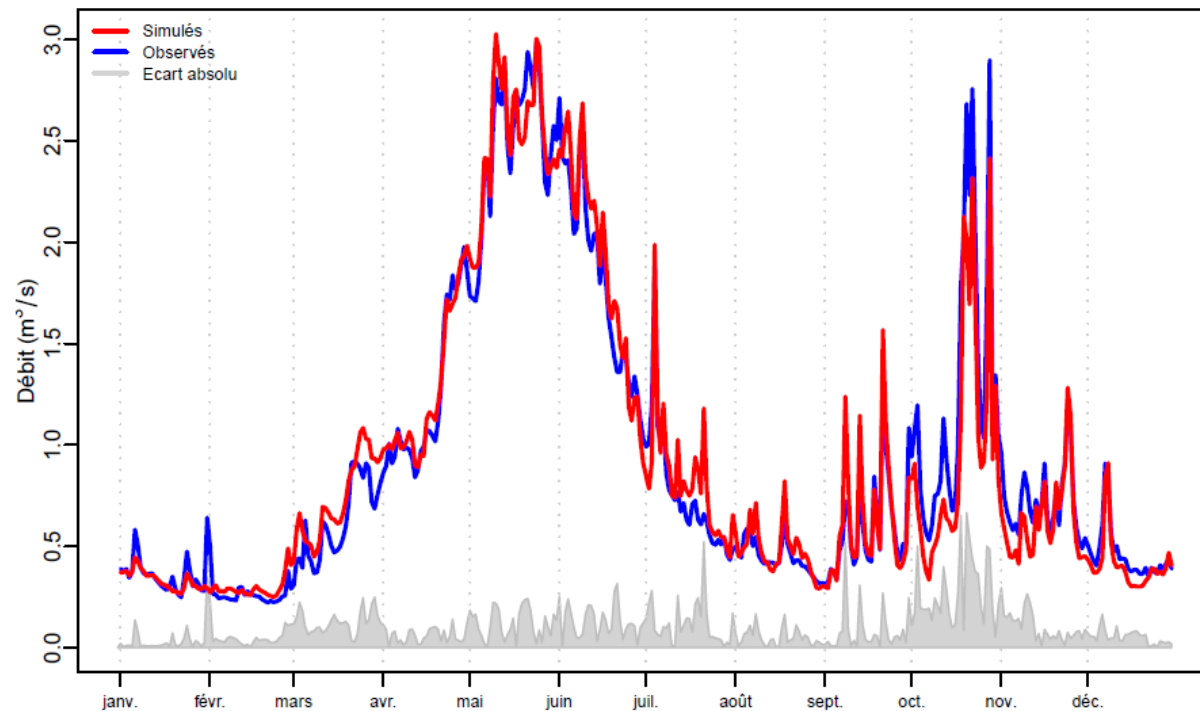
Explication de la pondération : calage sur un volume annuel supérieur à 1900mm couvrant les écoulements annuels et l'évapotranspiration estimée

Calage des paramètres du modèle sur une période de 13 ans

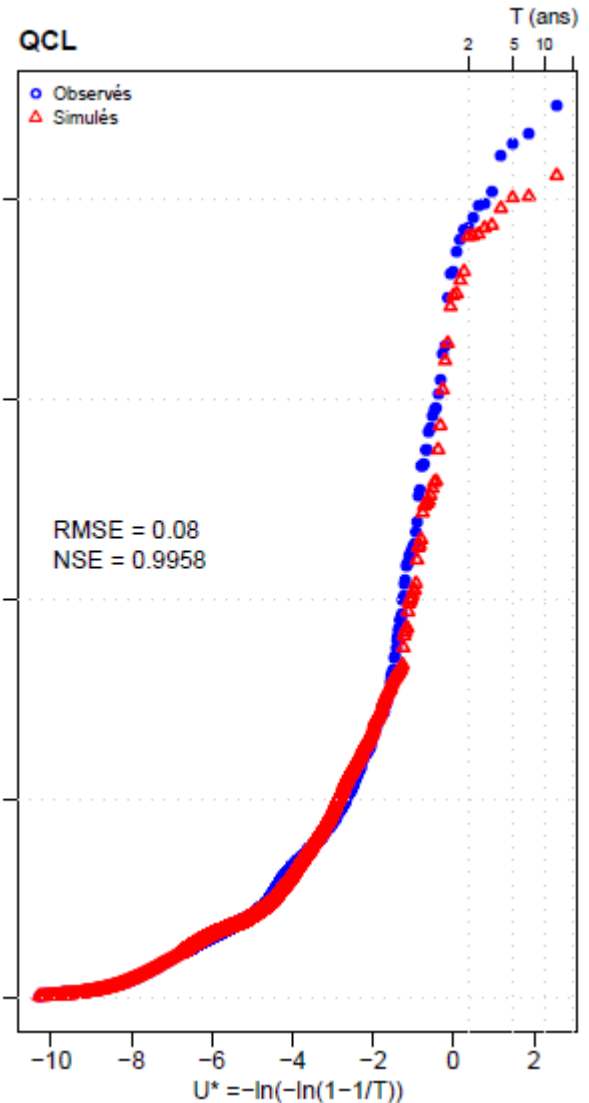
Pas de temps horaire, 1^{er} octobre 1998 - 30 septembre 2011

Vérification de la reproduction du régime saisonnier :

Régime des débits

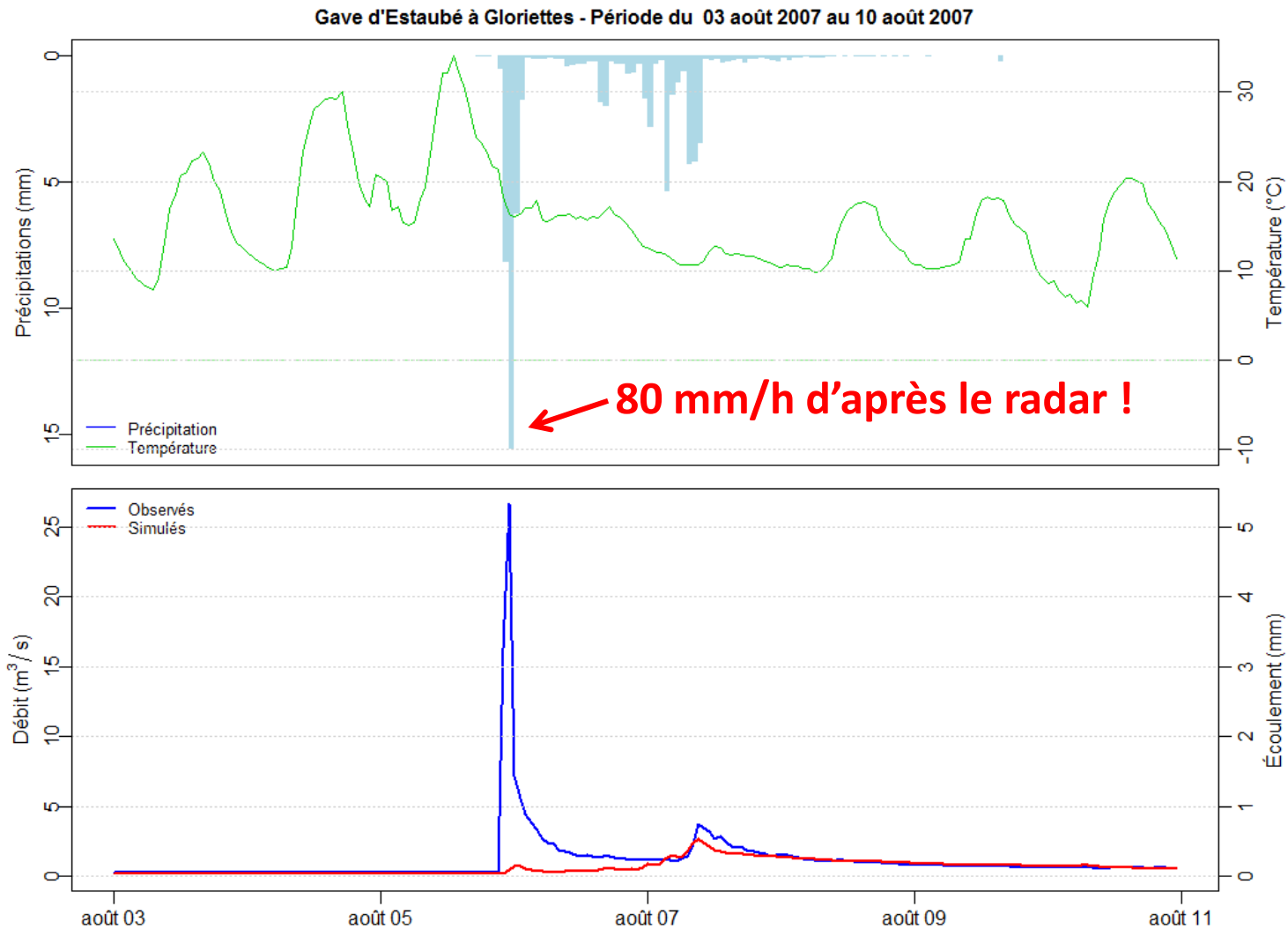


Tout est-il parfait pour autant ?



