

	Rapport final	ANR-06
	ANR-06-BLAN-0310	BLAN-0310
		48 mois

Projet ANR-06-BLAN-0310
Sensor-FLOWS
Programme ANR-06-BLAN-0310

A	IDENTIFICATION.....	1
B	LIVRABLES ET JALONS	2
C	RAPPORT D'AVANCEMENT SUR LA PERIODE 2006-2010	3
C.1	Description des travaux effectués.....	3
	C.1.1. Missions de terrain au Spitsberg, base Corbel 79°N	
	C.1.2. Descriptif des mesures effectuées pendant les missions	
C.2	Résultats scientifiques	7
	1. Changement climatique récent : les données de la station météo de Ny Alesund	
	2. Dynamique du manteau neigeux et suivi glaciologique du glacier Loven Est	
	3. Suivi hydrologique du bassin versant du Loven Est	
	4. La géomatique pour quantifier la réaction du glacier aux changements climatiques	
	Conclusion	
C.3	Réunions du consortium (si applicable)	30
C.4	Commentaires libres.....	31
D	IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT	32
D.1	Indicateurs d'impact.....	32
D.2	Liste des publications et communications	33
D.3	Liste des éléments de valorisation.....	37
D.4	Personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)	38
D.5	État financier.....	38

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	Sensor-FLOWS (Flux Of Water and Sediments)
Titre du projet	Etude des dynamiques spatio-temporelles d'hydro-systèmes arctiques par télédétection au sol et spatiale (site instrumental du Loven Est, 79°N)
Coordinateur du projet (société/organisme)	GDR 3062 hébergé à l'UMR 6049 ThéMA Besançon
Date de début du projet	6-11-2006
Date de fin du projet	5-11-2010
Site web du projet, le cas échéant	http://hydro-sensor-flow.com/

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Mme Madeleine GRISELIN
Téléphone	06 81 39 48 51
Adresse électronique	madeleine.griselin@univ-fcomte.fr
Date de rédaction	20/04/2010
Période faisant l'objet du rapport d'activité	Novembre2006-septembre2010

A noter

Comme nous avons postulé pour un nouveau programme ANR Blanc intitulé Cryo-Sensor en janvier 2010, lequel programme fera suite au programme Sensor-FLOWS terminé en novembre 2010, il nous a été demandé de fournir un rapport final dit « provisoire » en avril 2010. Nous étions à 7 mois de la fin de l'ANR Sensor-FLOWS pour laquelle il restait 3 missions de terrain à effectuer (avril 2010, juin-juillet 2010, septembre-octobre 2010).

L'ANR Sensor-FLOWS blan-0310 est terminée depuis le 5 novembre 2010. Nous sommes donc en mesure désormais de fournir le rapport final.

B LIVRABLES ET JALONS

Quand le projet en compte, reproduire ici le tableau des jalons et livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

État *	N°	Titre	Nature (jalon, rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
Livré en cours d'exploitation	1	Bilan glaciologique annuel du glacier Loven Est	données	1 et 2	3 années consécutives de bilan glaciologique par relevé sur les 40 balises installées en 2007 (non prévu initialement)
Livré en cours d'exploitation	2	Bilan hydrologique	données	1 et 2	4 années consécutives de mesures hydrologiques et hydrochimiques
Livré en cours d'exploitation	3	Suivi manteau neigeux	données	1 et 2	12 séries de 45 carottages ont permis de faire, pour la première fois, un suivi de la dynamique du manteau neigeux en plus du suivi par photographies automatiques en 2009. La campagne d'avril et de juin 2010 a permis de renouveler ces carottages de neige pour suivi diachronique de l'évolution du manteau neigeux
Livré en cours d'exploitation	4	Cartographie du lit rocheux	données	1 et 2	N'était pas prévu au programme initial mais a pu se dérouler grâce à une étroite collaboration entre partenaires 1 et 2. L'année 2010 a permis de parfaire les mesures des années précédentes (2 GPR) et collaborations fructueuses avec radaristes de l'université de Swansea (UK)
Livré en cours	5	Etat climatique du bassin (température	données	1 et 2	Grâce à notre réseau de capteurs nous

État *	N°	Titre	Nature (jalon, rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
d'exploitation		de l'air, vent, précipitations)			avons engrangé quatre années de données climatiques concernant le Loven Est (22 capteurs T°C, 9 capteurs vent, 7 pluviomètres, 40 balises à neige et 10 caméras automatiques
Livré en cours d'exploitation	6	Suivi par télédétection	données	1 et 2	Pendant trois années consécutives, l'acquisition de 11 images satellite nous a permis de suivre l'évolution du glacier, traitements en cours. Mise en relation des images satellite avec les photos des caméras automatiques

A noter que les données sont engrangées mais qu'une grande partie de l'exploitation est encore en cours.

C RAPPORT D'AVANCEMENT SUR LA PERIODE 2006-2010

C.1 DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUES

Le programme Sensor-FLOWS repose sur une importante phase de collecte d'informations sur le terrain. Si les capteurs installés (thermomètres, anémomètres, pluviomètres, stations photos automatiques, sondes hydrologiques) fonctionnent de façon continue et automatique tout ou partie de l'année, ils supposent une maintenance importante, donc une présence physique sur le terrain trois fois dans l'année (avril-mai, juin-juillet, septembre-octobre).

Les mesures récurrentes (épaisseur et carottage de neige, bilan glaciologique aux balises, positionnement du front, établissement du MNT annuel des altitudes) requièrent de nombreuses journées sur le terrain au printemps et en automne, de même que le suivi hydrologique et hydrochimique des émissaires pendant la saison d'écoulement (jaugeages, prélèvements d'eau à des fins d'analyses hydrochimiques et isotopiques).

Les investigations au GPR (Ground Penetrating Radar), non prévues dans le programme initial, ont permis, grâce à des campagnes de printemps et d'automne depuis 2007, d'établir la cartographie du lit rocheux du glacier.

C'est pourquoi faire le point sur les missions effectuées donne une bonne idée de l'avancement des travaux (Fig.1).

C.1. 1. Missions de terrain au Spitsberg, base Corbel 79°N

Depuis le début de l'ANR (novembre 2006), nous aurons effectué 12 missions de terrain :

- 3 missions en 2007 : avril ; juillet-août ; septembre → 168 ; 192 ; 120 soit un total de 480 jours-homme (dont celle de juillet comportant 3 adolescentes dans le cadre de l'année polaire internationale)
- 3 missions en 2008 : avril ; juillet ; septembre-octobre → 91 ; 88 ; 91 soit un total de 270 jours-homme
- 3 missions en 2009 : avril-mai-juin-juillet (présence continue) ; sept-octobre → 380 ; 143 soit un total de 523 jours-homme
- 3 missions en 2010 : (avril ; juin-juillet ; septembre-octobre 132 ; 118 ; 83 jours-homme), soit un total de 333 jours-homme pour 2010

Au total donc depuis 4 ans, 12 missions annuelles, 76 vols pour le Spitsberg, 1 606 jours-homme de mission à la base Corbel ont eu lieu dans le cadre du programme ANR (fig. 1). Les missions et voyages ont été financés pour la plupart par l'ANR mais avec un soutien de l'Institut polaire français IPEV (3 missions de 2 personnes par an soit [12 K€]), le GDR Mutations polaires

(2 missions de 2 personnes par an [8 K€]), et, pour les adolescentes assistantes de terrain lors de l'année polaire 2007, le CNRS (2 K€), la région Franche-Comté (2 K€), la ville d'Orsay (2 K€). Dans le programme ANR retenu en 2006, il était prévu au total 30 vols pour les 4 ans et 680 jours-homme de mission. L'arrivée de deux doctorants au cours du programme ANR (Eric Bernard en 2008, [financé CNRS et région Franche-Comté] et Emerick Delangle en 2009 [financé MENSRT]) a permis une augmentation significative de notre présence sur le terrain : deux fois et demi plus qu'annoncé tant en vols qu'en jours de mission. On notera au passage (tableau joint) le désengagement des étrangers : les Allemands totalisent 35 jours-hommes (dont 24 comme post-doctorant UMR Théma donc pris en charge par le partenaire 1), les Espagnols 24, quant aux Russes, ils n'ont jamais honoré leur engagement de participation. Notons qu'au cours de l'année 2006, la région Franche-Comté (75 K€), l'université de Franche-Comté (25 K€), l'Institut polaire français (IPEV, 25 K€), les UMR (10 K€) et le Réseau Arctique (3 K€) avait permis deux missions préalables d'installation d'une partie de l'équipement (avril 2006, 8 personnes, 172 jours-homme ; septembre 2006, 6 personnes, 126 jours-homme). Ces missions préalables ont permis de démarrer les missions de terrain du programme ANR dès 2007 dans des conditions optimales.

Voyages et missions ANRblan-0310 Sensor-FIOWS							
		total annuel				financement	
		vols Spitsberg	mission en jours-homme	vols Spitsberg	mission en jours-homme		
missions pré-ANR							
2006	printemps 2006		8	172		financement région Franche-Comté, Université de Franche-Comté, IPEV et réseau Arctique	
	automne 2006		6	126	14	298	financement région Franche-Comté, Université de Franche-Comté, IPEV et réseau Arctique
Programme ANR							
2007	printemps 2007		7	168			financement ANR + IPEV, région Franche-Comté et GDR Mutations polaires
	été 2007		8	192			financement ANR + IPEV, région Franche-Comté et GDR Mutations polaires
	automne 2007		8	120	23	480	financement ANR + IPEV, région Franche-Comté et GDR Mutations polaires
2008	printemps 2008		6	91			financement ANR + IPEV, région Franche-Comté et GDR Mutations polaires
	été 2008		5	88			financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
	automne 2008		4	91	15	270	financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
2009	printemps 2009		10	315			financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
	été 2009		3	65			financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
	automne 2009		6	143	19	523	financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
2010	printemps 2010		8	132			financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
	été 2010		6	118			financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
	automne 2010		5	83	19	333	financement ANR + IPEV et GDR Mutations polaires
			76	1606	76	1606	
depuis 2007			76		1606		
	partenaire 1		64		1418		
	partenaire 2		6		129		
	Allemands		2		35		
	Espagnols		4		24		

Figure 1 – Missions réalisées au cours du programme ANR Sensor-FIOWS 2006-2010

Pour le détail des missions, voir fichier excell joint "decompte-mission-ANR_2007-2010.xls".

C.1.2. Descriptif des mesures effectuées pendant les missions

Deux missions pré-ANR au cours de l'année 2006 ont permis l'installation du réseau initial de capteurs sur le bassin du glacier Loven Est (Fig. 2) :

- une station météo d'altitude
- 22 capteurs de température de l'air (puis stations de mesure de la température du permafrost)
- 7 (puis 9) anémomètres-pluviomètres
- 8 (puis 13) stations photo automatiques
- 3 stations hydrologiques (sondes multiparamètres et préleveurs automatiques d'eau)

Le réseau initial a subi bien des évolutions au cours des 5 années, il a en outre été complété, dès l'automne 2007, par un réseau de balises à glace implantées pour les mesures annuelles d'accumulation-ablation du glacier (bilan de masse) et pour le suivi de la dynamique du manteau neigeux

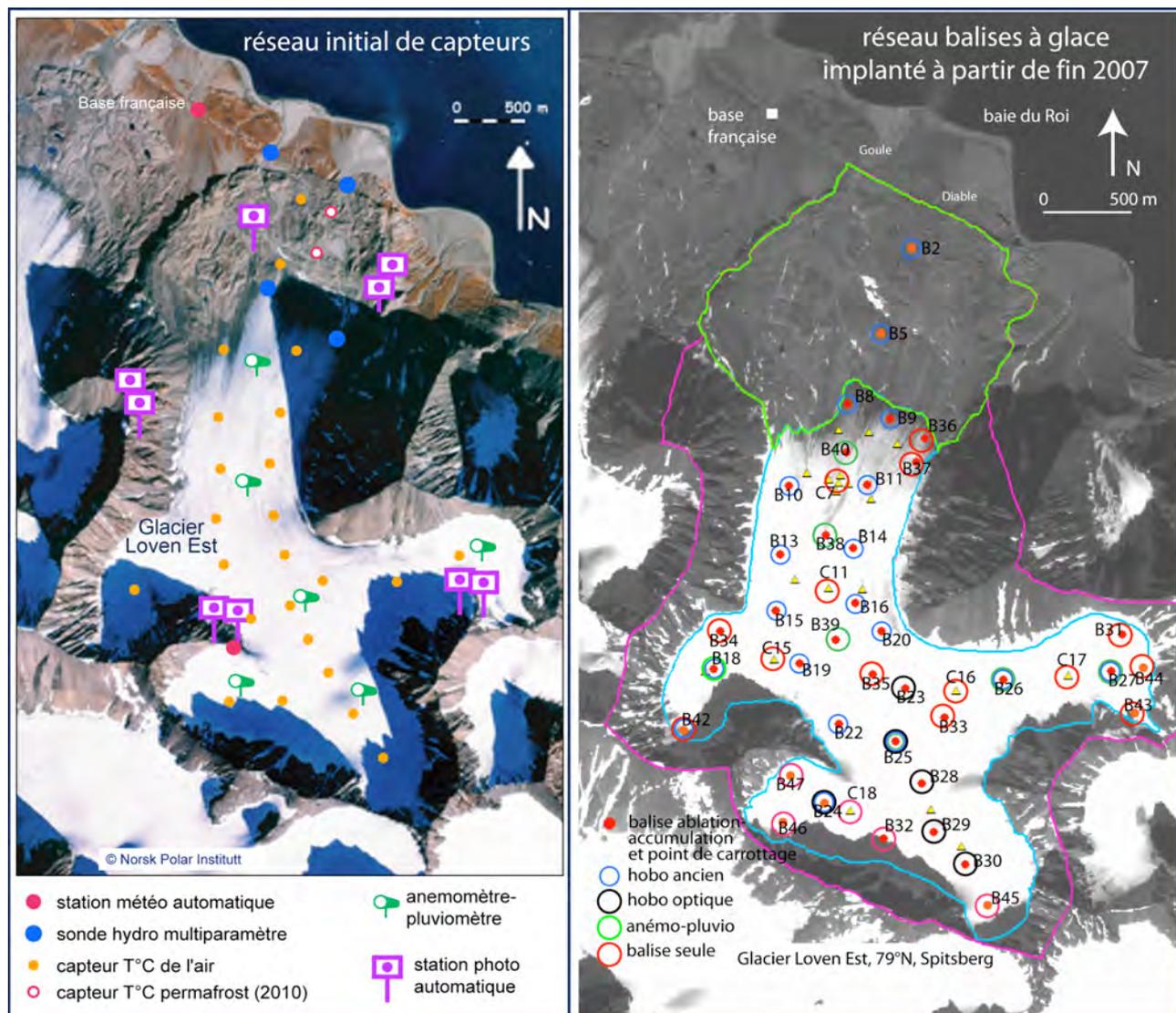


Figure 2 – Le réseau initial de capteurs et le réseau de balises à glace

Une fois le réseau installé, chaque année depuis 2007, les missions se sont déroulées de la façon suivante.

• **Avril-mai**

- déchargement et maintenance des stations photos automatiques
- déchargement et maintenance des capteurs qui restent en place toute l'année (capteurs thermiques, anémomètres, station météo)
- mesures au DGPS de la surface du glacier en vue d'établir le MNT annuel
- mesures au radar GPR (Ground Penetrating Radar) d'abord par notre collègue allemand, puis grâce au GPR récupéré par le FEMTO-ST (partenaire 2) et enfin en collaboration FEMTO-ST / IDES. les mesures GPR sont couplées aux mesures GPS.
- mesures hydrologiques *in situ* sur les écoulements printaniers, prise d'échantillons d'eau pour analyse en France et relevés au GPS des marges glacées et de leur dynamique (comparaison avec nos précédentes mesures et les positions plus anciennes sur document).

depuis 2008

Pour affiner l'étude hydrologique et hydrochimique présentée dans le programme initial, nous avons mis en place un suivi de la couverture neigeuse et de l'ablation-accumulation de la glace par l'implantation, depuis septembre 2007, d'un réseau de balises à glace et le suivi par carottage de neige du manteau en avril.

- mesures annuelles récurrentes de printemps (épaisseur de neige, carottages de neige au drill Pico en

42 points), prise d'échantillons de neige (2 x 5 par carotte) pour mesure densité, analyse chimique et isotopique ; profils nivologiques en 8 points sur transects NS et EW.

en 2009

- changement de tous les systèmes d'accroche des capteurs de température (retraits des trépieds et implantation profonde de balises alu afin d'éviter les chutes et ensevelissement des équipements sous la neige) ; nouveaux capteurs tous opérationnels dès avril

2007, 2008 et 2009

- marquage du glacier avec 100 drapeaux orange de 2 m x 2 m pour permettre l'orthorectification des clichés des stations automatiques.

en 2010

- grande campagne de mesure GPR et DGPS (partenaire 1 et 2) : 300 km donc 50 000 points pour le DGPS seul ; 50 km donc 200 000 points pour le GPR (couplé au GPS non différentiel)

• Mai et juin

En 2009, nos deux doctorants (épaulés par des assistants de terrain venant en relais) ont effectué un suivi en continu des écoulements de printemps (très délicat car l'eau coule sous la neige et les stations automatiques ne peuvent fonctionner), parallèlement à un suivi de la dynamique du manteau neigeux. En 42 points du glacier (aux balises d'accumulation-ablation), 9 séries de carottages ont été effectués, permettant de suivre la dynamique du manteau neigeux qui n'est pas perceptible sur les photos des stations automatiques, ni sur les images satellite, vu que l'eau provenant de la fonte superficielle de la neige percole dans le manteau neigeux pour rejoindre l'interface glace-neige puis coule au niveau de la glace pour alimenter les écoulements de printemps.

En plus des carottages au drill Pico avec pesée *in situ*, 9 profils du manteau neigeux étaient réalisés (à la pelle) en deux transects sur le glacier (EO et NS). A chaque profil, 5 échantillons de neige étaient prélevés pour suivre l'évolution de la densité de la neige, 5 autres pour suivre l'évolution de la teneur isotopique, forcément variable à cause de la migration de l'eau de fonte de surface vers la base du manteau neigeux.

Ces mesures seront reconduites en juin-juillet 2010

• Juillet

Opérations d'hydrochimie et d'hydrologie, tout en continuant les mesures d'évolution du manteau neigeux (depuis 2008).

- mise en place des stations hydrologiques multiparamètres et des préleveurs d'eau automatiques

- établissement de la courbe de tarage des deux émissaires équipés de stations hydrologiques par dilution chimique de NaCl (2007, 2008, 2009, 2010)

- mesures quotidiennes d'hydrochimie

- préparation des échantillons à rapporter en France pour analyse

- installation d'une nouvelle station au deuxième émissaire sous-glaciaire en rive gauche (2009)

en 2009 et 2010

- suivi par carottage de la neige et profils de l'évolution du manteau neigeux

2009 et 2010

- installation de 2 stations d'enregistrement de la variation de température du permafrost à différentes profondeurs

• Septembre

- mesures récurrentes du positionnement au GPS (front et rives du glacier)

- mesures au radar (GPR) pour détecter lit rocheux et réseau intra et sous-glaciaire

- maintenance des stations photos automatiques

- mesures hydrologiques et hydrochimiques d'étiage

- déchargement des préleveurs automatiques

- mesures de débit par dilution chimique pour compléter la courbe de tarage

- hivernage des stations hydro et des pluviomètres en fin de séjour

- maintenance des capteurs qui restent en place l'hiver (T°C, anémomètres, stations météo) et collecte des données
- relevé annuel des balises ablation/accumulation
- carottage de neige dans zone d'accumulation

C.2 RESULTATS SCIENTIFIQUES

Au moment de rendre ce rapport final, nous rentrons juste de notre dernière mission de 2010. Nous pouvons ici faire le point sur les résultats obtenus et ceux attendus. Nous avons à cœur, dans ce rapport final, de faire état des résultats année 2010 comprise, sachant que pour cette dernière année, les données sont loin d'être totalement exploitées et les résultats sont donc encore préliminaires.

- L'objectif initial annoncé est une étude hydrologique et hydrochimique du bassin du glacier Loven Est sur quatre ans. Elle ne saurait se concevoir sans un regard sur les données météorologiques à plus long terme dont on dispose, à savoir la chronique de Meteo Norsk enregistrée à Ny Alesund depuis 1969 (§ 1).
- Afin d'affiner l'approche hydrologique, nous avons développé un volet nivo-glaciologique, renseignant, en amont, l'équation hydrologique : mesures *in situ* et imagerie (satellite et photos des stations automatiques)(§ 2).
- Trois années d'enregistrements, de mesures *in situ* et de prélèvements d'eau nous permettent de rendre compte de la réactivité hydrologique du bassin du Loven Est à trois années très différentes sur le plan climatique (§ 3).
- Enfin, dans un contexte de recul des glaciers depuis 1850, l'estimation par géomatique (MNT, DGPS et radar GPR) permet de quantifier la réaction du glacier au climat des quarante dernières années et de comparer les évolutions actuelles mesurées par nous-mêmes (bilan glaciaire annuel aux balises et DGPS) avec les variations passées du glacier en relation avec les documents disponibles (cartes, MNT, photos) et les chroniques climatiques. Une mention particulière sera faite des avancées concernant les mesures au GPR en vue d'établir la cartographie du lit rocheux du glacier (§ 4).

Il va sans dire que nous avons essayé de communiquer nos résultats chaque année dans des congrès internationaux [7 à 30]¹ et nationaux [34 à 45] (35 communication au total dont les incontournables colloques post année polaire (Copenhague, Montréal, Oslo). Nous organisons nous-même une conférence « Mondes polaires Paris 2011 » qui, sous l'égide du GDR Mutations polaires », fera le point sur les changements observés [7 à 10, 79].

On pourra nous reprocher de n'avoir pas beaucoup de publications papier à ce jour. Sur un programme suivant la dynamique à 4 ans d'un hydrosystème glaciaire, c'est bien sûr en fin de programme que l'on peut se lancer dans des publications papier qui n'ont de valeur que dans la durée maximale de l'observation et qui demandent plus de temps et de précision qu'une communication à colloque. Deux publications sont désormais sorties [1, 31, 39], 3 sont soumises [2, 3, 3, 3b] et 4 en cours de rédaction [4, 5, 6].

1. Changement climatique récent : les données de la station météo de Ny Alesund

Un travail conséquent réalisé dans le cadre de ce programme sur l'analyse des données météo de Ny Alesund (1969-2010) nous permet de comprendre et de quantifier le changement climatique nettement perceptible de la dernière décennie [7, 20, 23, 24, 37, 44]. En fait, les 2°C d'augmentation de la température de l'air enregistrés (et classiquement annoncés) en 41 ans (Fig. 3, trait bleu) sont exclusivement dus à l'augmentation des températures des 12 dernières années (trait fushia). Il en va de même pour les précipitations : l'augmentation des précipitations totales est due uniquement à une augmentation de la pluie tandis qu'on n'observe aucun gradient sur les quantités de neige précipitées (Fig. 4).

¹ Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie du programme page 33.

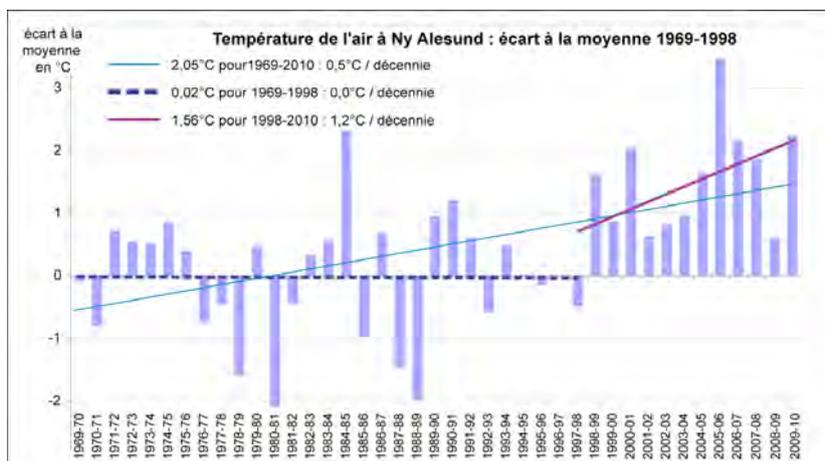


Figure 3 – Température de l'air à Ny Alesund, 1969-2008 : écart à la moyenne 1969-1998
 Le gradient est + 2°C en 41 ans (+0.5°C par décennie), [trait fushia] :
 mais, pas de gradient significatif pour les 30 premières années [pointillé bleu marine]
 et 1,56°C de gradient pour les 12 dernières années [trait rose] avec une rupture en 1998-1999

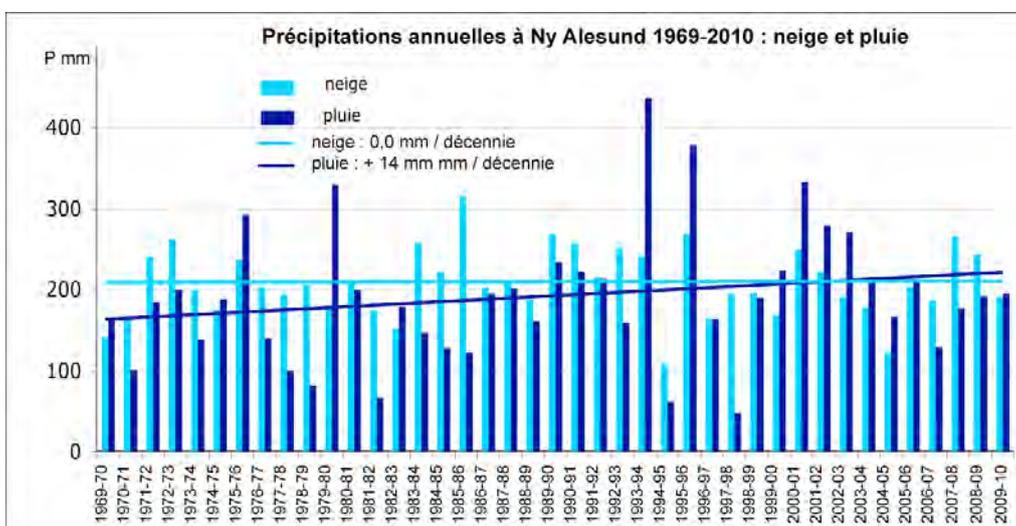


Figure 4 – Variation des précipitations annuelles (pluie et neige) à Ny Alesund (1969-2008)
 L'augmentation générale de +16 mm / décennie est exclusivement due à la pluie (bleu marine)
 tandis que la neige est constante (turquoise). Equation fatale aux glaciers.

En cette fin de programme nous avons donc acquis les données hydro-glacio-climatologiques pour quatre années hydrologiques complètes (1^{er} octobre - 30 septembre), qui permettront une comparaison entre ces quatre années très différentes et une mise en relation avec les données antérieures des Espagnols, des Français (1964-70 ; 1980-81) ainsi qu'avec les 41 années d'enregistrement météo de la station de Ny Alesund (Fig. 5 et 6).

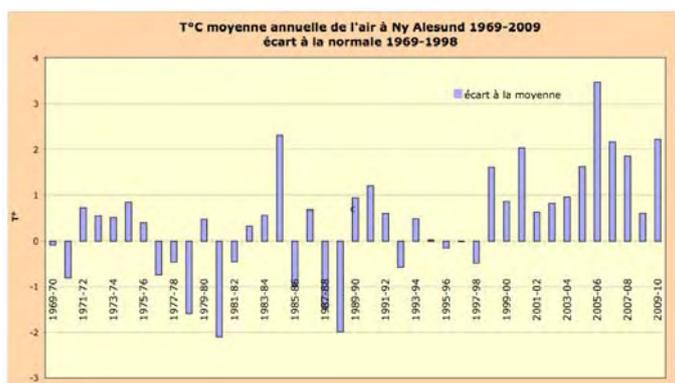


Figure 5 – Données météorologiques journalières enregistrées à Ny Alesund, 79°N :
 2009-2010 et 2006-2007 furent respectivement les deuxième et troisième années les plus chaudes de la dernière décennie,
 alors que l'année 2008-2009 est proche de la normale 1969-1998

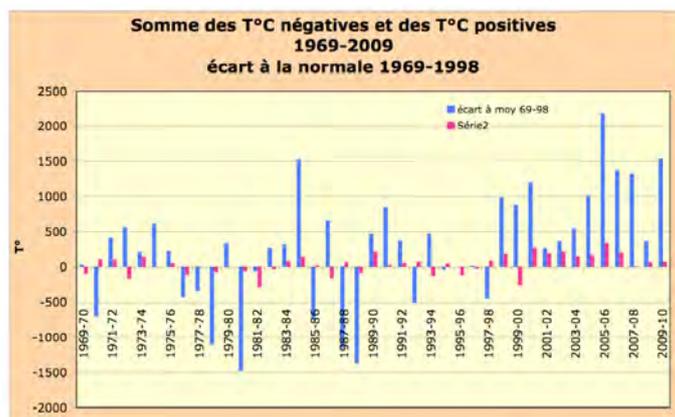


Figure 6 – L'augmentation de la température moyenne annuelle résulte plus d'un déficit de froid en hiver que d'un excès de chaleur en été. Du reste, l'été 2008 est le premier été de la décennie à être dans la normale 1969-1998

Les quatre années prises en considération pour le programme ANR sont très différentes, tant en températures moyennes annuelles, qu'en précipitations solides et liquides (Fig. 7 et tableau 1)

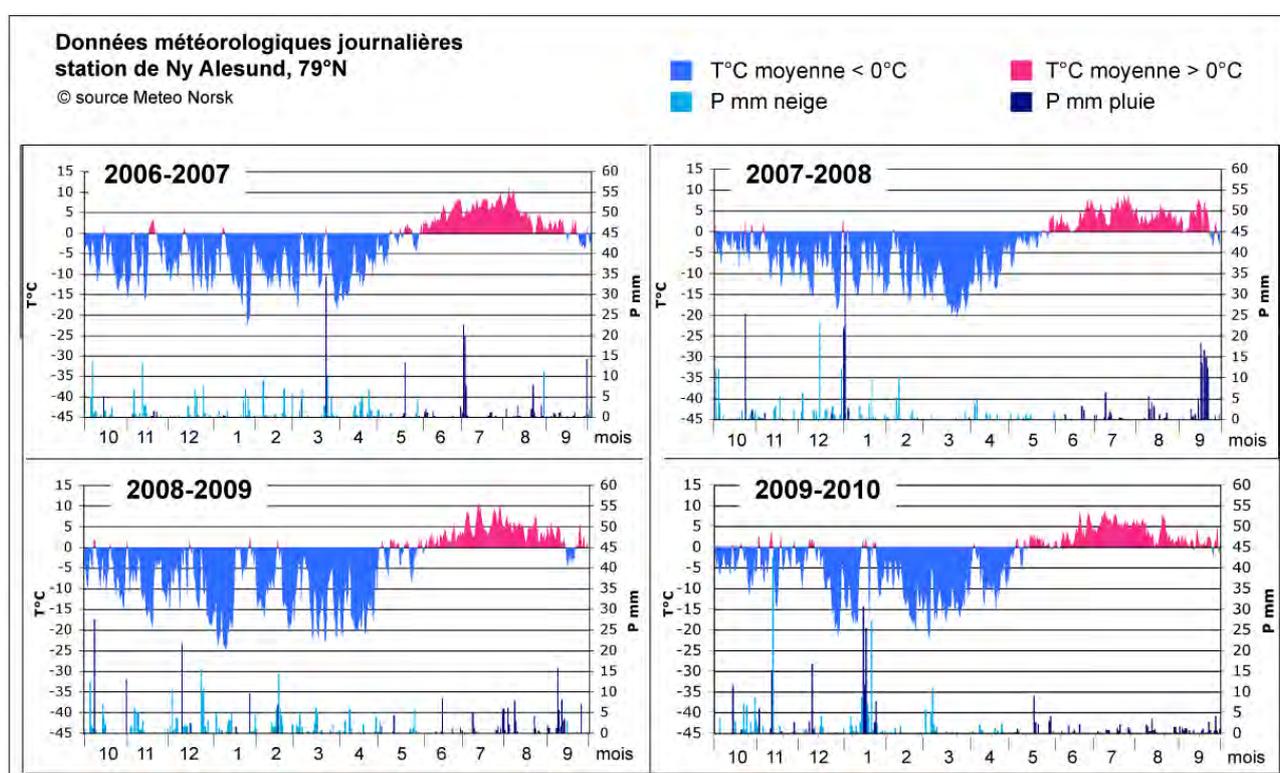


Figure 7 – Données météorologiques journalières enregistrées à Ny Alesund, 79°N : les quatre années hydrologiques prises en compte

	T°C moy annuelle	moy des T°C <0°C rapportée à 365 jours	moy des T°C >0°C rapportée à 365 jours	P mm totale	P mm neige	P mm pluie
2006-2007	-3,62	-5,07	1,45	316,6	187,6	129,0
2007-2008	-3,92	-5,20	1,24	442,0	265,3	176,7
2008-2009	-5,17	-6,44	1,27	435,1	243,5	191,6
2009-2010	-3,56	-4,84	1,28	386,3	191,1	195,2
normale 1969-1998	-5,77	-6,95	1,18	390,8	210,0	180,8

Tableau 1 – Caractérisation des années hydrologiques (1^{er} octobre-30 septembre) prises en compte dans le programme HSF

Au total donc, depuis le début du programme, deux premières années relativement "chaudes", notamment en été pour l'année 2006-2007 qui fut peu arrosée (peu de neige, peu de pluie) et dans laquelle l'action de la température estivale va contrôler le comportement hydrologique ; 2007-2008, très arrosée, neige en

excédent, pluie dans la norme, avec un été thermiquement normal (le plus froid de la décennie), ce qui va donner un comportement hydrologique dominé par les précipitations, avec d'importants épisodes pluvieux en hiver (janvier) et en toute fin d'année hydrologique ; 2008-2009, année la plus froide de la décennie, très arrosée, tant en neige qu'en pluie qui va donner un régime hydrologique mixte influencé conjointement par les températures et les précipitations. Enfin, 2009-2010, deuxième année la plus chaude de la décennie, la plus chaude du programme HSF, montrant un déficit de froid en hiver, des précipitations globalement dans la norme mais année marquée par un été très sec et des épisodes pluvieux en hiver (au niveau de la mer) qui ont donc donné une neige abondante sur les glaciers. À noter que cette dernière année est en cours d'analyse et que les résultats sont encore préliminaires.