Vérification de la répartition statistique des débits :

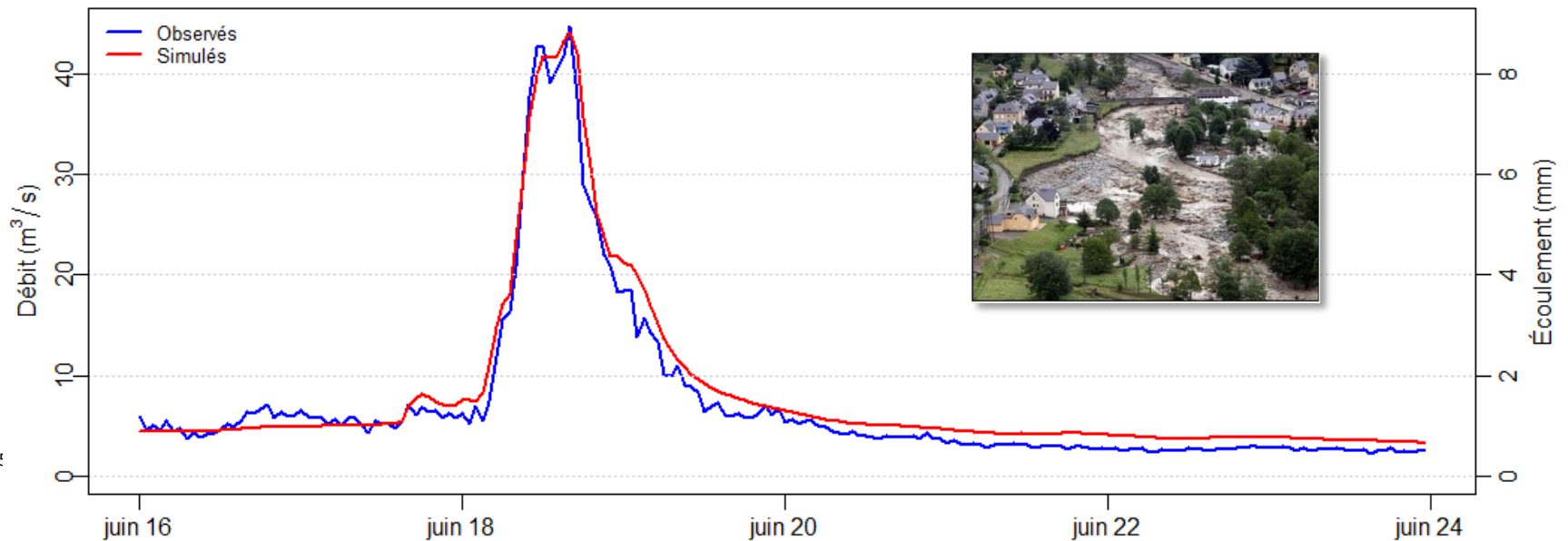
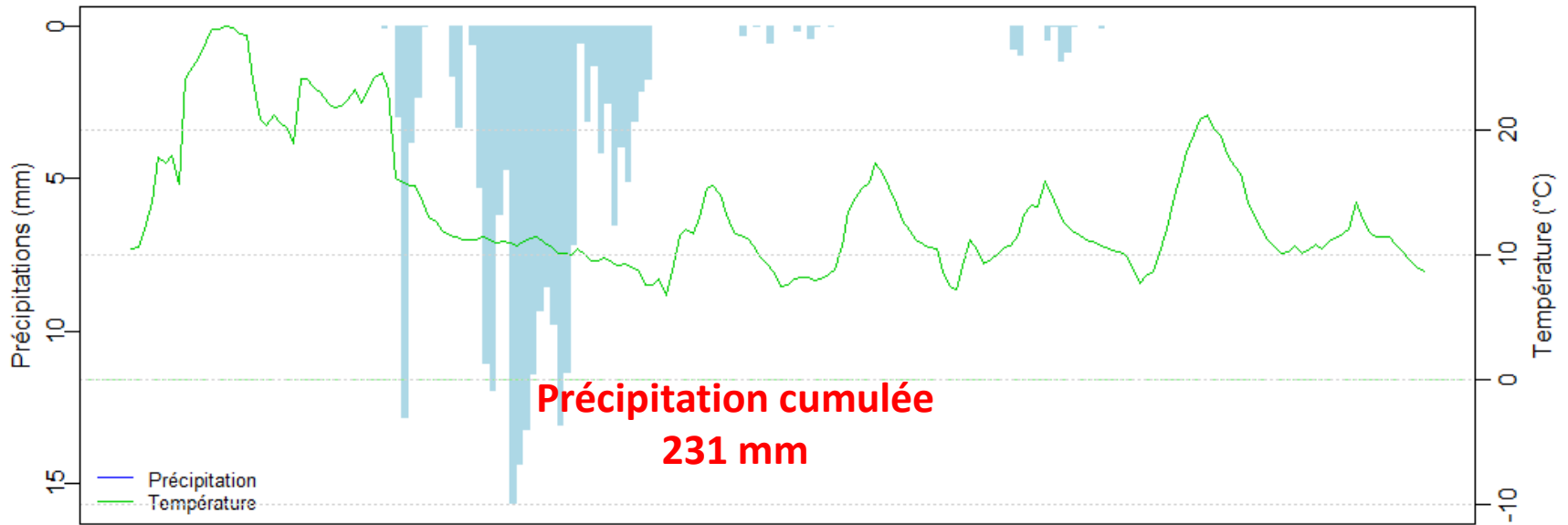
Crue du 5 août 2007 : un grand besoin du radar !



Hydrogrammes **observé** et **simulé** de la crue

Crue du 18 juin 2013

Gave d'Estaubé à Gloriettes - Période du 16 juin 2013 au 23 juin 2013



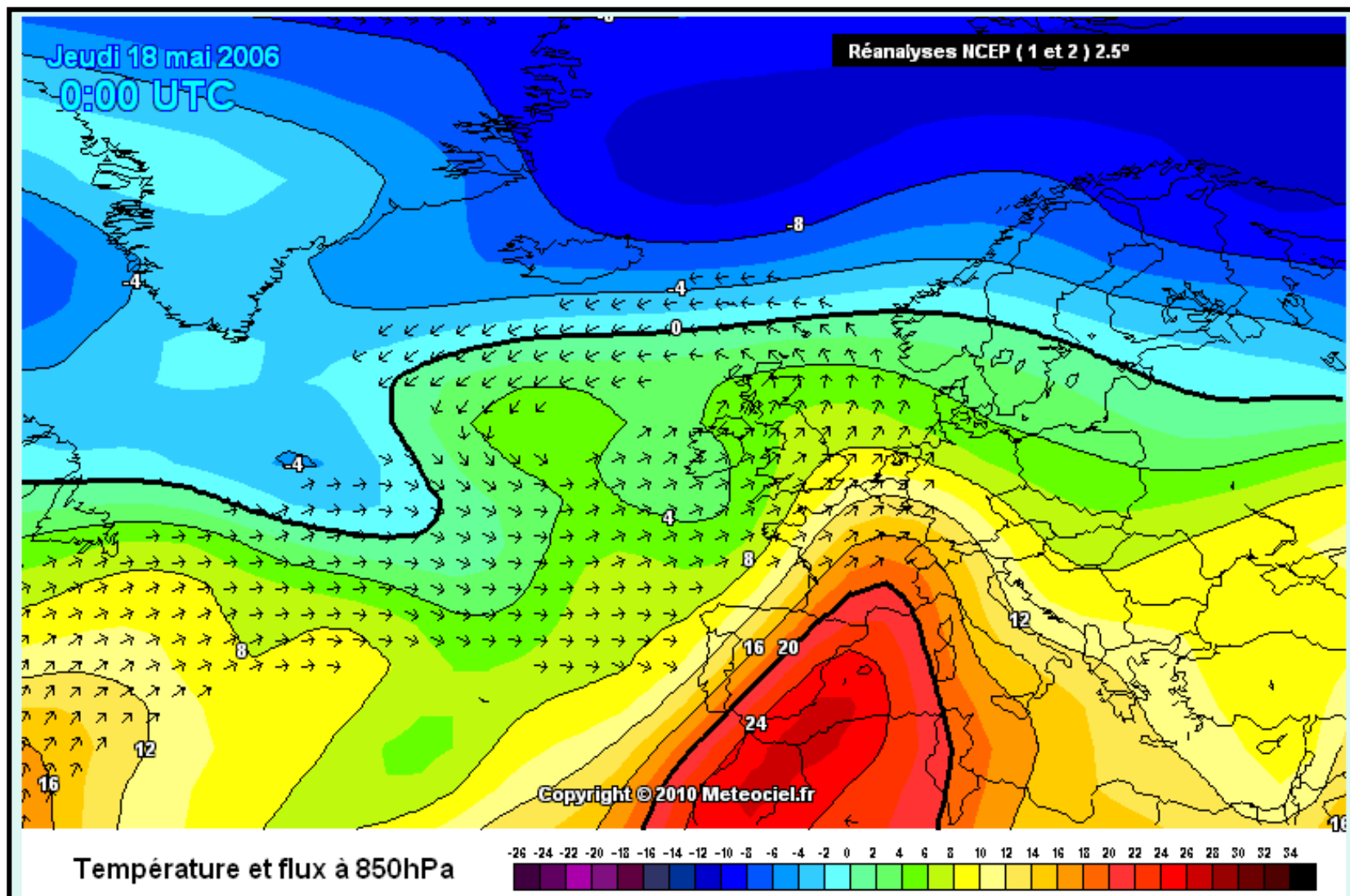
Cas n°1-bis : autre épisode de fonte en montagne

18 mai 2006 dans les Alpes

Contexte plus banal :

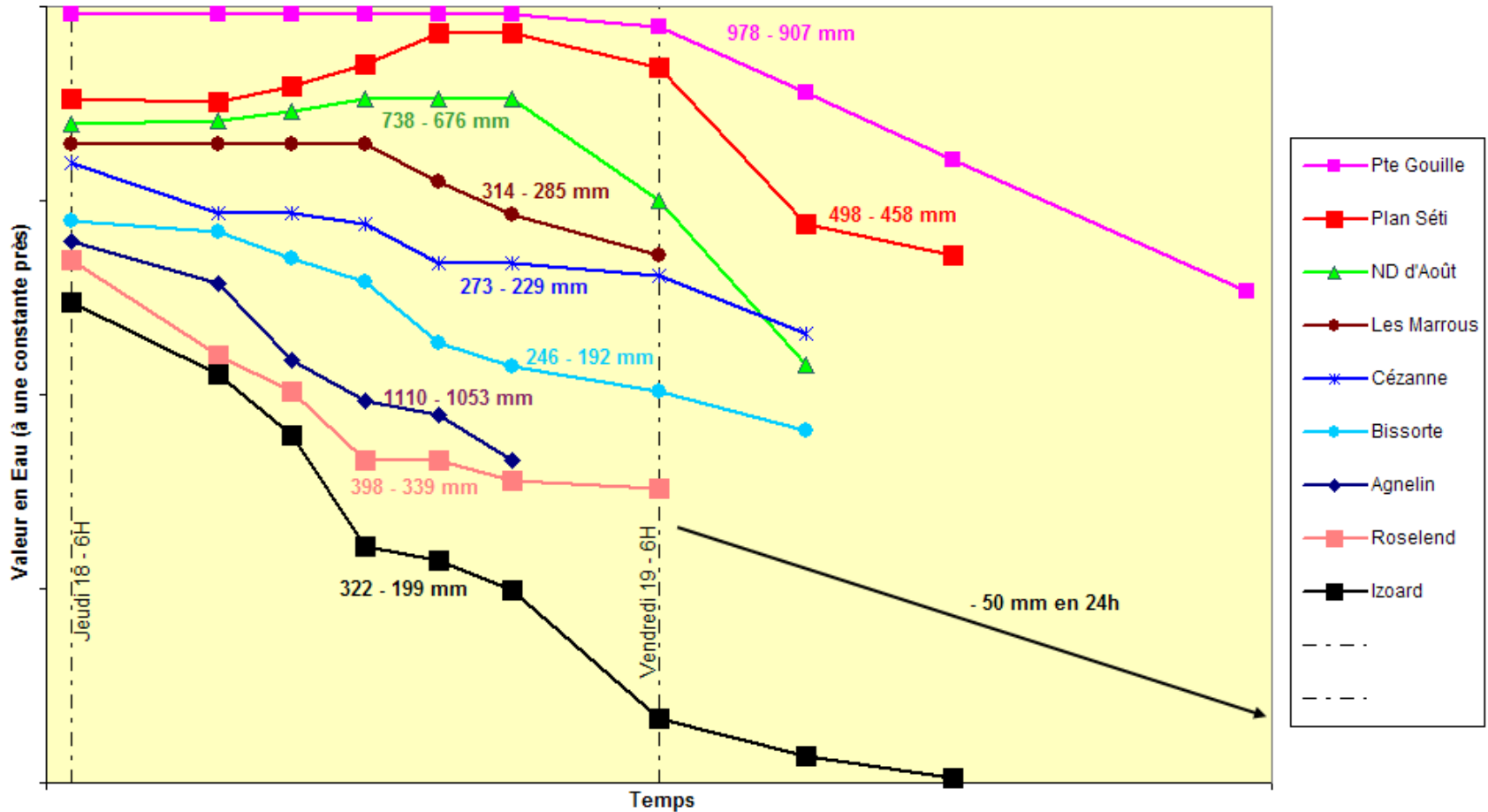
- **Enneigement moyen mais vague de chaleur de quelques jours arrivant au bon moment à la mi-mai**
- **Vaste dépression au large de l'Irlande et advection d'air chaud de sud-ouest sur l'ouest de la Méditerranée.**
 - **Quelques pluies orageuses pendant l'épisode**