Le réseau de 22 capteurs de températures de l'air nous permet de définir heure par heure l'état thermique du glacier et de déterminer la position de l'isotherme 0°C donc de quantifier les surfaces potentiellement soumises à la fonte et susceptibles d'apporter de l'eau de fonte de neige ou de glace au bilan hydrologique. Au total, 9 000 cartes d'état thermique sont générées chaque année depuis 2006 (Fig. 8 et fig. 9).

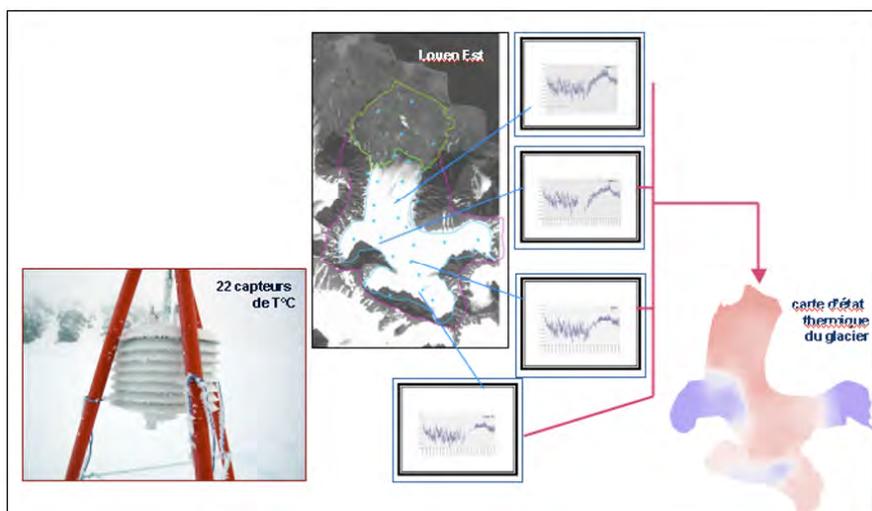


Figure 8 – Détermination de l'état thermique du glacier (pas de temps horaire, soit 9 000 cartes par an). La température est enregistrée heure par heure en 22 points du glacier. Les données sont ensuite interpolées (IDW) pour spatialiser l'information et produire un état thermique du bassin (une valeur unique) à opposer au débit obtenu heure par heure sur les émissaires. Cette spatialisation de l'information thermique permet d'attribuer une valeur de température de l'air à chaque pixel, donc de déterminer heure par heure la position de l'isotherme 0°C et de quantifier les surfaces de neige et de glace soumise à la fonte.

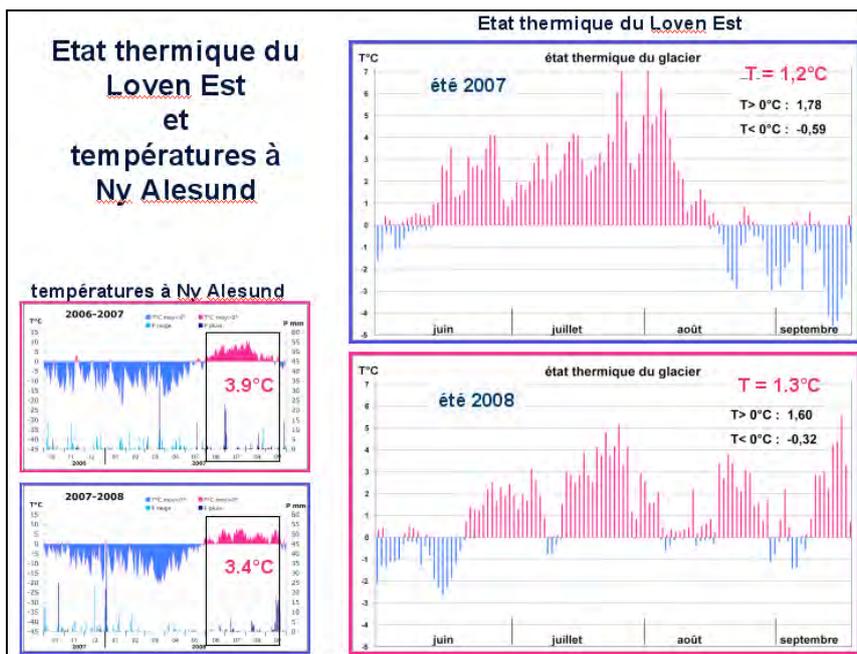


Figure 9 – Températures à Ny Alesund et état thermique du glacier Loven Est : exemple de l'été 2007. L'été 2007 se révèle plus chaud que l'été 2008 à la station de Ny Alesund. En déterminant l'état thermique du glacier, on obtient un été 2008 plus chaud que 2007. Dans cette figure

L'étude des vents est plus complexe, 9 enregistreurs sur 10 km² n'autorisent pas une interpolation. Au moins avons-nous pu établir les roses des vents en chaque point d'enregistrement, ce qui permet de comprendre les dissymétries spatiales importantes dans la distribution du manteau neigeux (Fig. 10).

Les pluviomètres qui ne sont opérationnels qu'en été, ont permis d'établir le gradient altitudinal des précipitations pour chaque épisode pluvieux d'été.

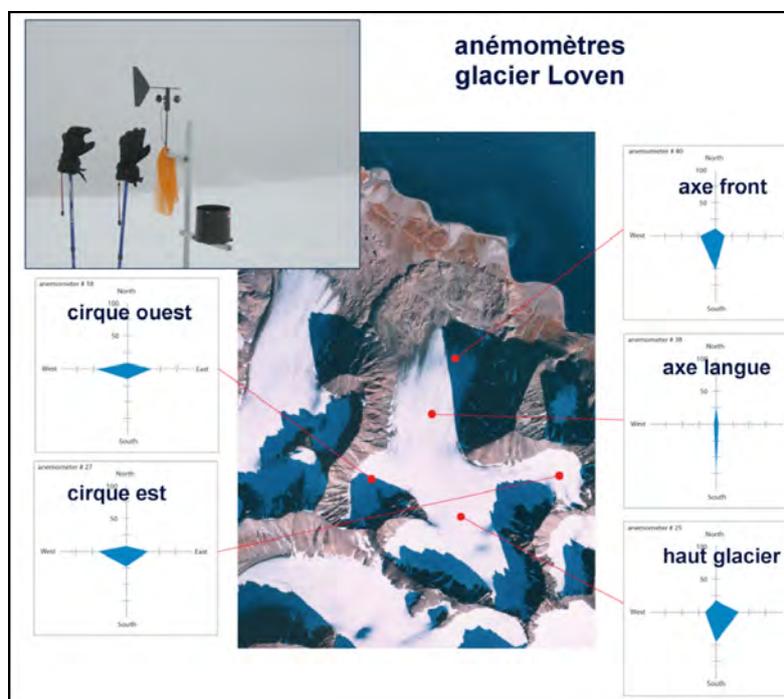


Figure 10 – Roses des vents sur le glacier Loven Est

Les cirques ont une dominante est-ouest.

Le haut du glacier est soumis aux vents d'est aux vents catabatiques sud-nord. La langue présente exclusivement des vents catabatiques sud-nord, tandis qu'au front, les vents catabatiques sont contrariés par l'influence de la dominante est-ouest affectant le fjord.

2. Dynamique du manteau neigeux et suivi glaciologique du glacier Loven Est

Afin d'affiner l'approche hydrologique, nous avons développé un volet nivo-glaciologique, renseignant, en amont, l'équation des bilans des écoulements. Ce volet n'était pas prévu dans le programme initial démarré en 2006, mais il s'est vite révélé nécessaire d'établir, avec le plus de précision possible, l'entrée neige et glace du bilan hydrologique afin de pouvoir restituer les lames de fonte potentielles. L'entrée en lice d'un doctorant sur ce sujet a permis de sérieuses avancées sur cette question [4, 5, 8, 10, 12, 13, 15, 18, 27, 28, 32, 34, 39, 42, 43, 45].

Pour quantifier la dynamique du manteau neigeux, il est nécessaire de réaliser au printemps le suivi des masses et des hauteurs de neige par carottage de neige (drill Pico). Il s'accompagne d'un suivi diachronique à partir des images Formosat (11 images par an) entre lesquelles les 3 clichés par station et par jour issus de notre réseau de 10 stations photos automatiques permettent d'affiner au jour le jour l'information concernant la dynamique du manteau neigeux (Fig. 11).

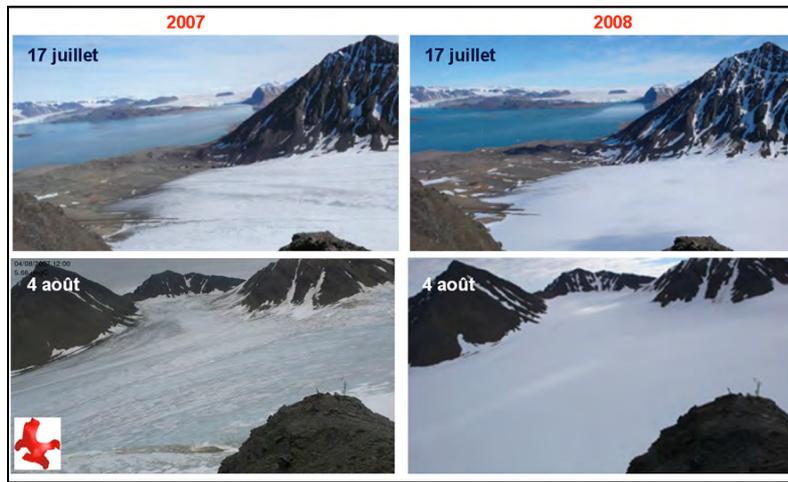


Figure 11 – Suivi de la dynamique du manteau neigeux du glacier Loven Est à partir des clichés des stations photos automatiques : comparaison 2008-2009. 2008 montre un retard important dans la fonte que ce soit au niveau de la langue (17 juillet) ou dans la partie supérieure du glacier (4 août)

Les photos *in situ* permettent aussi d'aborder la dynamique de la neige sur les pentes (qui constituent 35 % du bassin), pentes qu'il est difficile de suivre sur les images satellite car elles se trouvent très réduites par la projection verticale, et pentes impossibles à équiper de balises et de capteurs car trop dangereuses d'accès (couloirs d'avalanche et éboulis instables très pentus) ce qui exclut également la possibilité d'y entreprendre des mesures de hauteur de neige ou des carottages. Un important travail a été mené en ce qui concerne les avalanches (Fig. 12) : nous avons pu démontrer par l'image que la neige des pentes n'atteint pas le glacier et ne constitue donc pas à sa recharge, vu qu'à l'exception des cirques d'accumulation, aucune coulée n'atteint le glacier. La neige accumulée sur les pentes se retrouve intégralement restituée à l'équation hydrologique par écoulement liquide dans les rimayes latérales où l'eau rejoint les exutoires par circulation latérale sous-glaciaire.

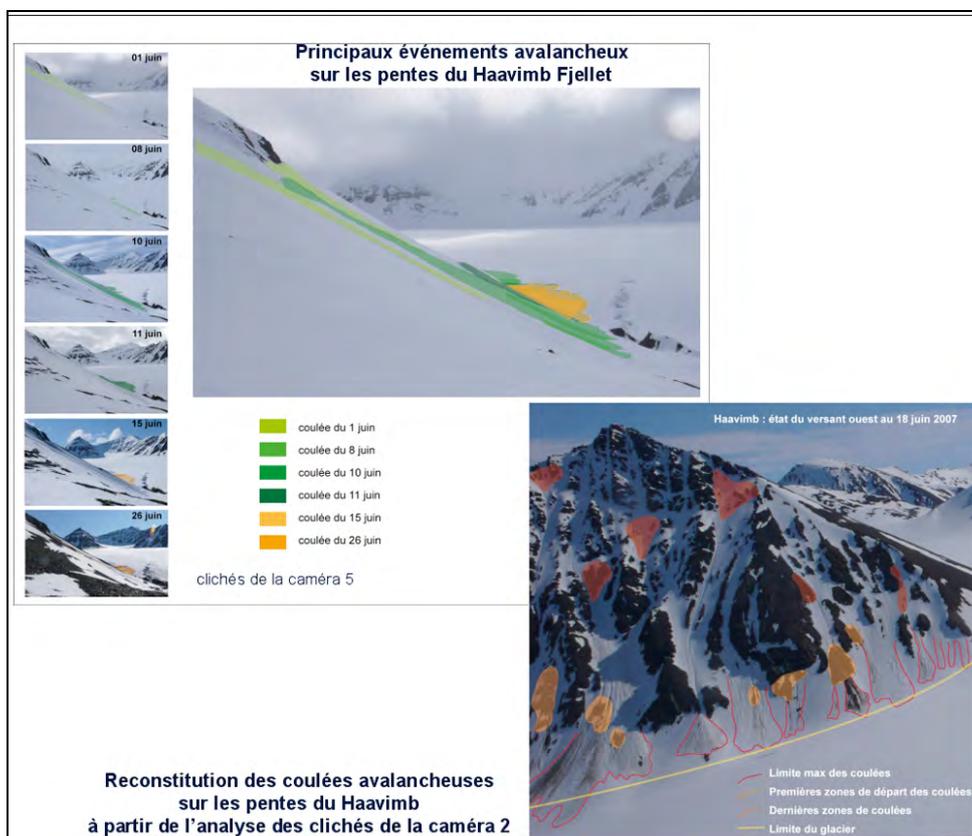


Figure 12 – Suivi des avalanches à partir des clichés des stations photos automatiques. Les pentes qui représentent 35 % du bassin ne contribuent pas à l'alimentation en neige du glacier, puisque aucune coulée n'atteint celui-ci. La neige des pentes est presque exclusivement restituée à l'équation hydrologique par fonte et écoulement direct dans les rimayes latérales

Les photos acquises par nos stations automatiques permettent, une fois orthorectifiées, de faire des calculs très précis, au jour le jour, des surfaces en neige et en glace sur le glacier qui contribuent différemment à l'équation hydrologique. Le travail de redressement géométrique des photos tangentielles est énorme et peu automatisable. Il a fait l'objet d'une communication en septembre 2010 au 11th *Circumpolar Remote Sensing Symposium* à Cambridge [2, 3], en prenant pour exemple l'évolution de la surface du glacier lors de la crue de septembre 2008 (fig. 13).

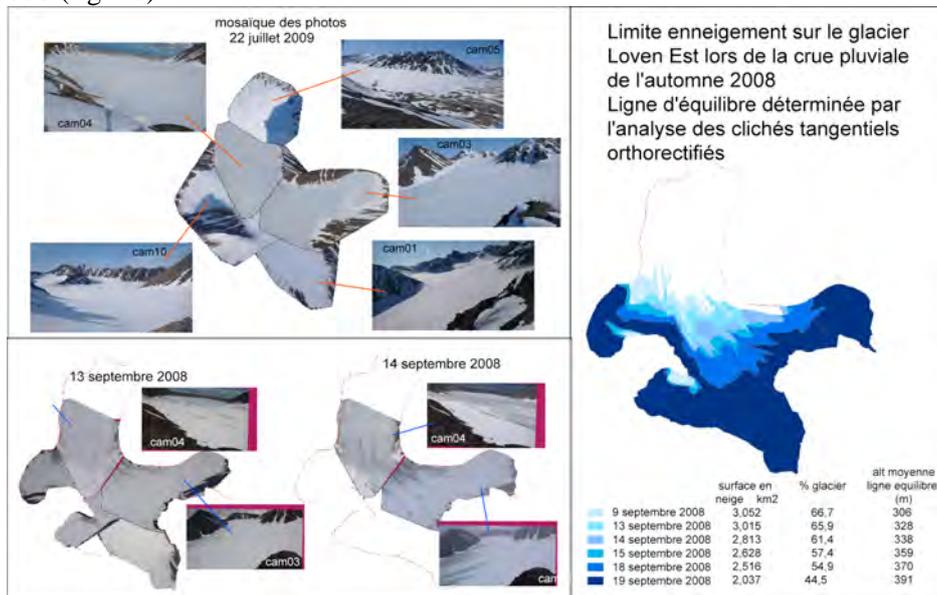


Figure 13 - Rectification géométrique des clichés des stations photo automatiques et leur application pour déterminer la limite glace-neige et son évolution lors de la crue de l'automne 2008

Le monitoring de la dynamique du manteau neigeux repose aussi sur d'importantes mesures récurrentes sur le terrain. Selon les protocoles établis pour les glaciers du monde entier, des carottages de la neige sont réalisés au drill Pico. Ils permettent de définir des hauteurs de neige au point de mesure, mais aussi, par pesée des carottes retirées, l'équivalent en eau (w.eq) exprimé en mm du manteau neigeux. Les méthodes géomatiques permettent d'interpoler les mesures ponctuelles pour spatialiser l'information et définir la lame d'eau équivalent au manteau neigeux, ce qui est stocké, potentiellement disponible, et si on répète les mesures ce qui a disparu ou s'est accumulé depuis la mesure précédente.

Le manteau neigeux a été suivi trois années de suite (2008, 2009, 2010). Pour des hauteurs de neige très différentes (2009 manteau neigeux beaucoup plus épais qu'en 2008), on obtient en équivalent eau des lames très similaires (Fig. 14).

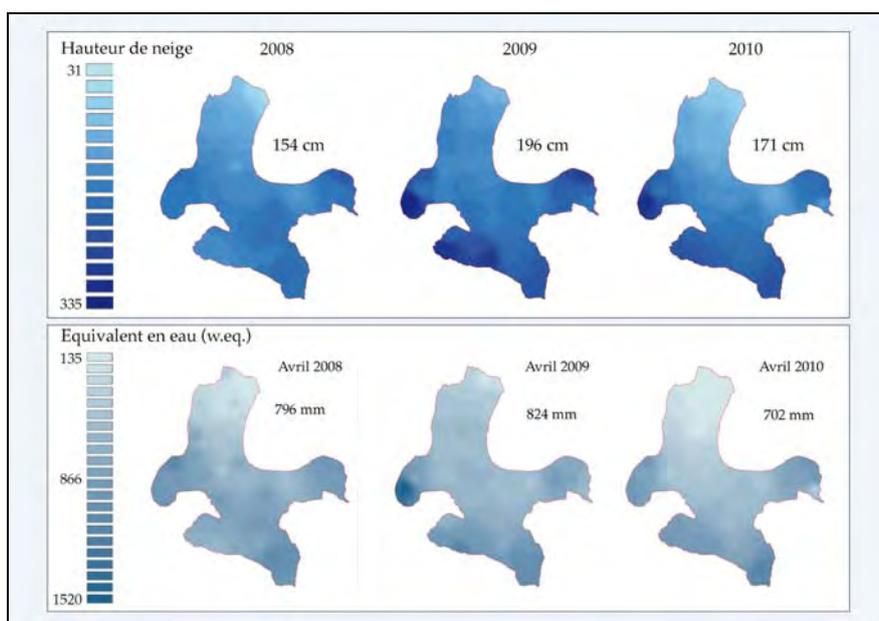


Figure 14 – Hauteurs de neige et équivalent-eau du manteau neigeux du glacier Loven Est en 2008, 2009 et 2010
Pour des hauteurs très différentes (vs 2008 : 30 % de plus en 2009 et 11 % de plus en 2010) les équivalents en eau sont similaires (vs 2008 : 3 % de plus en 2009 mais 10% de moins en 2010)

La présence en continue sur le terrain d'avril à juillet 2009 a permis avec 10 campagnes de carottages d'établir l'évolution du manteau et la dynamique de fonte en relation avec la variation de l'état thermique du glacier (Fig. 15). Seuls les carottages donnent un état du manteau quantifiable, alors que les données issues de l'image satellite et des photos des stations automatiques ne donnent qu'une information binaire de présence/absence de neige.

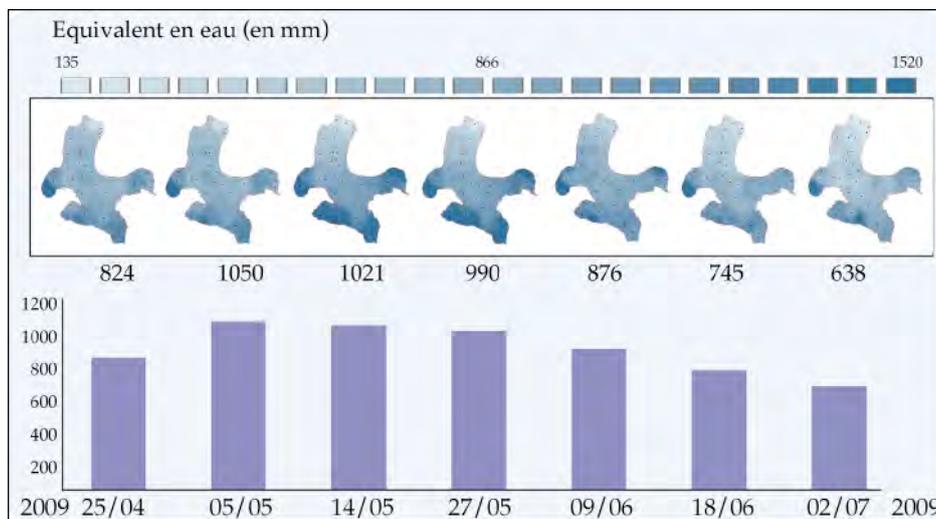


Figure 15 – Evolution du manteau neigeux du glacier Loven Est entre avril et juillet 2009 en équivalent eau. Les données sont interpolées (IDW) à partir de 40 carottages répartis sur la surface du glacier. 9 campagnes de carottage ont été menées en 2009 et 5 d'avril à juillet 2010

La dynamique du manteau neigeux est également suivie par une série de profils creusés dans la neige à chaque tournée de carottage (Fig. 16). Une analyse nivologique descriptive est effectuée en chaque profil, à chaque tournée, fournissant des données qualitatives sur la stratigraphie de la couche de neige et son évolution. Des prélèvements de neige ont lieu chaque fois en 5 profondeurs de chaque profil pour déterminer la densité et les teneurs isotopiques (oxygène-18 et deutérium) de la neige (analyses en cours).



Figure 16 – Carottage au drill Pico (à gauche) et profil stratigraphique de la neige (à droite)

3 • Suivi hydrologique du bassin versant du Loven Est

Le suivi hydrologique du bassin versant du glacier Loven Est (Austrelovenbreen) a été réalisé sur deux cours d'eau :

- La Goule, principale exutoire drainant le glacier, les versants du bassin ainsi que la moraine frontale. Les flux d'eau en ce point sont une fonction de mélange complexe entre l'eau de fonte de la neige (moraine et glacier) et de la glace (glacier, pergélisol), l'eau souterraine de nappe supra-pergélisol et

sous-glaciaire ainsi que la pluie. Les débits varient beaucoup de quelques litres à quelques m^3 par seconde.

- Le Diable, exutoire secondaire, n'est pas connecté au glacier, du moins généralement pas car il peut y avoir des connections temporaires certaines années ou à certains moments de la saison hydrologique. Schématiquement, ce petit cours d'eau draine seulement la moraine frontale (neige/pluie, fonte de la couche active et du pergélisol) et présente des débits faibles (inférieurs à 50 l.s^{-1}).

La Goule et le Diable ont été suivis sur plusieurs étés (2007, 2008, 2009 et 2010) grâce à des capteurs de pression, des sondes multi-paramètres et à des préleveurs automatiques d'eau pour les mesures chimiques et isotopiques en laboratoire (Fig. 17), [9, 14, 16, 19, 22, 25, 26, 29, 30, 36, 38, 40, 41].

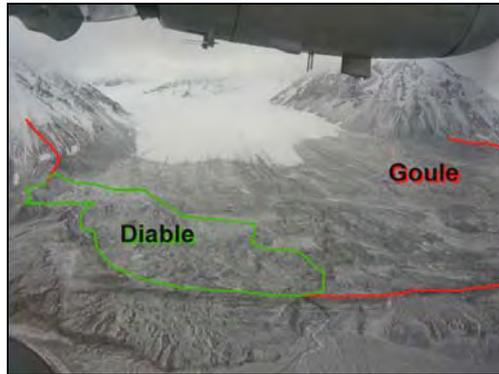


Figure 17 – La Goule, exutoire du glacier Loven Est, et le Diable, bassin intramorainique déconnecté du glacier

3.1. Mesures de débits

Au cours du programme, les débits de la Goule et du Diable ont été obtenus à partir :

1. de mesures en continu au pas de temps horaire de la hauteur d'eau dans les cours d'eau (juin-Juillet à fin septembre) grâce à des sondes DIVER et sondes multiparamètres immergées (ACTEON-AQUACLIP 100)
2. de courbes de tarage spécifiques établies pour chaque section de rivière (Goule et Diable ; Fig. 18).

L'établissement des deux courbes de tarage (débit Q en fonction de la hauteur d'eau h) a nécessité des mesures ponctuelles de débits qui ont été réalisées par dilution chimique (NaCl , Easyflow – MADD Technology). Au cours de trois étés (2008, 2009 et 2010), les courbes de tarage ont été définies avec 39 points de mesure sur la Goule (pour des débits allant de $0,02$ à près de $5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) et 10 points sur le Diable (débits entre $0,004$ à $0,037 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$). Ces gammes encadrent bien les débits horaires obtenus. Les droites de tarage sont à présent fiables et invariantes en fonction du temps, ce qui est lié au fait que la section de mesure choisie est située sur un substratum rocheux dont la forme est stable dans le temps et que la méthode de dilution chimique est particulièrement adaptée à l'environnement glaciaire étudié (écoulement turbulent de cours d'eau à faible débit, qui conduit à un très bon brassage des eaux entre le point d'injection du traceur en amont et de mesure en aval). Pour chaque débit, le passage du nuage de sel a été enregistré par deux appareils Easyflow placés en 2 points de la section de mesure, ce qui garantit la fiabilité des mesures ($<5\%$ de différence). Sur la figure 19, les années des mesures de débits sont spécifiées par un code couleur:

- 11 débits en 2008 (jaune)
- 11 débits en 2009 (rouge)
- 17 débits en 2010 (bleu).

Les données obtenues au cours de l'été 2010 s'accordent parfaitement avec celles des années antérieures, 2008 et 2009. Les courbes proposées sont globalement linéaires pour les deux sections. Pour les faibles débits de la Goule ($< 0,1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), une deuxième équation linéaire a été retenue, en accord avec les changements de forme de la section mouillée de la station.

Pour les années à venir, une mesure de hauteur d'eau à chaque exutoire, aux stations équipées en aval des bassins de la Goule et du Diable, permettra d'obtenir des valeurs de flux par simple application des courbes de tarage (applicables si les appareils de mesure dans l'eau sont remis à la même profondeur d'immersion). Un suivi à long terme des débits de la Goule et du Diable est donc à présent facilement réalisable.

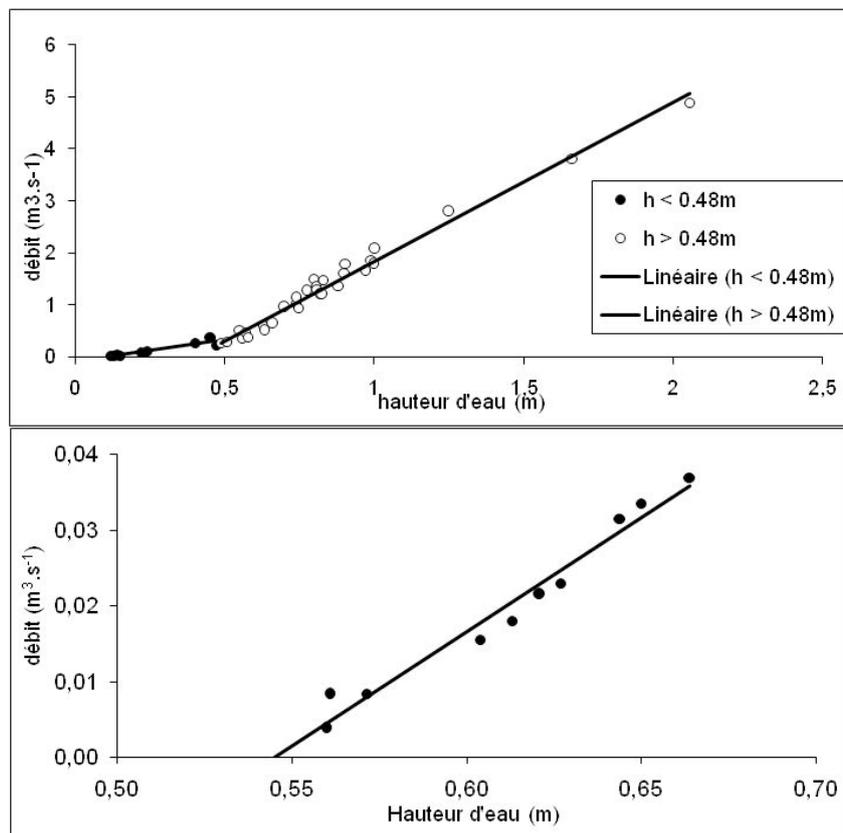


Figure 18 – Courbes de tarage établies pour la Goule (haut) et le Diabie (Bas) à partir de mesures ponctuelles de débits réalisées durant trois étés successifs (2008, 2009 et 2010).

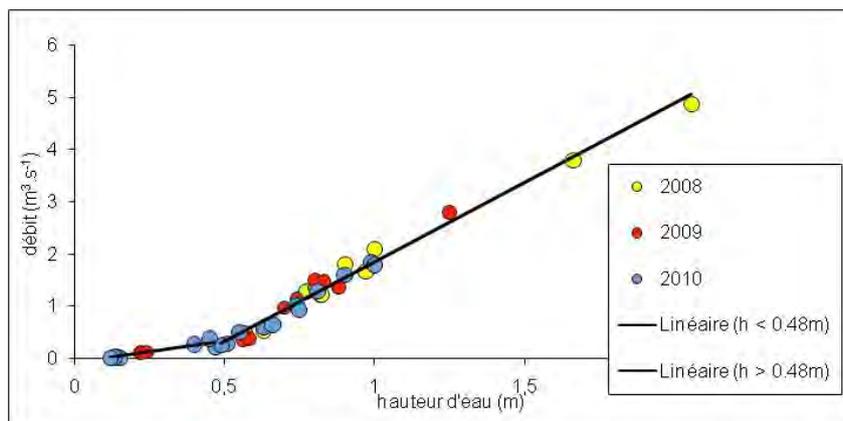


Figure 19 – Courbe de tarage établie pour la Goule à partir de mesures de débits ponctuels obtenus en 2008, 2009 et 2010.

3.2. Rivière Goule : exutoire principale du bassin versant

La rivière Goule constitue l'exutoire principal du bassin. Cet exutoire se situe dans un canyon traversant une barre calcaire du Permo-carbonifère en aval de l'arc morainique. Ce point de mesure a l'intérêt d'être très bien défini, facile à équiper, invariant dans le temps et totalisateur pour tous les écoulements provenant du glacier Loven Est (Fig. 20). Cette géométrie est rarement rencontrée dans l'Arctique.

Les débits de la Goule peuvent varier de quelques litres par seconde à plusieurs mètres cubes par seconde en période de crue (forte T de l'air et/ou forte hauteur de pluie) pendant l'été (juillet à septembre). L'hydrogramme dépend de plusieurs sources (fonte du glacier et de la neige, pluies, rivières sous-glaciaires, fonte du pergélisol et apport par des sources d'eau souterraine dans la moraine frontale) ; les flux peuvent donc être fortement variables d'une année à l'autre (Fig. 21).

Les enregistrements de débits en continu ont en général commencé entre mi-juin et début juillet pour se terminer fin septembre, totalisant en moyenne une centaine de jours de mesures (avec des enregistrements horaires de la hauteur d'eau), (Fig. 21). Les observations effectuées *in-situ* sur la saison 2009 montrent que le début des écoulements commence en fait un mois plus tôt, vers fin mai, mais vu la difficulté de la mesure (présence d'une épaisse couverture de neige-glace dans le lit de la rivière), il n'est pas possible de suivre en continu ces premiers écoulements qui se manifestent par un flux d'eau liquide à travers la neige (Fig. 20). De

même, à la fin de la saison, un écoulement résiduel, très faible existe encore lorsque les stations hydrologiques sont démontées pour l'hivernage début octobre.



Figure 20 – Vue vers l'aval de La Goule à l'exutoire du bassin versant.
La station hydrologique, située à l'endroit des balises oranges, est sous la neige (photo du 18 juin 2010
Cliché E. Delangle

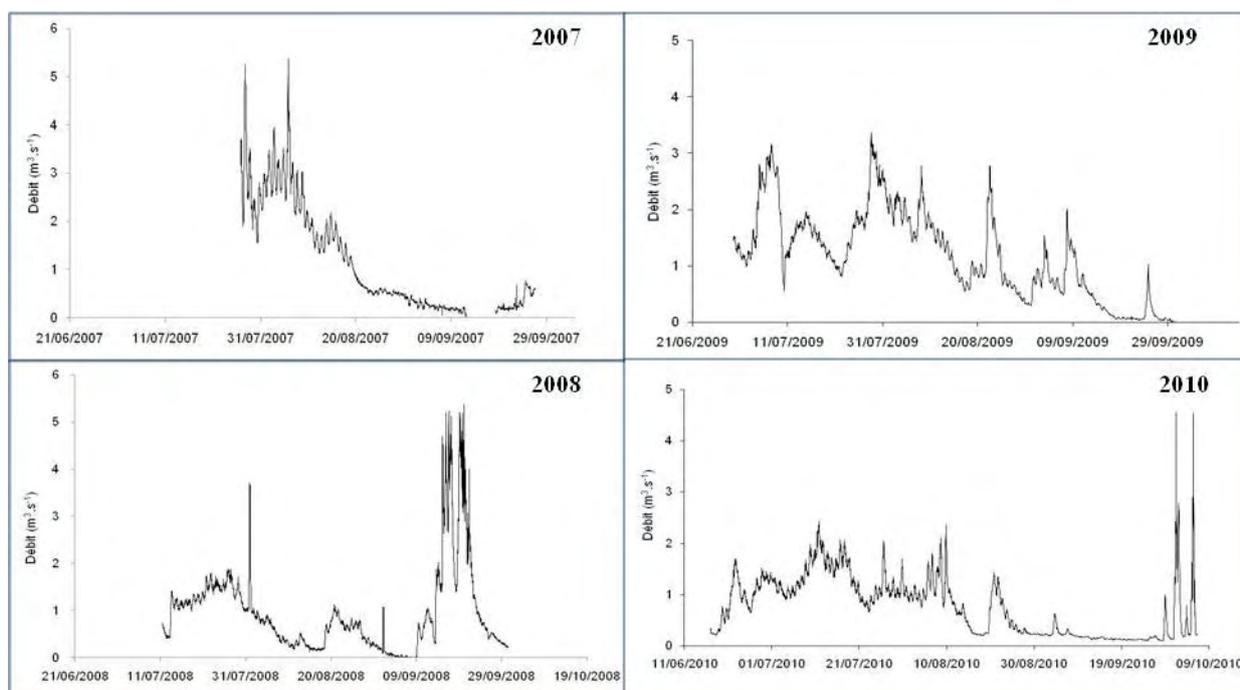


Figure 21 – Suivi du débit de la Goule durant les étés 2007, 2008, 2009 et 2010. Les hydrogrammes diffèrent fortement d'une année à l'autre car liés à la variabilité des paramètres climatiques : la température de l'air contrôle la fonte et la pluie contribue directement et rapidement aux écoulements, spécialement en fin de saison lorsque le sol est déjà gelé.