Cas n°1-bis : épisode de mai 2006



Cas n°1-bis : épisode de mai 2006

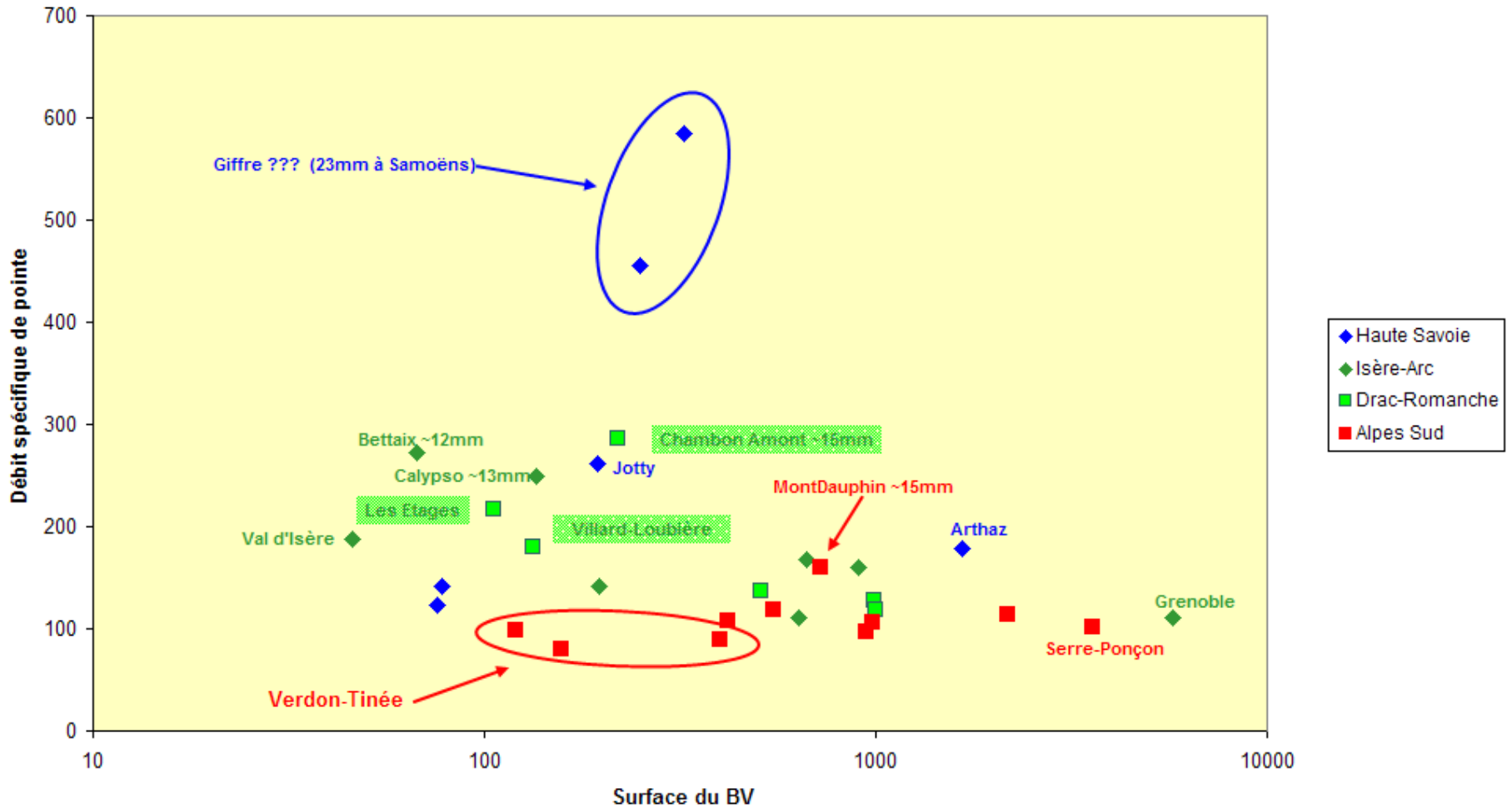
Fonte du 18 mai 2006 - Valeur en eau aux NRC



Un rythme de fonte proche de 50mm/j. Et les Qs ?

Cas n°1-bis : épisode de mai 2006

Fonte du 18 mai 2006



Cas n°1-bis : épisode de mai 2006

**Un épisode classique de fonte de montagne
(souvent un par an de cette importance) :**

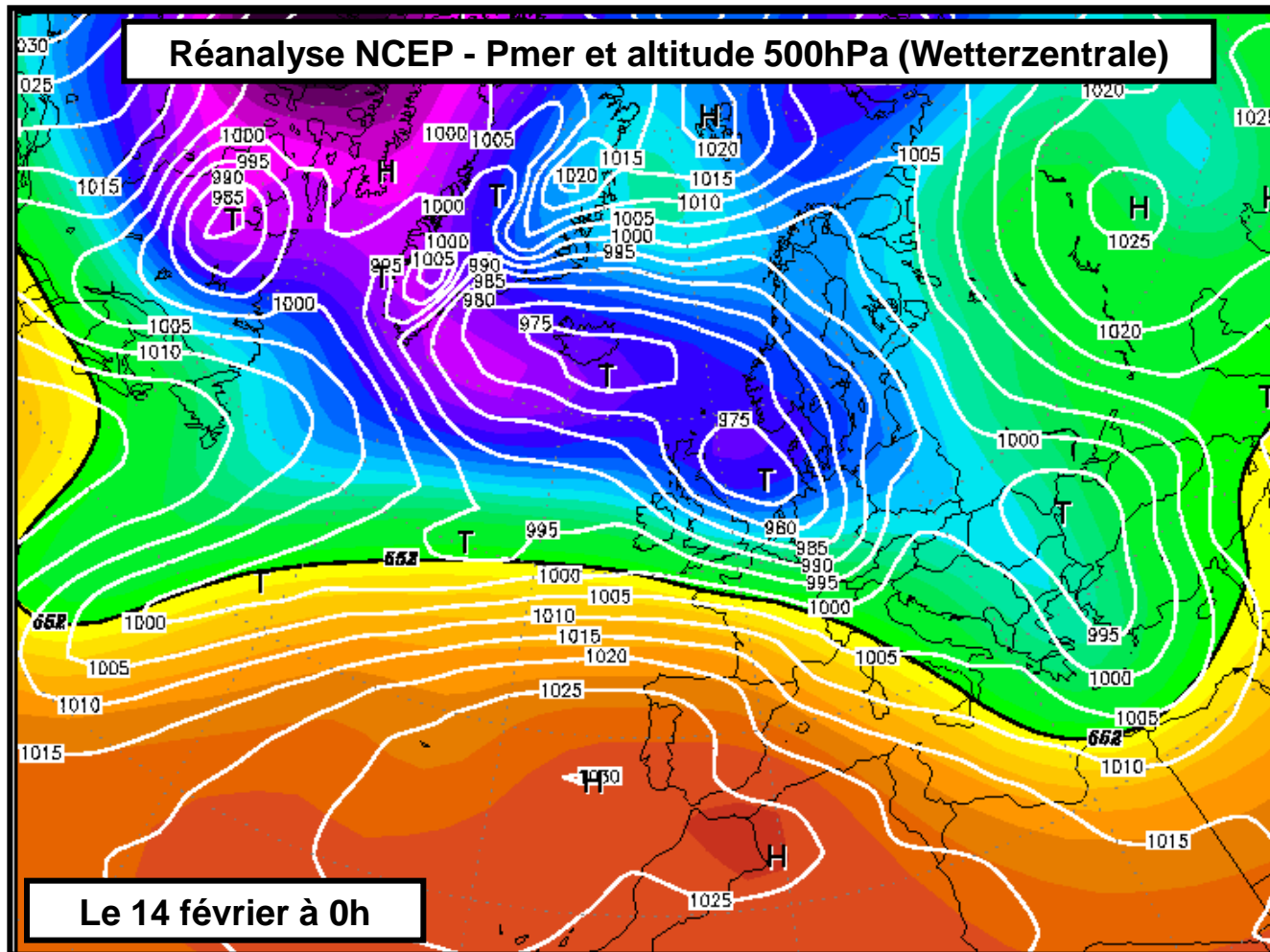
**Même avec des pertes de valeur en eau locales supérieures à 40mm/j
(500l/s.km²),**

**les débits spécifiques ont du mal (sans pluie) à franchir les 200 litres
sur les petits bassins (20 à 100 km²) et sont plutôt proches de 100
litres au-delà de 1000 km²**

La neige n'est pas mûre partout en même temps !

Cas n°2 : fonte d'hiver en moyenne montagne 13 au 15 février 1990, Jura et Savoie

Des précipitations exceptionnelles apportées par un violent flux d'ouest se radoucissant pendant 48 heures



Cas n°2 : fonte d'hiver en moyenne montagne Evolution de l'enneigement à Mignovillard

Mignovillard – 1040m, proche des sources du Doubs et de l'Ain

Les 11 et 12, un stock de neige de VE 30mm se constitue à des températures voisines de 0°C

Le 13, malgré des températures nettement positives, la VE augmente encore de 30mm (la neige absorbe une partie de la pluie) :
pas de lessivage mais de l'absorption.

Du 13 au 14, ces 60mm vont disparaître en 24 heures sous une pluie très forte (177mm/48h) et des températures proches de 6°C.