On observe qu'à partir de mi-juillet-début août, le retour vers une situation de basses eaux débute, synchrone de la disparition de la quasi-totalité du manteau neigeux dans la partie basse du bassin. Plus tard, durant la première décennie de septembre, la température de l'air devenant négative conduit progressivement à un tarissement du cours d'eau dû au regel et à l'arrêt de la fonte supra-glaciaire et nivale. Tout événement pluvieux intervenant durant cette période de reprise en gel se traduit par des crues rapides, le sol étant alors gelé et n'autorisant plus aucune infiltration d'eau. En 2008 comme en 2010, on a observé que l'essentiel des flux d'eau à l'exutoire s'est écoulé durant cette période après un été très sec.

À titre d'exemple, la chronique 2009 du débit à l'exutoire (Goule) superposée à celle des précipitations et celle de la température de l'air est fournie en figures 22 et 23. Elle montre une concordance globale avec l'histogramme des précipitations. La plupart des événements pluvieux conduisent à des crues

événementielles mais ils ne contrôlent pas entièrement le débit. La température de l'air joue un rôle essentiel dans le comportement hydrologique du bassin versant. Les événements chauds amplifient l'effet des pluies, d'autre part ils peuvent être seuls responsables de crues. Enfin, les événements froids agissent instantanément sur le débit, le réduisant au minimum (fin septembre).

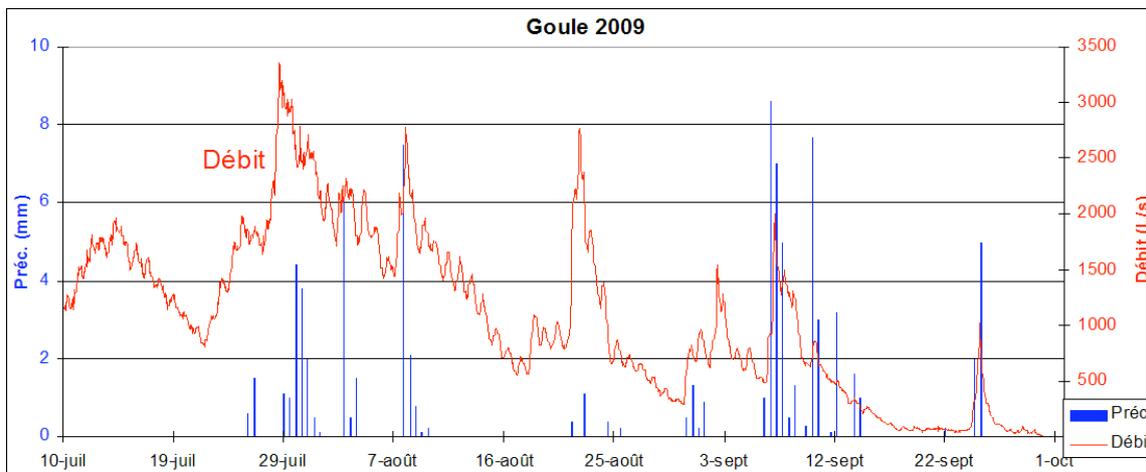


Figure 22 – Chronique du débit de la Goule (exutoire principal du glacier Loven Est) durant la saison estivale 2009 et histogramme des précipitations journalières

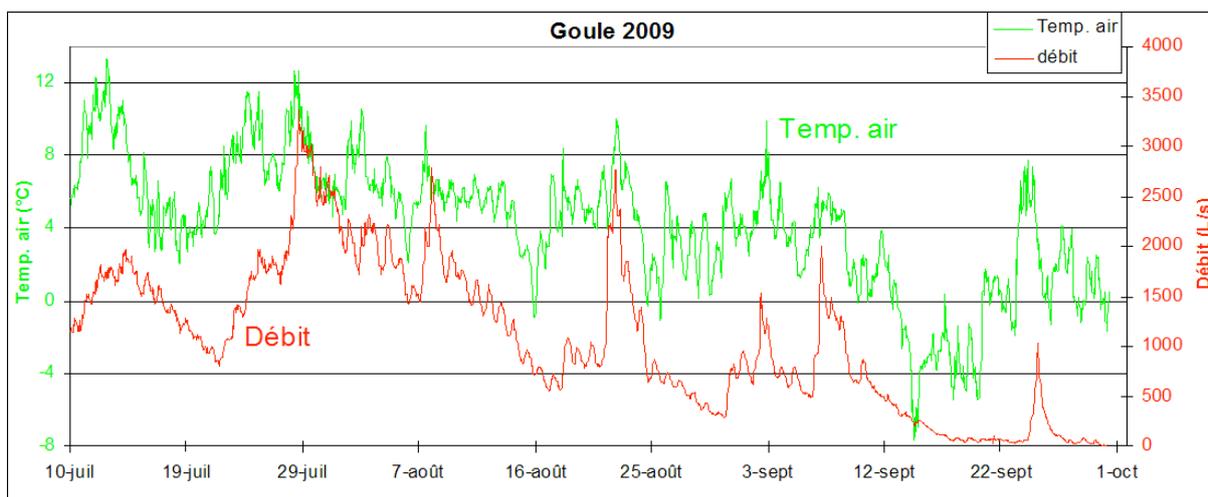


Figure 23 – Chronique du débit de la Goule (exutoire principal du glacier Loven Est) durant la saison estivale 2009 et chroniques de la température de l'air

La réponse hydrologique du BV revêt deux comportements, l'un événementiel décrit ci-dessus et l'autre cyclique. Cette cyclicité, nettement visible lors des tarissements, est journalière. On mesure ainsi une majorité de débits journaliers minimaux vers 7 h et maximaux vers 16 h. Cette cyclicité reflète les variations thermiques de l'air avec un retard à l'écoulement spécifique du réseau hydrique (Fig. 24) bien que l'on soit dans des conditions de jour permanent.

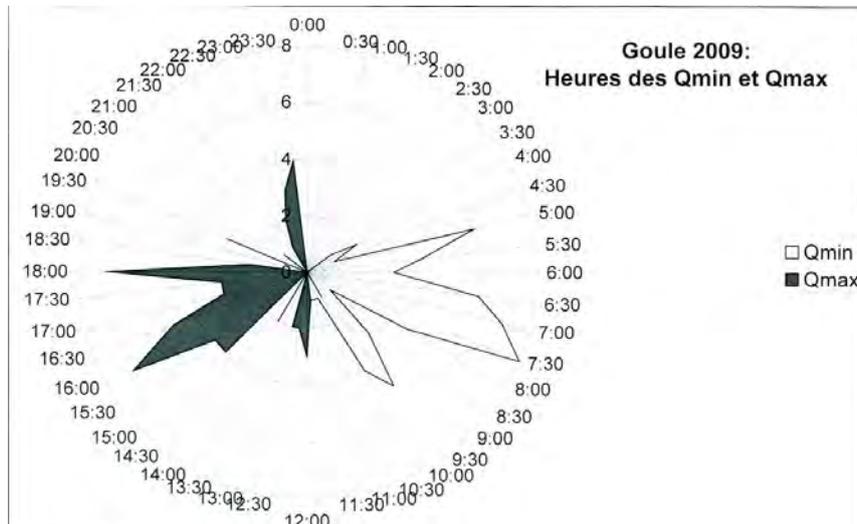


Figure 24 – Distribution temporelle journalière des débits maximaux et minimaux de la Goule durant la saison estivale 2009

En 2009, le cumul du volume d'eau écoulé à l'exutoire, montre l'importance des crues de fin juillet et début août dans le bilan hydrologique (pente forte sur le graphique de la figure 25). À l'inverse, la crue de septembre 2009 agit peu sur ce bilan (pente faible sur le graphique de la figure 25), à l'opposé de la saison 2008 où la crue de septembre roule, en quelques jours, près de la moitié des débits de la saison d'écoulement.

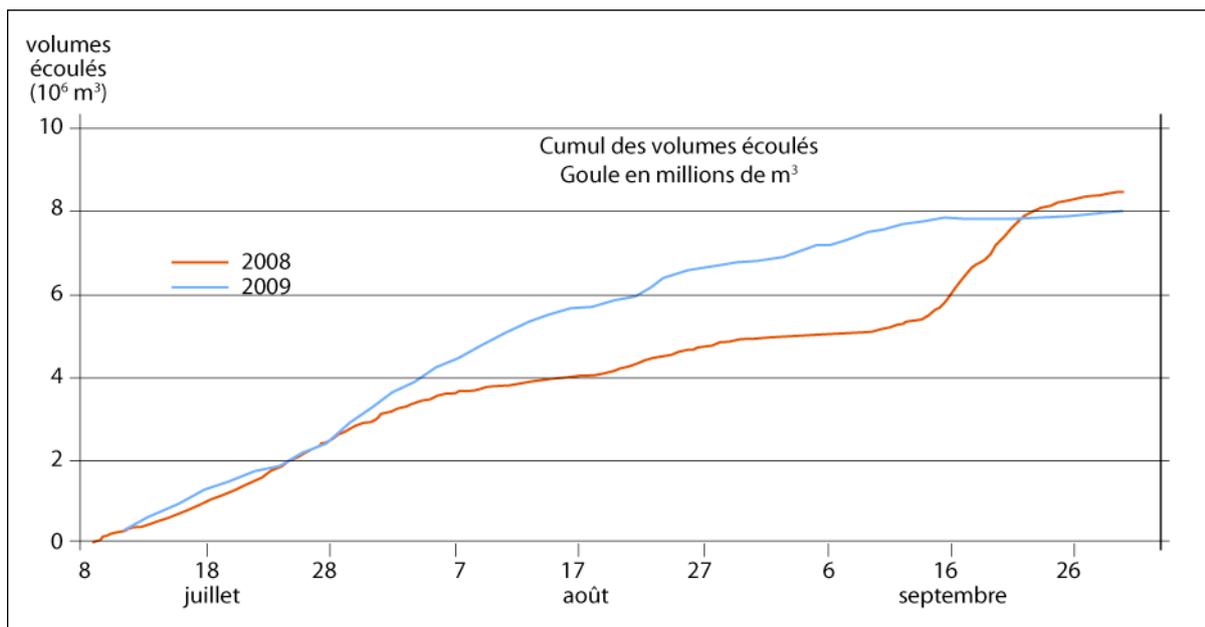


Figure 25 - Cumul des volumes écoulés de la Goule : été 2008, été 2009. L'été 2010 serait à l'image de l'été 2008. Pour des raisons de clarté, les données de 2007 et de 2010 n'ont pas été reportées dans ce diagramme.

La crue pluviale enregistrée en automne 2008 a été riche d'enseignement. C'est la crue la plus brutale et la plus importante des 4 dernières années. Elle a roulé en quelques jours 40 % des volumes écoulés de l'été (Fig. 26). La Goule qui draine le glacier a réagi immédiatement aux pluies importantes accélérant la fonte de la neige résiduelle et de la glace sur le glacier, tandis que le Diable, déconnecté du glacier, n'a pas réagi, la moraine se gorgeant d'eau jusqu'à saturation.

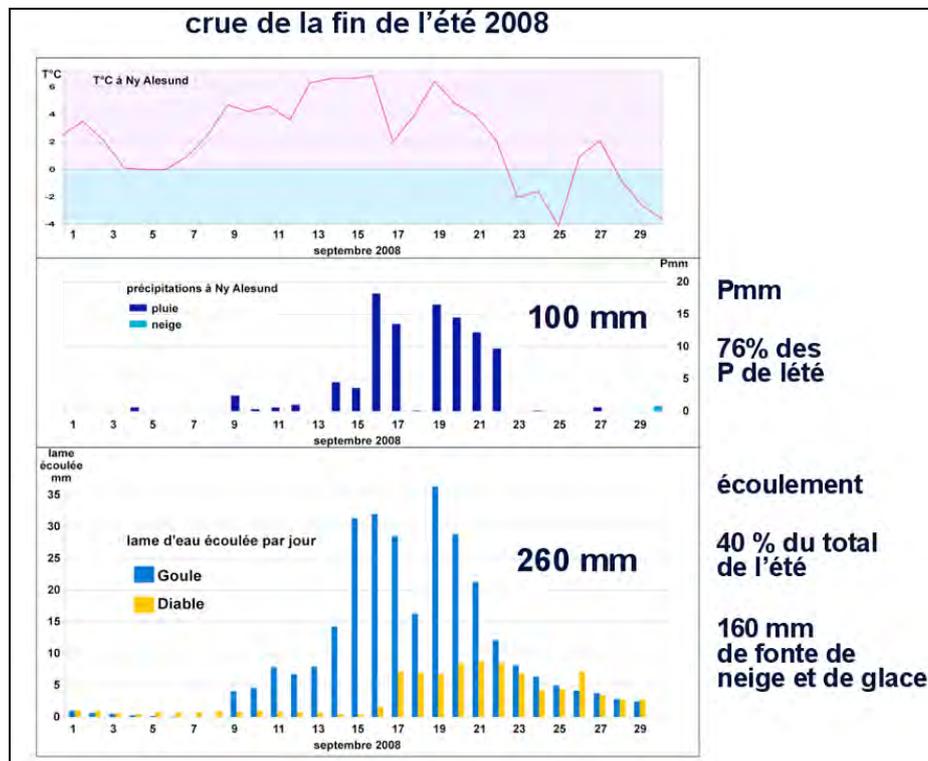


Figure 26 – Crue de la fin de l'été 2008

Pendant cette crue, le glacier a été totalement lessivé, la ligne d'équilibre très basse en début septembre remontant de 150 m et le bilan glaciologique jusqu'alors positif devenant négatif en quelques jours (Fig. 27).

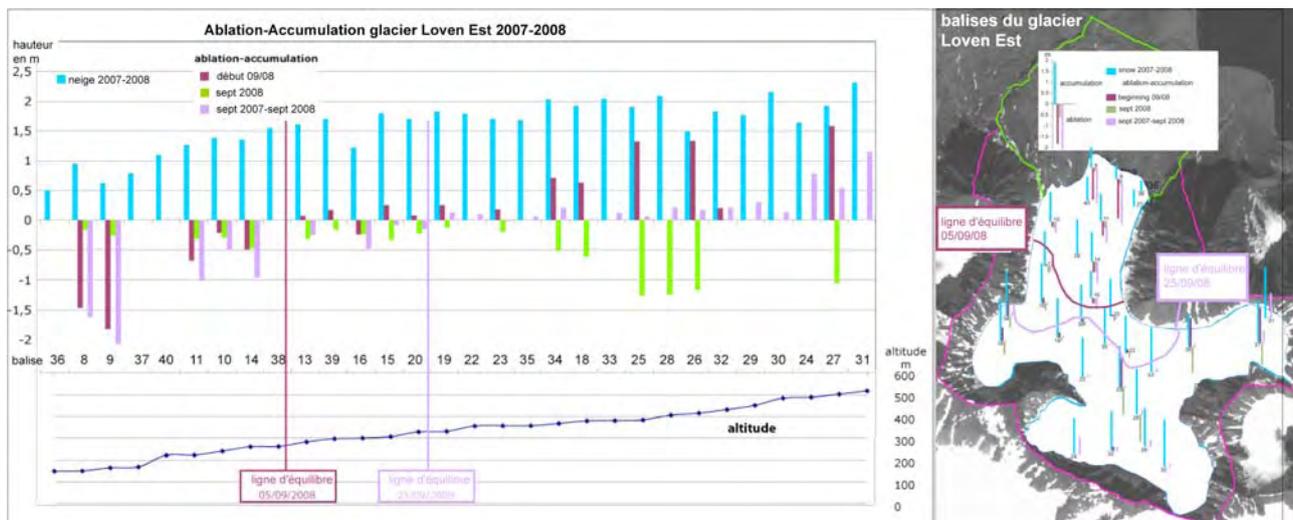


Figure 27 – Remontée de la ligne d'équilibre et bouleversement du bilan glaciologique suite à la crue soudaine de l'automne 2009

En complément, la chimie de l'eau apporte des outils pour discuter de l'origine des eaux d'écoulement. La minéralisation de l'eau, représentée en figure 28 par la conductivité électrique, montre clairement 3 périodes : avant le 15 juin, du 15 juin au 3 septembre, pendant et après le 3 septembre. De mi-juin à début septembre, la fonte contrôle la minéralisation de l'eau écoulée et l'impact des crues est visible. Les eaux du cœur de l'été sont de ce fait peu minéralisées (<200 $\mu\text{S}/\text{cm}$). En début et fin de saison, on note la présence d'une eau plus minéralisée (jusqu'à 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) montrant la présence d'eau d'écoulement plus lent à travers les formations encaissantes. Les analyses chimiques en ions majeurs montrent des eaux à faciès sulfaté calcique et légèrement magnésien. La dominance des ions sulfates dans les eaux est surprenante et encore mal expliquée. Nos investigations géologiques ainsi que des analyses en laboratoire (minéralogie par DRX et observations au MEB couplé à l'analyse chimique EDX - UMR IDES) ont montré que deux sources de minéraux soufrés existent sur le bassin mais ces minéraux ne constituent pas des affleurements importants : micro-cristaux de pyrite disséminés dans les sédiments morainiques et la jarosite (sulfate de fer et de

potassium formant des placages jaunâtres sur certains blocs de la moraine). Des analyses en soufre-34 et oxygène-18 des sulfates sont en cours.