Les débits spécifiques sur le bassin de l'Ain (3500km²) atteignent 800 litres (1200 sur la Bienne), pour un rendement d'écoulement largement supérieur à 60% sur l'épisode ~130mm écoulés à Vouglans en 3 jours

Départs de crue très rapides.

Cas n°3 : crue de l'Oise à Hirson de janvier 2011
Décrit par De Bruyn et al. (SPC Oise-Aisne)

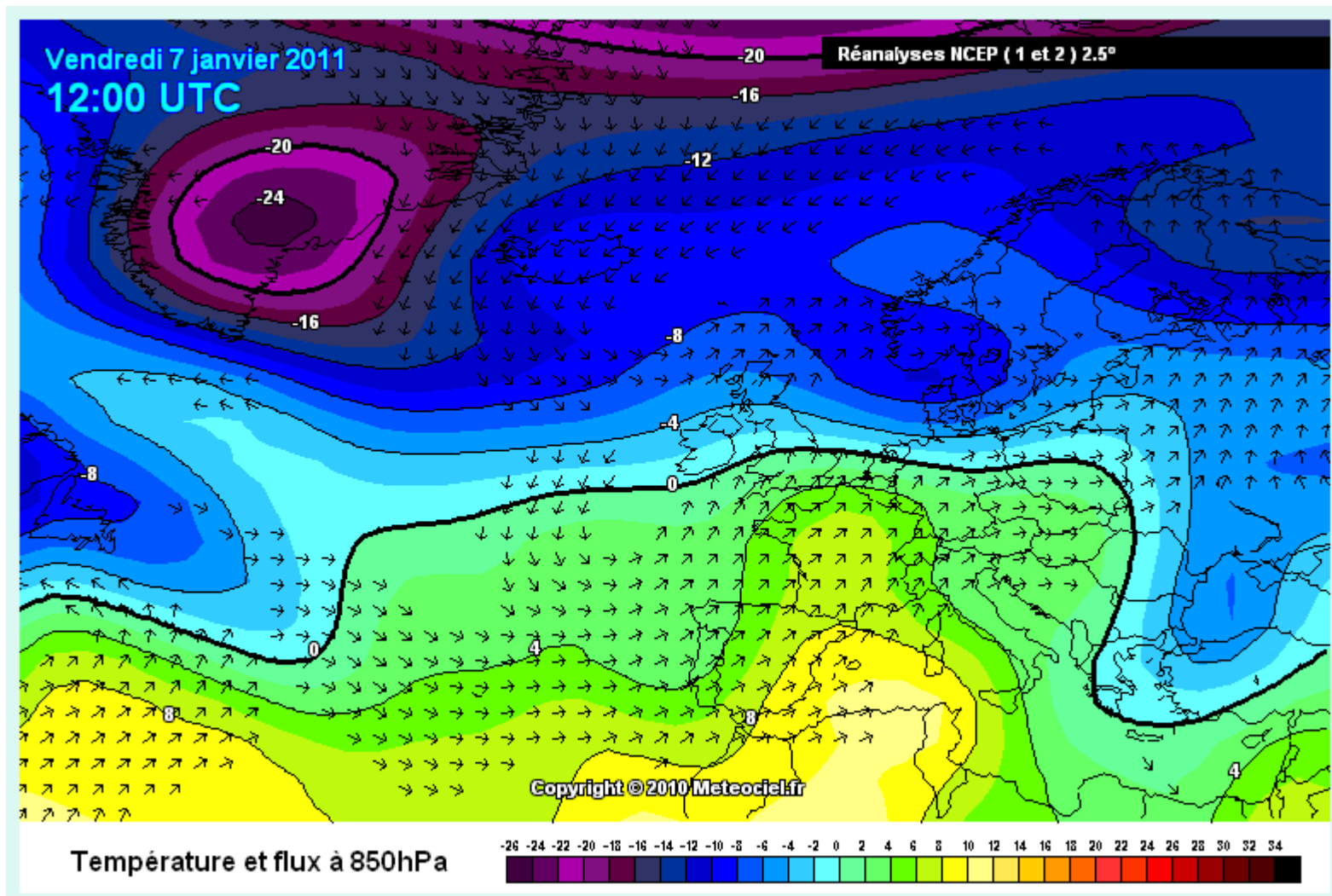
L'Oise à Hirson, bassin faiblement vallonné de 315 km², de part et d'autre de la frontière belge, 50% de forêt, 45% de prairies et cultures.

En décembre 2010, il neige en plaine dans le nord de la France et, le 6 janvier, le bassin amont de l'Oise est encore recouvert localement de 50cm de neige.

**Un réchauffement brutal survient
(de -5°C le 6/01 à 07h00 à 7,7°C le 7/01 à 21h00),
accompagné de fortes pluies (jusque 80mm en 24h)**

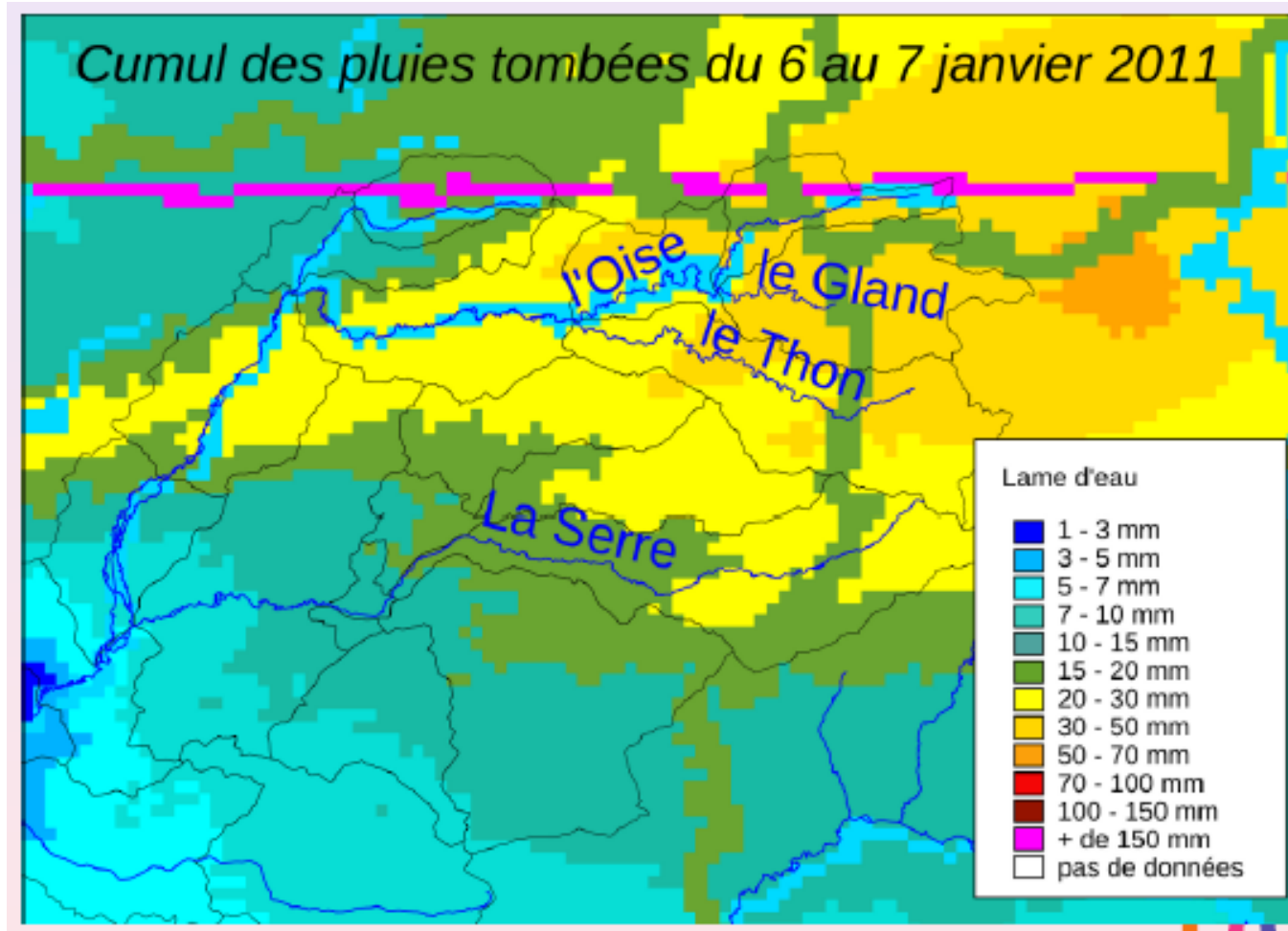
Cas n°3 : crue de l'Oise à Hirson de janvier 2011