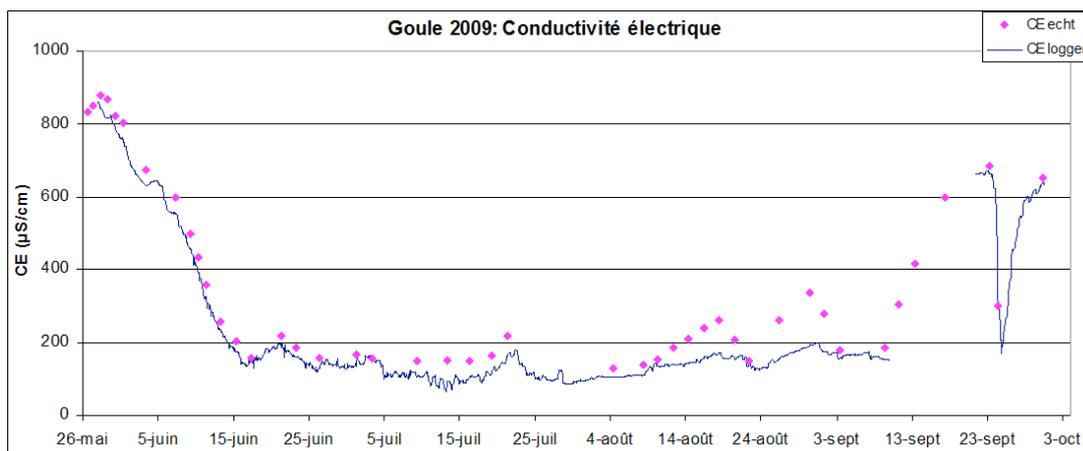


Figure 28 – Conductivité électrique mesurée sur les eaux de la Goule durant l'été 2009.

Les points indiquent des mesures ponctuelles de vérification faite en parallèle des mesures en continu fournies par une sonde multiparamètres (courbe). L'interruption de la courbe est due à un problème d'enregistreur au début de la reprise en gel.

Les mesures isotopiques ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) indiquent toutefois que ces eaux minéralisées, de début et fin de saison, ne proviennent pas de la même source (Fig. 29). En effet, les eaux minéralisées de la période avant le 15 juin sont significativement appauvries ($\delta^{18}\text{O} \approx -14$ à $14,5\text{‰}$) par rapport à celles de septembre ($\delta^{18}\text{O} \approx -12,5\text{‰}$).

L'évolution conjointe chimique et isotopique au cours d'une année hydrologique se fait suivant la flèche indiquée sur la figure 30. Les eaux minéralisées proviendraient de deux sources :

- contribution d'eau de sources d'eau souterraines pérennes « profondes » appauvries en ^{18}O en début de saison hydrologique. Certaines de ces sources pérennes forment sur le bassin des marges glacées (*icings*) particulièrement visibles au printemps par la formation de glace de regel dans le lit des cours d'eau. Les eaux de ces sources sont appauvries en raison de leur altitude de recharge (probablement le haut du bassin versant au-delà de 500 m d'altitude).
- contribution d'eau de la nappe supra-pergélisol (eaux de la moraine) en fin de saison hydrologique. Cette nappe provient de la fonte de la couche active et du pergélisol mais aussi d'une recharge par les eaux de fonte de la neige (début de l'été) et de l'eau de pluie infiltrée. Ces eaux sont plus enrichies car elles proviennent de précipitations de basse altitude (<50 m).

Ce modèle est corroboré par les données chimiques élémentaires. Par exemple, les données HCO_3^- et Sr^{2+} présentées sur la figure 31 montrent clairement ce changement de sources d'eau de la Goule au cours du mois de juin, entre début de la saison hydrologique et fin de saison. La participation des écoulements d'eau provenant des réservoirs profonds (sous-glaciaires ou souterrains) se démontre aussi en utilisation des méthodes statistiques. La courbe d'auto-corrélation du débit (exemple de l'été 2009) est présentée en figure 32. La perte de corrélation indiquée par une baisse du coefficient de corrélation en fonction du décalage du temps est relativement faible. Ce coefficient reste en effet élevé (0,5) même avec un décalage d'une semaine. Cela indique que le comportement de la Goule n'est pas impulsif et qu'un stock important d'eau tamponne le système et contribue assez lentement au débit de ce cours d'eau glaciaire.

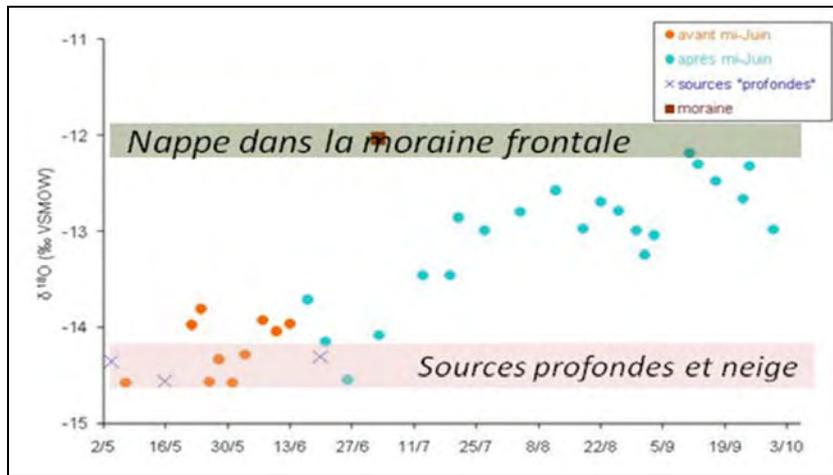


Fig. 29 – Suivi temporel des teneurs en oxygène 18 des eaux de la Gouale (été 2009).

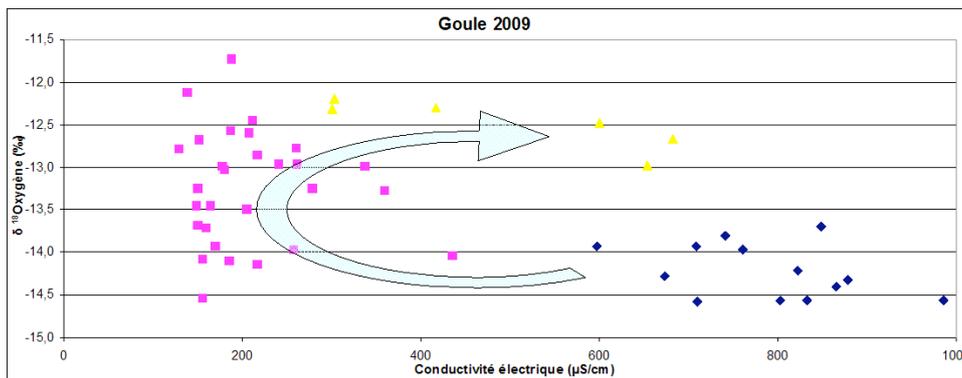


Figure 30 – Relations en teneurs en ^{18}O et minéralisation des eaux (via la conductivité électrique) des eaux de la rivière Gouale (saison 2009).

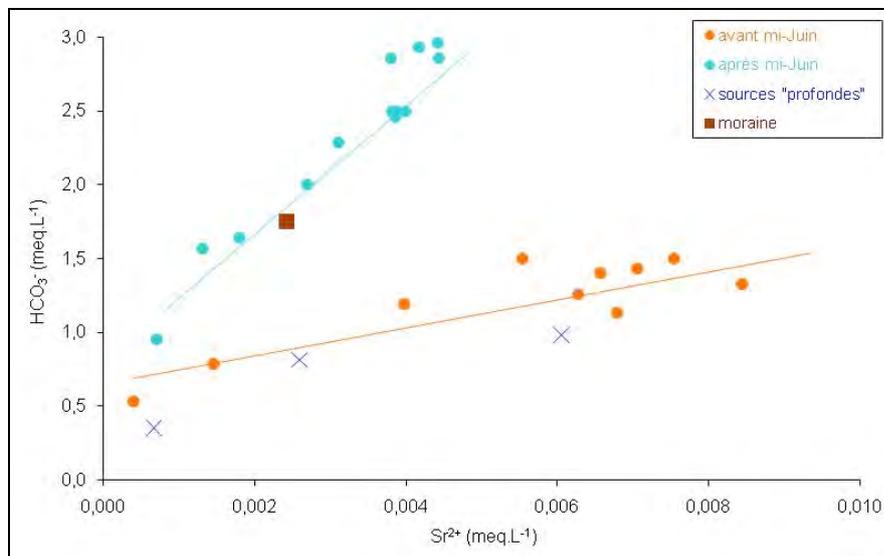


Figure 31 – Relations en teneurs en Sr^{2+} et HCO_3^- des eaux des eaux de la rivière Gouale (saison 2009). Les eaux de début et de fin de saison diffèrent par leur rapport HCO_3^-/Sr . En début de saison, le rapport est similaire à celui des sources profondes alors qu'en fin de saison le rapport est similaire à celui des eaux souterraines « profondes » (croix bleues) de la moraine (carré marron).

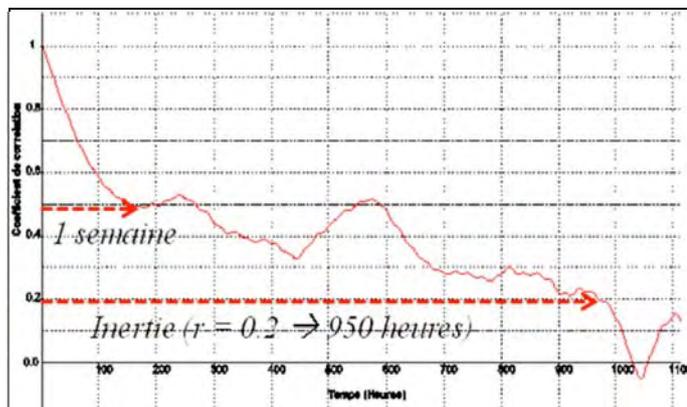


Figure 32 – Autocorrélogramme des débits de la Goule (été 2009). La perte de corrélation indiquée par une baisse du coefficient de corrélation (r sur l'axe des y) en fonction du décalage du temps est relativement faible. Ce coefficient reste élevé (0,5) même avec un décalage de 1 semaine. Cela indique que le comportement de la Goule n'est pas impulsif et qu'un stock important d'eau et « profond » contribue au débit de ce cours d'eau glaciaire (moraine, réservoir sous-glaciaire, eaux souterraines).

3.3. Rivière Diable : exutoire secondaire drainant une partie de la moraine frontale

Le bassin du Loven Est intègre un sous-bassin, drainé par la rivière Diable, non relié au glacier. Son comportement hydrologique ne dépend donc que des pluies, de la décharge de la nappe supra-pergélisol, de la fonte du pergélisol et de la neige dans la moraine (Fig. 33 *versus* Fig. 21). Son étude permet de mieux comprendre le rôle de la moraine (avec trois compartiments : la neige, la nappe supra-pergélisol et le pergélisol même) dans les écoulements

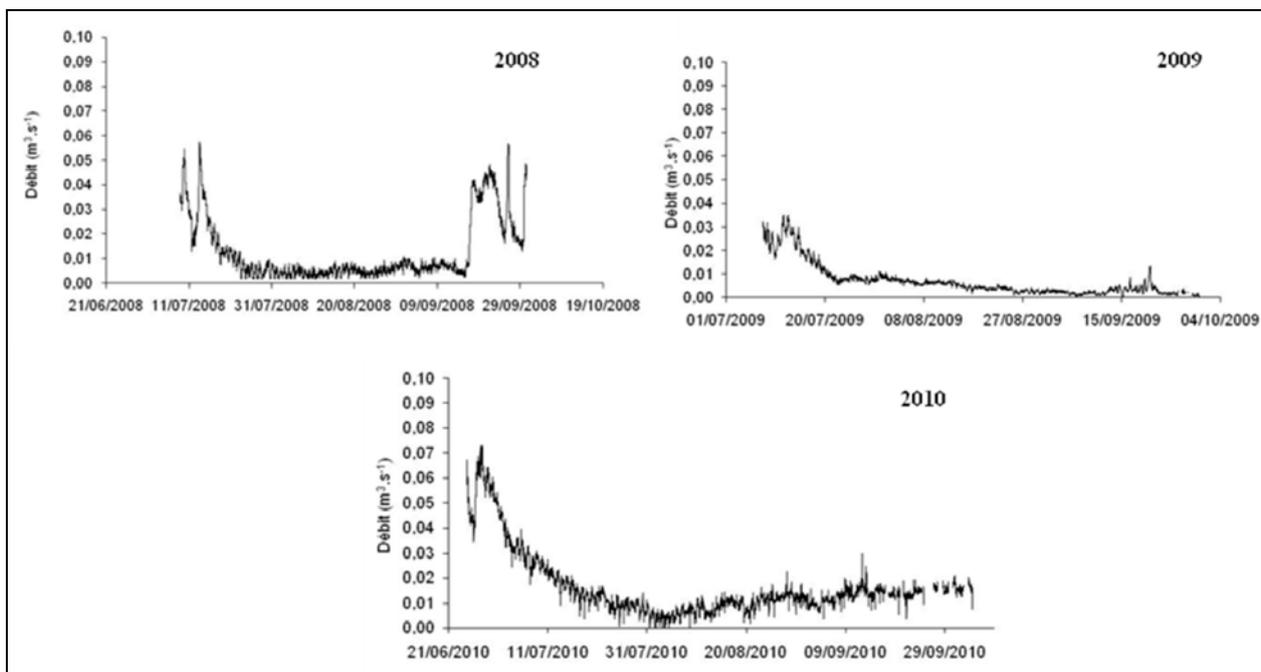


Figure 33 – Suivi du débit du Diable durant les étés 2008, 2009 et 2010 (ce cours d'eau secondaire n'était pas suivi avant 2008)

Les débits mesurés sont nettement inférieurs à ceux de l'exutoire principal du BV (Fig. 33) avec des valeurs, n'excédant généralement pas $0,05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Le Diable influence peu le bilan hydrologique. Ses débits sont relativement constants et ne reflètent pas directement les variations climatiques (Fig. 34 et 35), tamponnées par infiltration dans l'aquifère morainique et restituées sous forme d'écoulement basal. Aucune cyclicité n'a pu être mise en évidence sur les chroniques, ce qui démontre bien que la décharge d'eau de la moraine est faible, indépendante des conditions climatiques.