Décrit par De Bruyn et al. (SPC Oise-Aisne)



Cas n°3 : crue de l'Oise à Hirson de janvier 2011

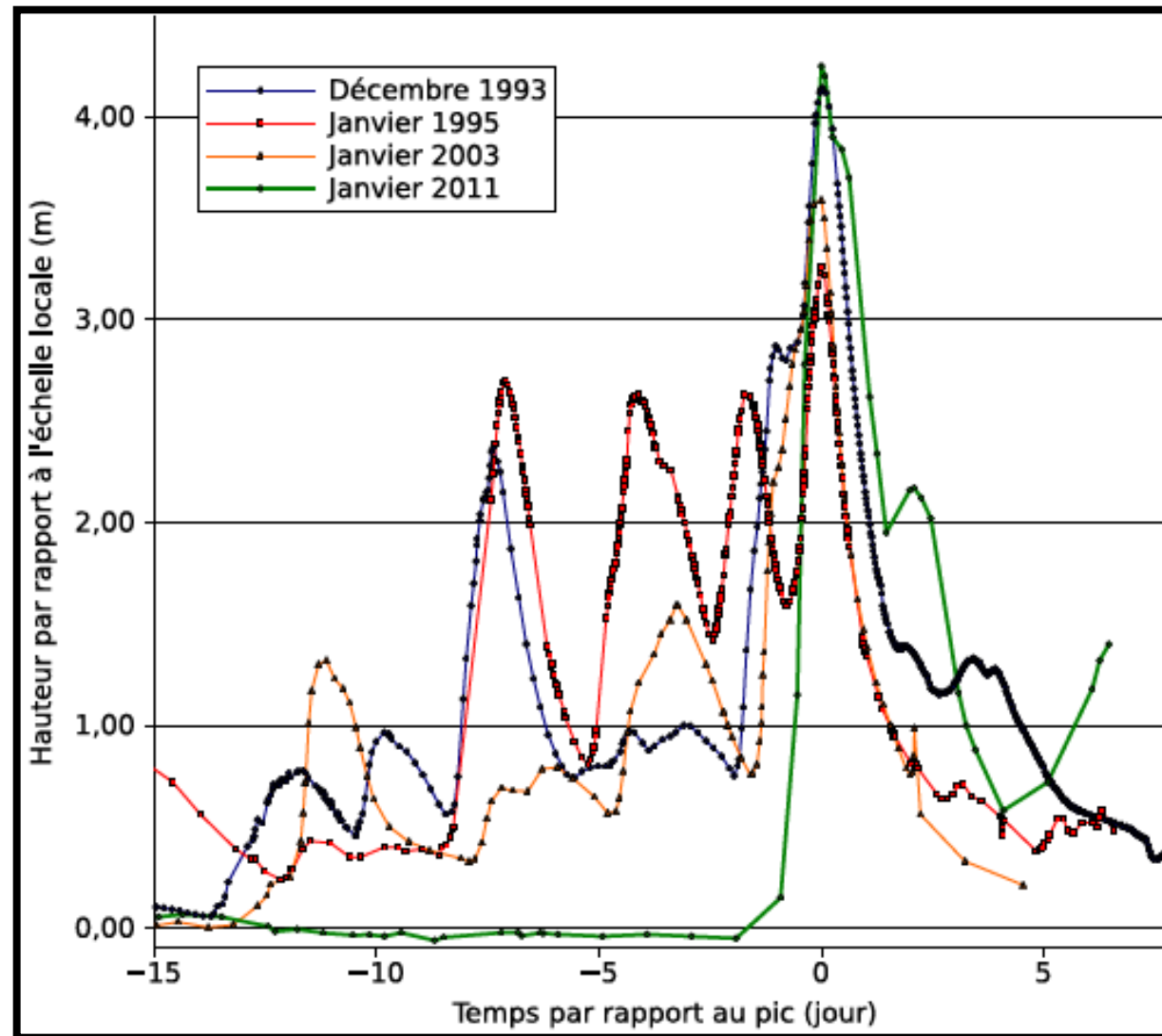
Décrit par De Bruyn et al. (SPC Oise-Aisne)



Cas n°3 : crue de l'Oise à Hirson de janvier 2011

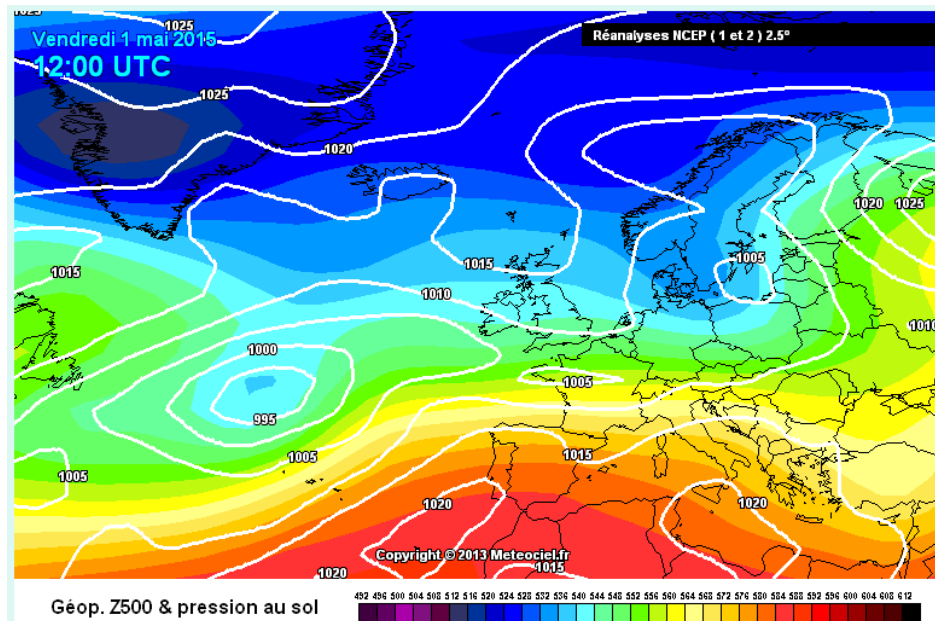
Décrit par De Bruyn et al. (SPC Oise-Aisne)

Une crue très brutale :

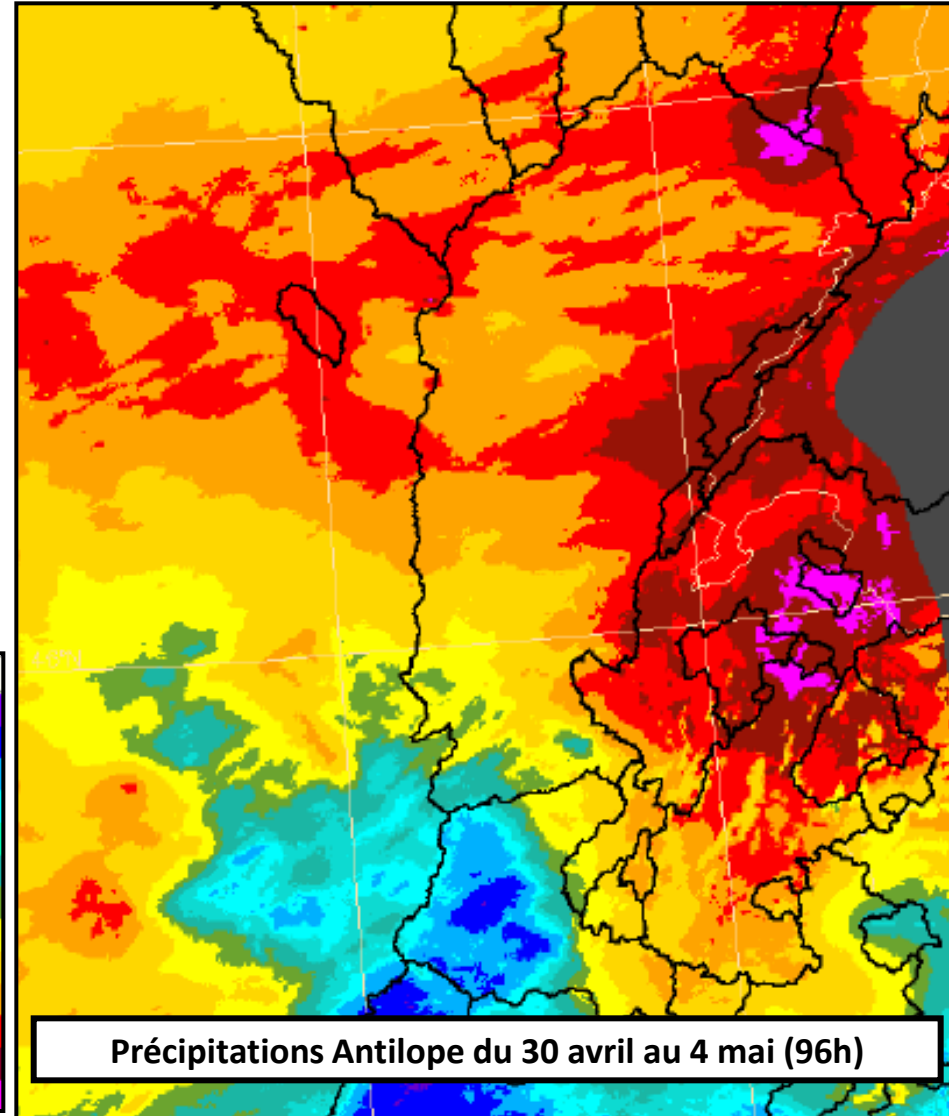


Cas n°4 : crues des Alpes du Nord le 1^{er} mai 2015

Décrit par M.Duclos (EDF-DTG-CHA)

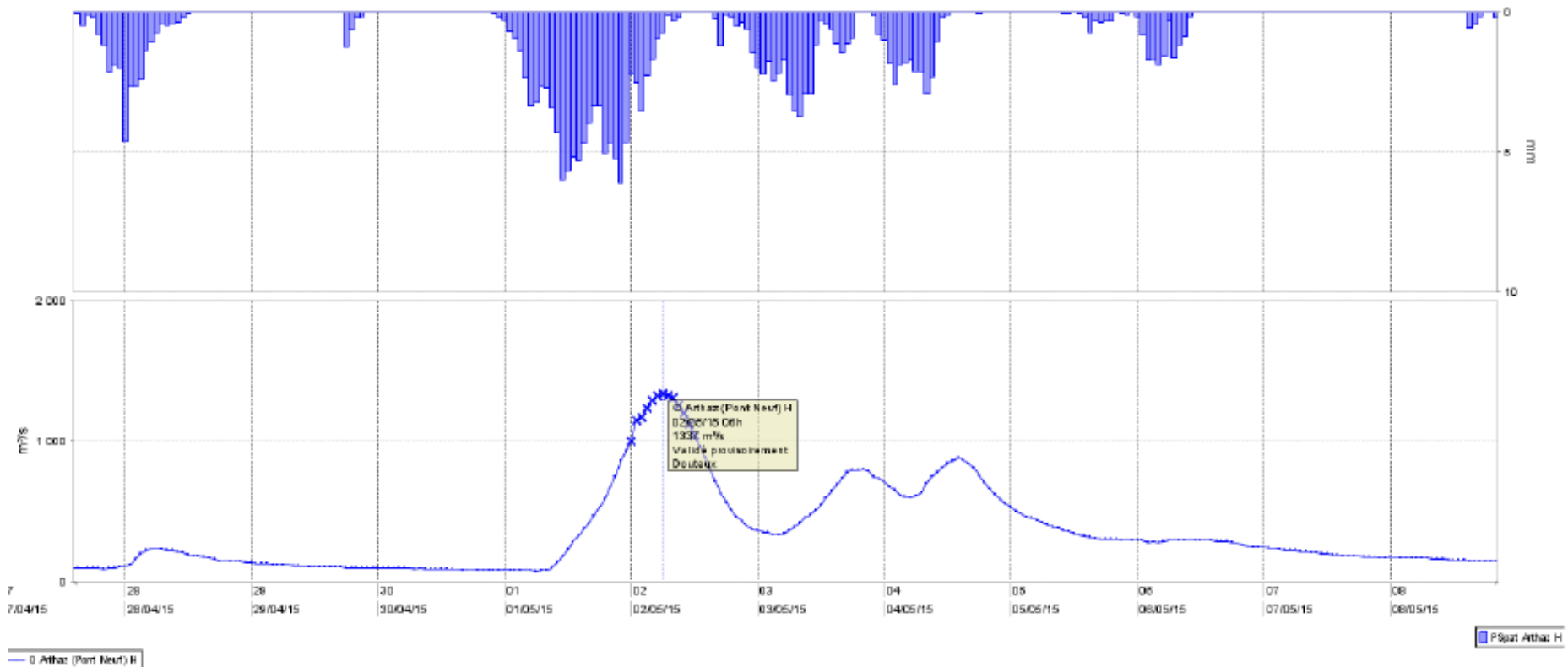


Précipitations (mm)	
BLUE_PURPLE	> 0.10
BLUE	> 1.00
GREENISH_BLUE	> 3.00
CYAN	> 5.00
BLUISH_GREEN	> 7.00
TURQUOISE	> 10.00
AVOCADO	> 15.00
YELLOW	> 20.00
ORANGE_YELLOW	> 30.00
ORANGE	> 50.00
RED	> 70.00
BURGUNDY	> 100.00
REDDISH_PURPLE	> 150.00



Cas n°4 : crues des Alpes du Nord le 1^{er} mai 2015

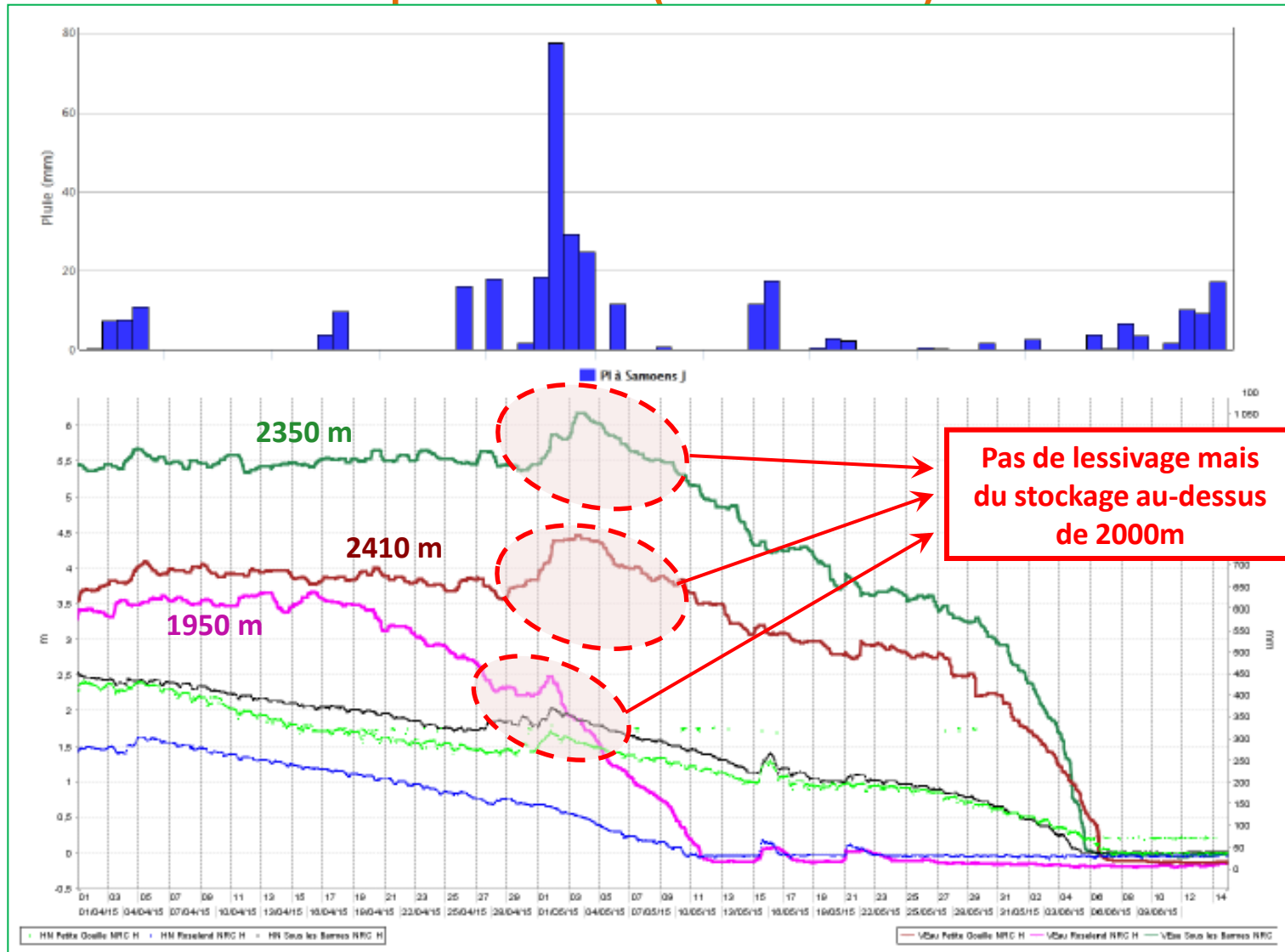
Décrit par M.Duclos (EDF-DTG-CHA)