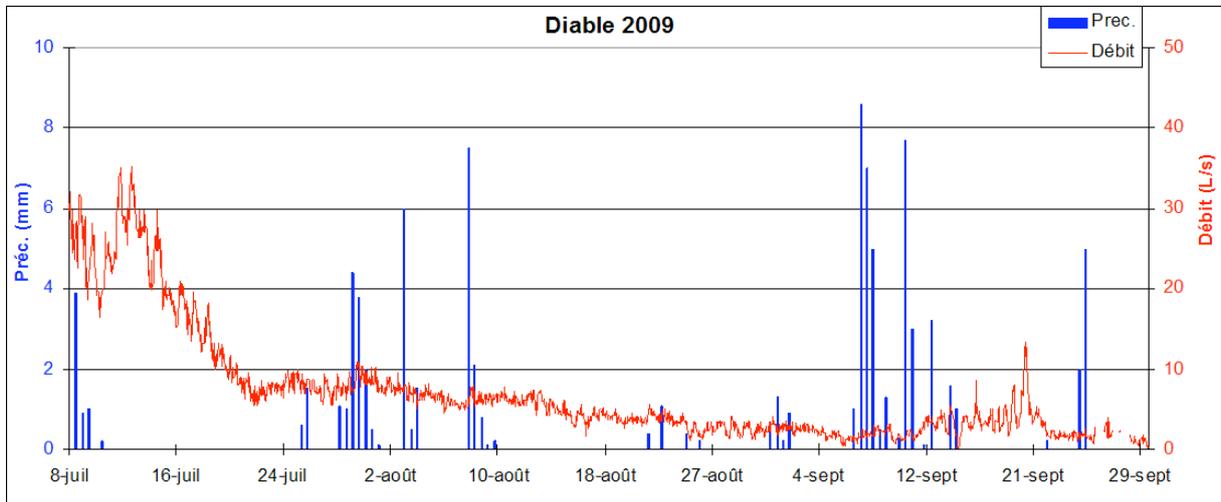


Figure 34– Chronique du Diable 2009 : précipitations et débit du cours d'eau

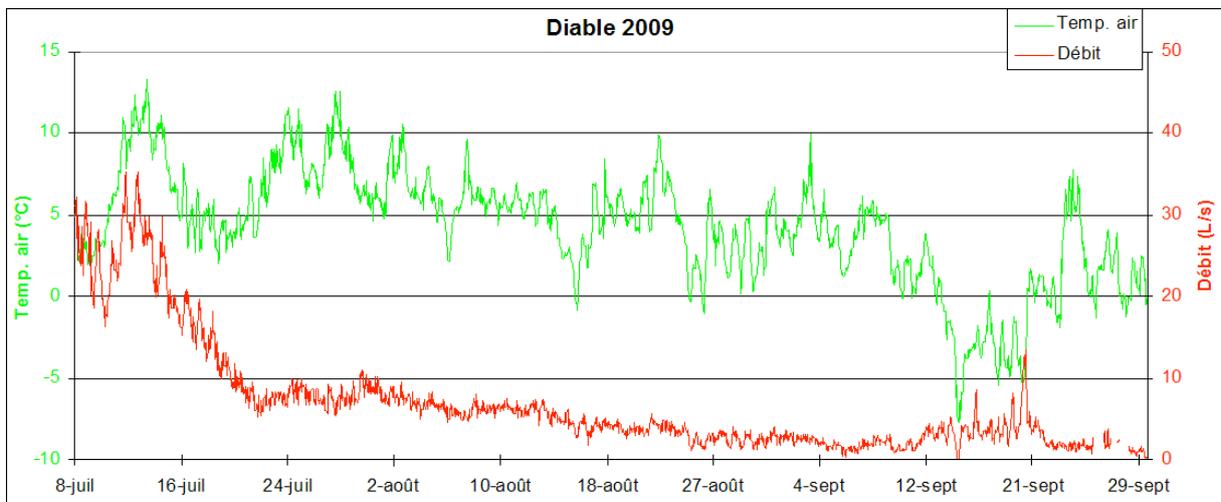


Figure 35 – Chronique du Diable 2009 : température de l'air et débit

La conductivité électrique montre également 3 périodes hydrologiques bien marquées, avec un début et une fin de saison caractérisée par des eaux minéralisées, mais d'origines différentes, comme le montre l'indicateur Oxygène 18 (Fig. 36 et 37).

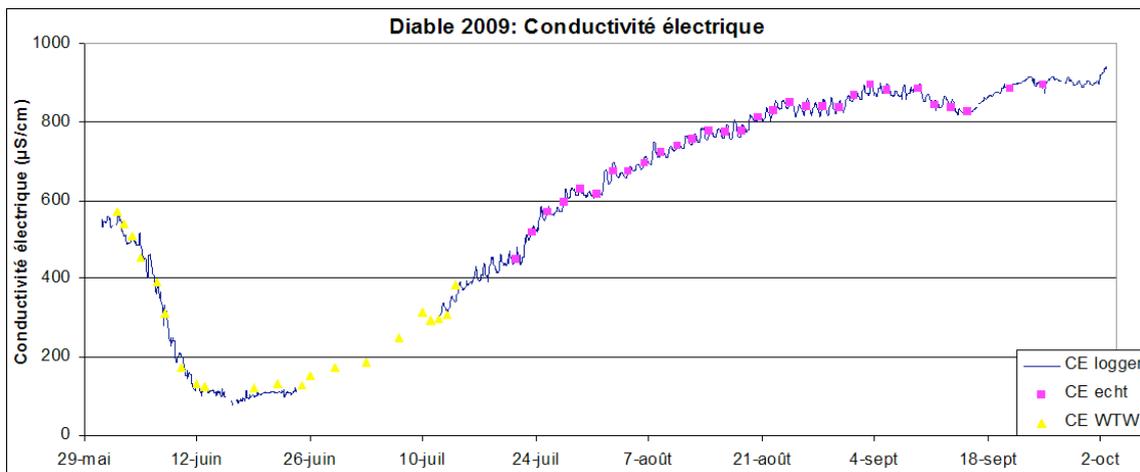


Figure 36 – Chronique conductivité électrique (en continu et par mesures ponctuelles) obtenue sur les eaux de la rivière Diable (été 2009).

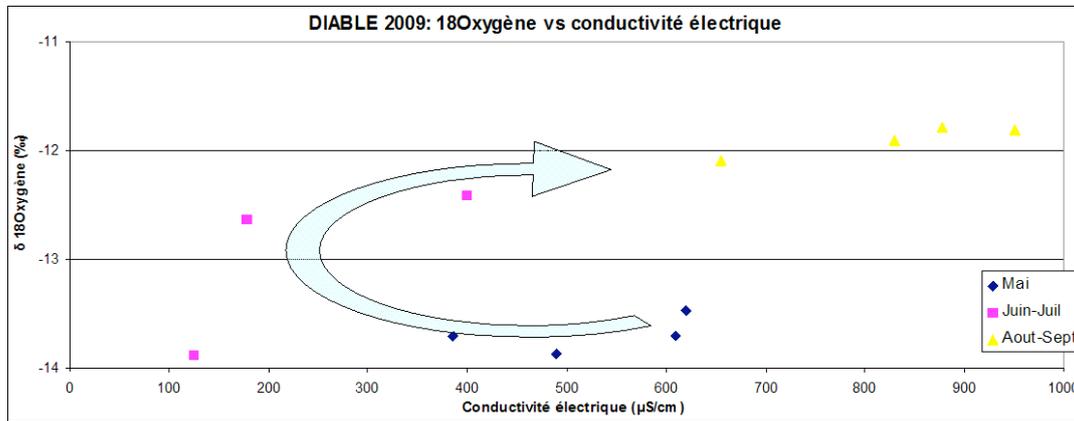


Figure 37 – Teneur en Oxygène-18 vs conductivité électrique (eaux de la rivière Diable, été 2009)

4. La géomatique pour quantifier la réaction du glacier aux changements climatiques

De nombreuses communications et publications concernent la réaction du glacier aux changements climatiques et la géomatique comme outil de l'évaluation des changements [1, 2, 3b, 11, 17, 35]

4.1. Les bilans de masse : accumulation-ablation

Les mesures sur les balises d'ablation/accumulation donnent avec précision la variation annuelle en épaisseur du glacier : nous avons effectué au total en fin de programme trois bilans glaciologiques par mesures physiques aux balises implantées depuis fin 2007, mesures qui seront mises en relation avec les différences entre les MNT acquis au DGPS en 2007 et 2010., le tout corrigé par la prise en compte de la couverture neigeuse et de son évolution grâce aux carottages de neige qui ont été effectués au printemps et en été (fig 38).

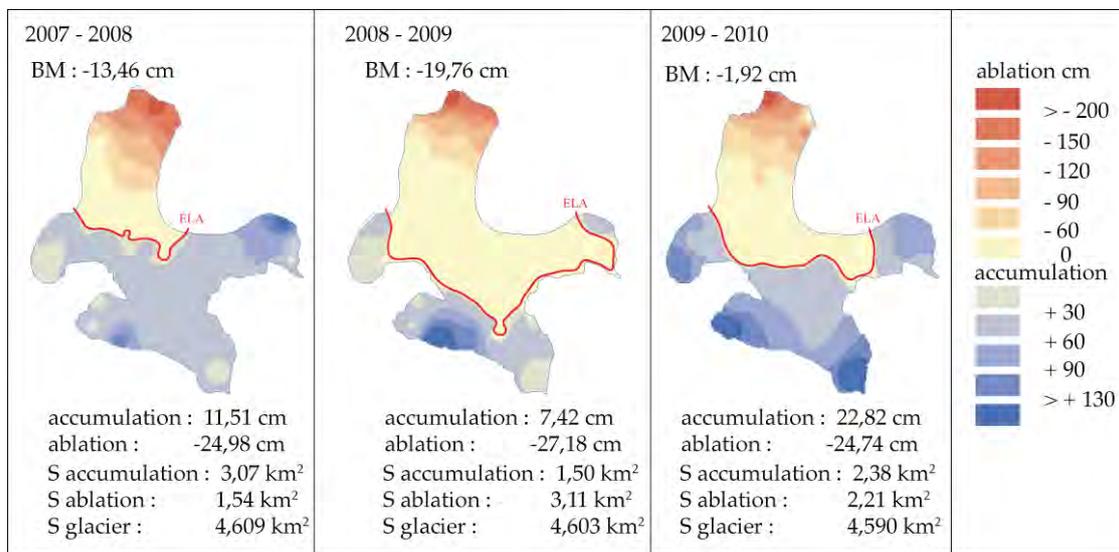


Figure 38 – Bilan glaciologique annuel du Loven Est 2007-2008, 2008-2009 2009-2010.

Mesures aux 45 balises interpolées par IDW à l'ensemble du glacier

Les valeurs de bilan de masse (BM) d'accumulation et d'ablation sont rapportées à la surface globale du glacier

Si on reprend les figures des températures de l'air à Ny Alesund (p. 8 et 9), on se rend compte que les bilans de masse sont peu reliés aux températures de l'air ; l'année la plus chaude du programme (2009-2010) présente le bilan le plus faible. En revanche, le Loven Est est très soumis aux précipitations pluvieuses estivales, comme hivernales, pour leur effet à la fois caloporteur et vecteur d'écoulement. L'exploitation approfondie des données en liaison avec l'état thermique du bassin, les précipitations effectivement reçues et leur qualité (neige/pluie) aux différentes altitudes nous éclairera sur ces trois bilans pour le moins contrastés.

Au total pour les 3 années de mesures aux balises implantées fin 2007, le glacier présente un bilan négatif de -46 cm correspondant à une ablation de 72 cm non compensée par une accumulation de 26 cm. Au front du glacier, l'ablation record mesurée est de -5,93 m. L'accumulation n'est effective que dans les cirques où le

record sur 3 ans est de 3,43 m, dû aux avalanches (fig. 39).

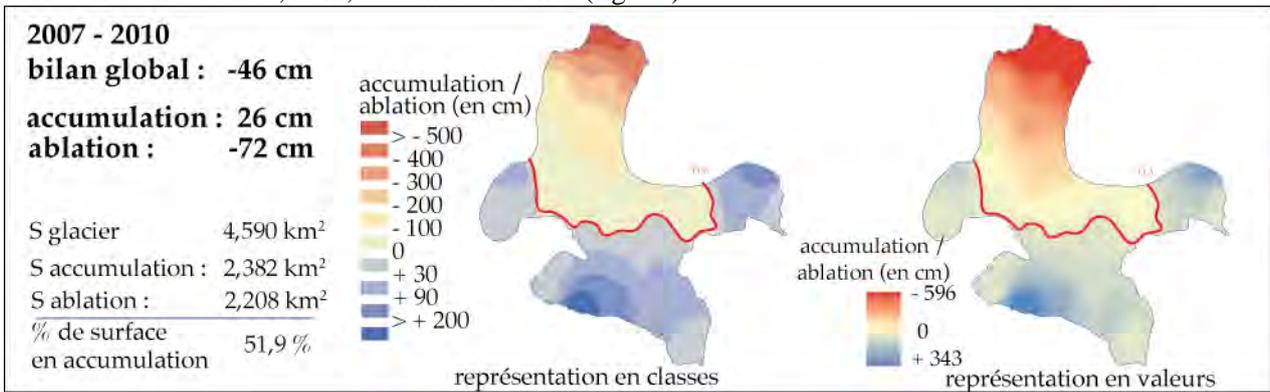


Figure 39 – Bilan de masse cumulé sur 3 ans (2007-2010) du glacier Loven Est

4.2. Front et altitude de surface glacier

- Le front du glacier

Depuis 2007, nous mesurons sur le terrain et sur les images satellite la position du front du glacier (fig. 40)). Si le recul n'est pas très important d'une année sur l'autre, aux limites de la marge d'erreur des GPS, il est intéressant de le mettre en relation avec le retrait visible sur les photos aériennes depuis 1948 (cf § 4.4, p. 29).

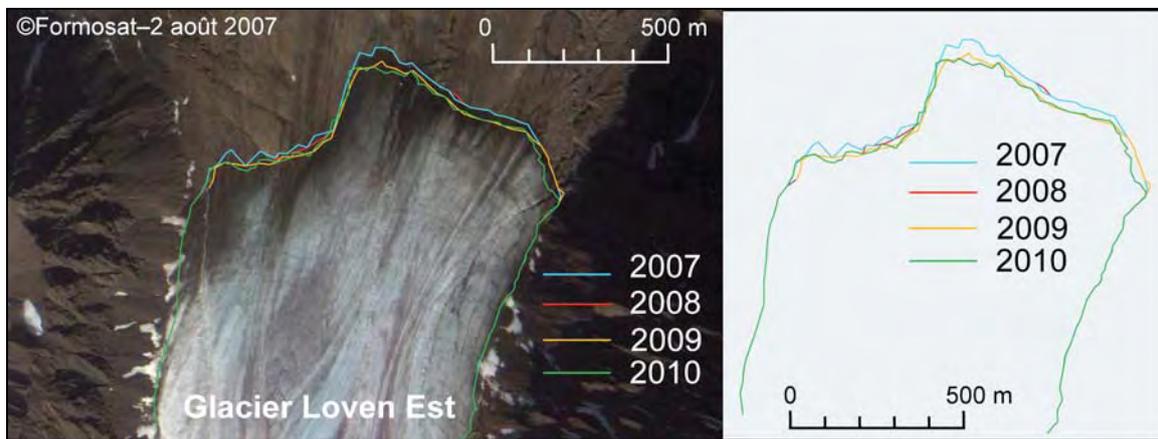


Figure 40 – Position du front du glacier Loven Est depuis 2007, mesures effectuées fin septembre chaque année

- L'altitude de la surface du glacier : levé de notre propre MNT

Depuis 2007, nous réalisons en avril et en septembre des mesures au GPS et DGPS afin d'établir un MNT fiable et actualisé du glacier. Ce MNT a été achevé lors de la mission d'avril 2010 (Fig. 41).

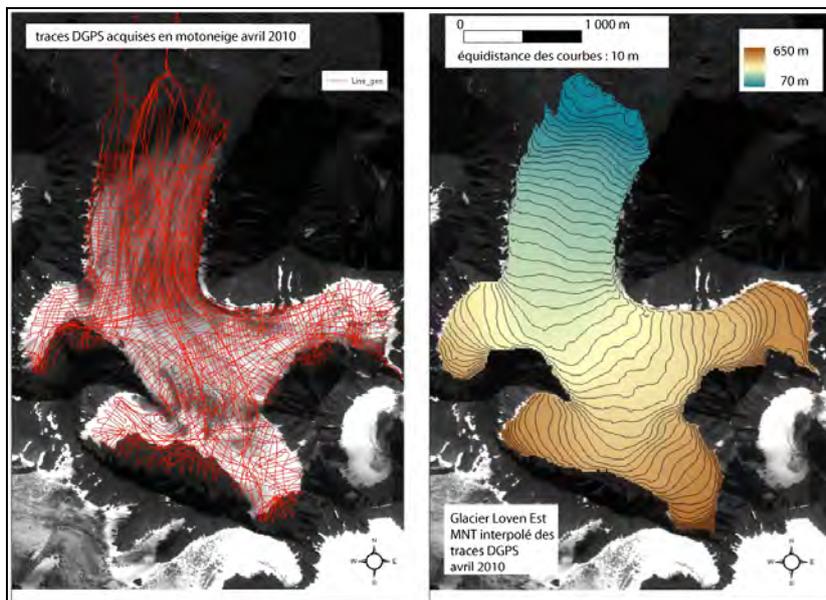


Figure 41 – MNT du glacier Loven Est réalisé en 2010 par GPS différentiel ancré sur motoneige (50 000 points)

4.3. GPR et géomatique pour cartographier le lit rocheux

Grâce à une implication du FEMTO-ST à nos côtés sur le terrain, les investigations au GPR conduites en 2009 et conjointement avec une radariste de l'UMR IDES en 2010 nous ont permis de réaliser une couverture complète du glacier d'où nous pourrions tirer (après traitement des données acquises) une cartographie du lit du glacier. Une collaboration avec les glaciologues de l'université de Swansea permettra de tirer le meilleur profit des radargrammes obtenus en ce qui concerne la structure profonde et interne du glacier, la présence d'eau et de chenaux, la détection des zones de glace tempérée (0°C) faisant de ce glacier un glacier polythermal (Fig. 42).