Débit de l'Arve à Arthaz (1664km²) et précipitation spatiale

Cas n°4 : crues des Alpes du Nord le 1^{er} mai 2015

Décrit par M.Duclos (EDF-DTG-CHA)



Précipitations journalières à Samoëns et évolution de l'enneigement

Contribution du couvert neigeux - Synthèse

Les pertes de valeur en eau du couvert neigeux à un pas de temps journalier ou infra-journalier sont modérées par rapport aux pluies extrêmes. La fonte est un phénomène plus régulier dans le temps et l'espace que la pluie.

Le « lessivage » du manteau neigeux semble être – physiquement et empiriquement – une expression fallacieuse

La menace du couvert neigeux est plutôt hydrologique que météorologique :

Une fois saturée – par la fonte ou la pluie – la neige permet à tout apport supplémentaire de court-circuiter le cheminement hydrologique classique du BV, conférant à un bassin rural faiblement vallonné le ruissellement de surface, le rendement et la dynamique d'un BV urbain.



Tout commence par...

une précipitation !

- La neige tombe de la même manière que la pluie, mais par températures froides.
 - Limite entre 0 et 2°C (*sauf verglas*)
- Attention de la neige peut tomber jusqu'à 1000m au-dessous de l'isotherme 0°C, notamment en cas d'intensité soutenue (3mm/h ou plus) l'air des basses couches étant rafraîchi par la chaleur latente (négative) de fonte, **neige humide** dans ce cas.

Irrégularité de l'accumulation

Plus la neige est légère, plus le vent est fort, plus le relief est tourmenté, plus les accumulations fluctuent dans l'espace (dépôt et parfois transport ultérieur par le vent)

Maîtrise du phénomène parfois difficile

Un peu de physique

La neige : un mélange de glace, d'air et d'eau

- Une neige fraîche récemment tombée par température négative est composée de **beaucoup d'air** et **un peu de glace**
 - On prend souvent comme point de repère une densité de **10%** (10mm de précipitation font 10cm de neige) mais la densité peut être beaucoup plus basse (environ **2%** pour de la neige tombant sans vent par -15°C) ou aussi plus haute (**20%** avec des températures faiblement négatives et beaucoup de vent, voire plus pour de la neige tombant par température positive et contenant de l'eau)
 - La neige s'alourdit plus ou moins au sol par des transformations mécaniques et thermiques qui la compactent et **la chargent en eau** (la structure de glace permet à la neige de retenir de l'eau liquide, jusque **12%** sur un support perméable)

Un peu de physique

La fonte de la neige : les apports d'énergie

- Rayonnement visible
- Rayonnement infrarouge
- Echange de chaleur sensible par flux turbulent
 - Echange de chaleur latente
 - Précipitations
 - Flux terrestre

Le rayonnement visible (solaire)

La couleur de la neige témoigne de son albedo (blancheur), part de l'énergie solaire réfléchi. Celui-ci atteint **90%** pour de la neige fraîche et froide et diminue jusqu'à **40%** pour de la neige parvenue à maturité (augmentation de la taille des grains, impuretés minérales ou végétales, suies et cendres).

La part absorbée est donc multipliée par 6 de l'hiver au printemps, dans le même temps que le rayonnement solaire incident est lui-même multiplié par près de 5 (au 45^{ème}).

L'énergie apportée par le rayonnement solaire à la neige est **négligeable** au cœur de l'hiver pour devenir **prépondérante** en fin de printemps.

Le rayonnement infrarouge

Si la neige est blanche en lumière visible, elle se comporte comme un **corps noir** vis-à-vis du rayonnement infrarouge (émission et absorption parfaites)

Ce rayonnement dépendant fortement de la température, la neige se refroidit par ciel clair et sec, et se réchauffe sous une atmosphère chaude et humide (vapeur d'eau ou, mieux, nuages bas et chauds)

Les échanges de chaleur sensible

La neige est souvent réchauffée par l'air ambiant qui est généralement plus chaud.

Mais ce réchauffement est limité du fait de la mauvaise conduction de l'air et d'échanges turbulents amoindris par la surface assez lisse du couvert neigeux.

Il augmente fortement avec la vitesse du vent.

Les échanges de chaleur latente

Ils dépendent du déséquilibre des pressions de vapeur d'eau entre l'air ambiant et la surface de la neige.

Par air sec, la neige se sublime ou l'eau à sa surface s'évapore, ce qui cause un refroidissement.

Par air humide, une condensation liquide ou solide tend à apporter de la chaleur à la neige présente.

Là encore, les échanges augmentent avec la vitesse du vent.

Le réchauffement par la base

Le flux thermique du sol est régulier mais faible (quelques W/m^2)

Une fois isolé par la neige, le sol restitue les calories stockées en saison chaude, ainsi qu'un flux géothermique généralement négligeable.

Ce faible flux de sol suffit néanmoins à faire remonter la base du couvert neigeux à une température proche de $0^{\circ}C$ et à y produire un petit rythme de fonte (bien plus faible que celui des phénomènes brutaux affectant la surface du couvert)

Le réchauffement par les précipitations

Il existe mais reste le plus souvent négligeable face à l'énergie nécessaire par la fonte :

La fonte d'un gramme de glace demande 334 J, soit 80 cal.

16mm de pluie à 5°C ne peuvent faire fondre au maximum que 1mm de valeur en eau de glace (à 0°C)...

Les 16mm sont bien plus intéressants pour l'hydrologue que l'hypothétique millimètre de bonus !

La transformation mécanique de la neige

La transformation thermique n'intervient pas seule.

L'évolution des cristaux en grains de glace grossiers, leur compactage, modifient la densité de la neige, sa capacité à retenir l'eau, son albedo, les échanges de chaleur latente par diversité des rayons de courbure, sa conductivité...

Les deux types de transformation sont fortement couplés.

Résumé : une physique bien complexe

La transformation de la neige est un phénomène très complexe.

La production d'eau par fonte de glace dépend d'apports de chaleur faisant intervenir la température de l'air externe, son humidité, la vitesse du vent, la nébulosité, la quantité et la température des précipitations, la texture de la neige au sol.

L'écoulement dépend de l'eau déjà contenue dans la neige et de sa capacité intrinsèque à en stocker, elle-même fonction du profil vertical de ses caractéristiques physiques.

Des questions subsistent : quid de la capacité d'une pluie intense à casser la cohésion glace-eau et à libérer un volume d'eau supplémentaire?