Figure 42 - Investigations au GPR sur le glacier Loven Est : un exemple de transect faisant apparaître l'interface glace-roche permettant d'établir la cartographie du lit rocheux

Le profil est-ouest, donné à titre d'exemple, montre clairement la position de l'interface glace-roche et permet d'estimer l'épaisseur du glacier (120 m) ainsi que la nature de cet interface (glace, glace tempérée à la limite de la fonte, débris rocheux). Il est possible de démontrer dans le cas de l'Austrelovenbreen que l'eau liquide qui s'écoule en permanence au front du glacier, été comme hiver, ne semble pas être stockée dans les cirques du glacier mais plutôt au fond du glacier au niveau de la ligne centrale, à l'endroit où de la glace dite tempérée (i.e. à isotherme 0°C), semble visible. Sur le profil donné en exemple fig 42, les hyperboles visibles dans la glace du glacier (entre les coordonnées 1 300 et 1 400 m) témoignent de la présence de

cavités dans la glace (réseau de drainage intra-glaciaire, sans eau puisque le profil a été établi en hiver).

4.4. Variation en 2D et 3D du glacier

Un gros travail de géomatique a été nécessaire pour pouvoir comparer les altitudes des MNT de 1964, 1995 et 2007, ainsi que nos propres enregistrements au DGPS. Nous avons défini la variation en 2D et 3D du glacier (Fig. 43 et 44). Nos premières estimations de la cartographie du lit rocheux (traitements en cours, fig 45), nous permettent de déduire que depuis 1964 le glacier a perdu un tiers de son volume et 20 % depuis 1995, montrant une accélération dans le processus de fonte en accord avec les résultats présentés par J. Kolher, JO Hagen, J. Jania et autres collègues sur différents glaciers du Spitsberg (cf publication MOCA09 [20], Pan-Svalbard[19]). Cette étude de la variation 2D-3D du glacier Loven Est fait l'objet de la communication que nous terminons pour le *Canadian Journal of Remote Sensing* [3b]).

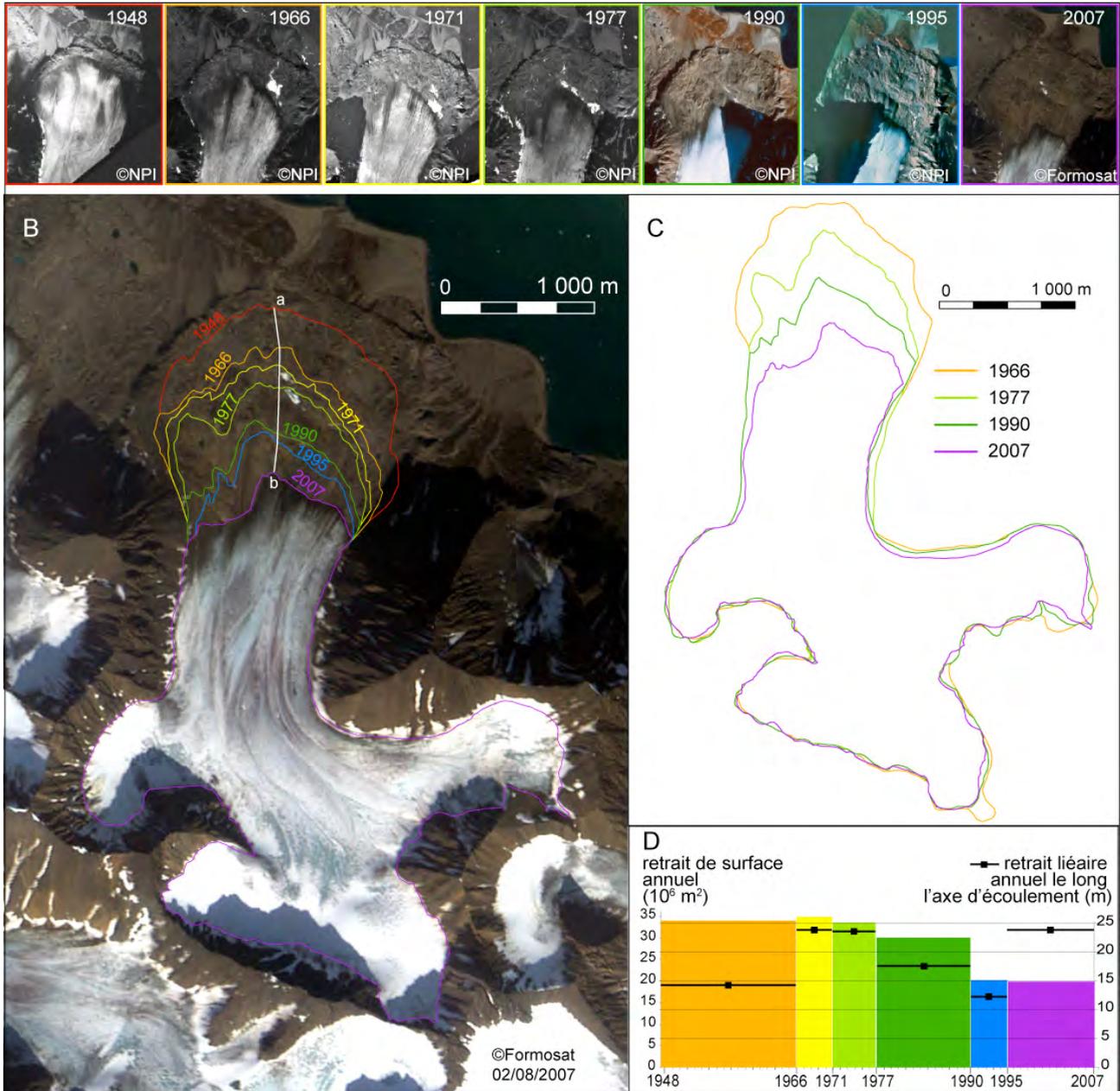


Figure 43 – Variation en surface au front du glacier Loven Est depuis 1948
 Le recul du front dans l'axe (profil a-b) montre un retrait de 1 090 m entre 1948 et 2007
 Le Loven Est en 2007 ($4,6 \text{ km}^2$) représente 73 % de sa surface de 1948 ($6,3 \text{ km}^2$)

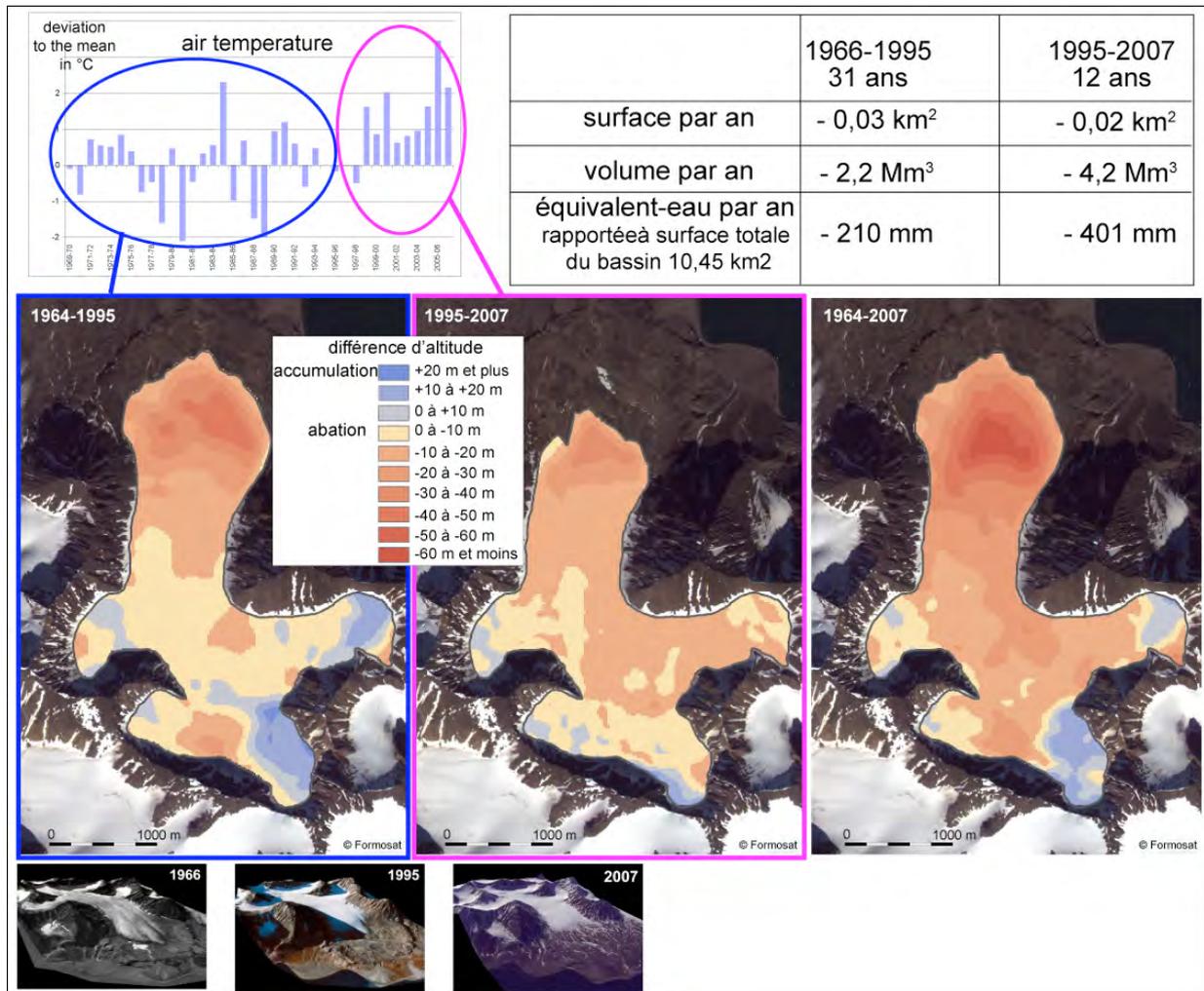


Figure 44 – Variation en 2D et 3D du glacier Loven Est entre 1966, 1995 et 2007
 Annuellement : perte en surface un tiers moins importante les 12 dernières années
 pour perte en volume double de celle des 31 premières années

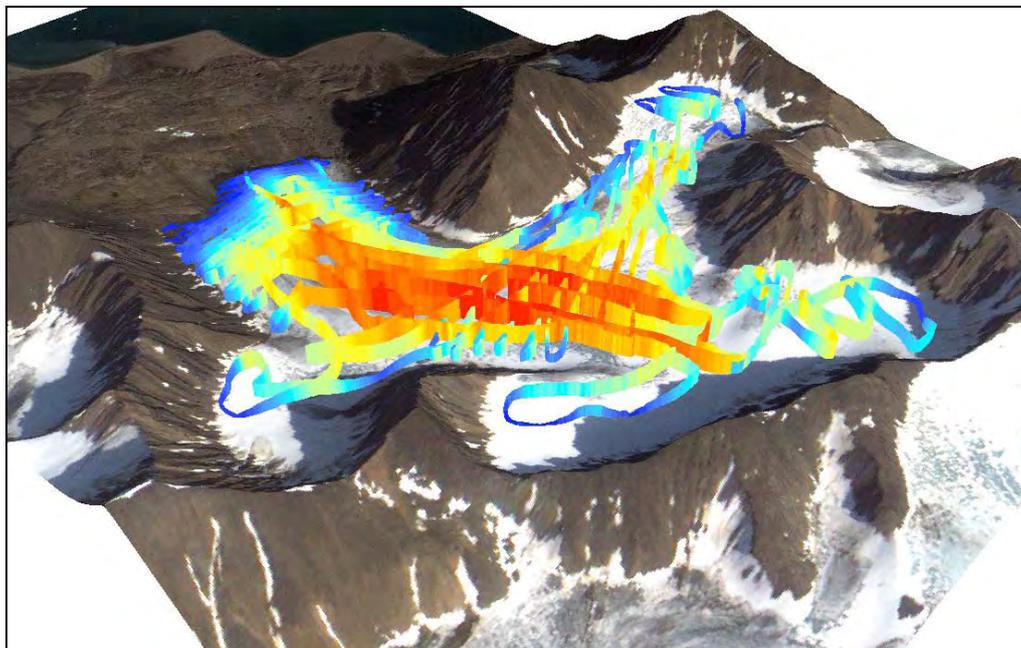


Figure 45 – Traces GPR 2010 et épaisseur de glace dont sera interpolée la cartographie du lit rocheux du Loven Est

De nombreuses communications à congrès internationaux font état de nos premiers résultats (voir bibliographie du programme en annexe). Il nous fallait attendre des résultats sur plusieurs années pour aborder les publications papier dont trois seront soumises avant la fin 2010 et 5 sont en préparation.

CONCLUSION

Ce bilan final établi moins de trois mois après le retour de la dernière mission de terrain du programme est à prendre comme tel, à savoir souvent préliminaire au niveau du traitement et de l'exploitation des masses de données accumulées. Nous avons dans ce rapport fait état des toutes dernières avancées du programme, des résultats acquis y compris lors des trois missions de 2010. Beaucoup de verrous ont sauté ; s'ils ont la demande initiale sous les yeux, nos évaluateurs noteront d'eux mêmes que nous avons, et de beaucoup, dépassé les objectifs prévus.

L'implication FEMTO-ST a été bien au-delà de ce qui était initialement prévu, notamment sa participation active en ce qui concerne les mesures au GPR (GPR récupéré et réparé par le FEMTO-ST et participation d'un membre du FEMTO-ST à quatre missions).

En découlera la cartographie du lit rocheux du glacier. Ce qui au départ devait être réalisé par le partenaire allemand qui s'est désisté.

On notera aussi, tout au long de ces années une étroite collaboration entre les partenaires français en ce qui concerne le traitement des données, les communications et publications. Il s'agit vraiment d'un travail très coopératif dans la totale interdisciplinarité entre les géographes (ThéMA, SET), les hydrogéologues/hydrochimistes et géophysiciens (IDES) et les sciences de l'ingénieur (FEMTO-ST).

Le fait d'avoir deux doctorants a considérablement aidé à l'avancée du programme, ce dont nous ne pouvons que nous satisfaire.

Nous continuons à déplorer le fait que la participation des chercheurs étrangers ne soit pas à la hauteur des engagements pris à l'origine :

- désengagement des chercheurs russes faute de financement
- désengagement total de G. Schwamborn (Allemagne), engagé dans un programme en Sibérie.
- peu de nouvelles des Espagnols mais nous sommes désormais autonomes sur le plan de l'enregistrement des hauteurs d'eau, courbes de tarage et débits aux émissaires.

Ce programme était à l'honneur lors de l'ouverture de l'année polaire puisque nous étions parmi les 7 chercheurs invités à présenter leur projet lors de la conférence d'ouverture de l'année polaire [54].

Nous dirons aussi notre satisfaction d'avoir été acceptés pour communiquer aux très gros congrès faisant suite à l'année polaire internationale (Copenhague en mars 2009 [23, 24], MOCA Montréal en juillet 2009 [20, 22], Oslo en juin 2010 [15, 16, 17]) où nous étions parmi les rares Français.

Nous avons assuré l'ouverture du Workshop AWIPEV de Brême (octobre 2008 [25]) et étions conférencier invités pour le Keynote d'ouverture du Nysmac seminar de Cambridge (2007 [29]), invités aussi pour le congrès Pan-Svalbard [19] (international mais très fermé) qui réunissait (en août 2009) 10 atmosphériciens, 10 glaciologues, 10 managers ... une belle reconnaissance à l'international.

Lors de ce dernier congrès, une collaboration très intéressante s'est développée avec une glaciologue de l'université de Swansea (UK) spécialiste du GPR. Elle est venue en France comme professeur invitée à l'université d'Orsay (IDES) dans le cadre du programme HSF : ce fut l'occasion d'exploiter en commun nos données GPR acquises sur le Loven Est et d'en tirer plus amples données que la simple interface glace-lit rocheux. C'est en collaboration avec cette glaciologue expérimentée en radar que nous exploiterons les données GPR acquises en avril 2010.

Le programme Sensor-FLOWS est arrivé à son terme. Les capteurs et balises en place sont désormais tout à fait opérationnels et peuvent fonctionner 20 ans. De même pour le réseau de capteurs de température de l'air, la station météo placée sur une barre rocheuse en haut du glacier ainsi que les stations hydrologiques. C'est sur le long terme qu'il est intéressant de suivre les glaciers et le permafrost. C'est pourquoi nous avons proposé en prolongement du programme ANR Sensor-Flows, le programme ANR Cryo-Sensor qui a été accepté et débute en novembre 2010 pour étendre au permafrost l'étude de la réaction aux changements climatiques contemporains en Arctique.

C.3 REUNIONS DU CONSORTIUM (SI APPLICABLE)

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
Décembre 08	Orsay	IDES (1) et ThéMA (1)	Préparation programme missions 2009 et communications Copenhague
Février 09	Besançon	IDES (1) et ThéMA (1)	Préparation communications Copenhague
Mars 09	Copenhague	IDES (1) et ThéMA (1)	Préparation programme missions 2009
Avril 09	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (1) SET (1) et FEMTO-ST (2)	Lors des missions (2 à 3 semaines en commun) au Spitsberg, travail en commun sur terrain et exploitation des

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
			données plus préparation des communications et publications
sept 09	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (1) SET (1) et FEMTO-ST (2)	Lors des missions (2 à 3 semaines en commun) au Spitsberg, travail en commun sur terrain et exploitation des données plus préparation des communications et publications
Septembre 09	Orsay	IDES (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation campagne GPR
Octobre 09	Besançon	ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Exploitation données des caméras automatique et publications communes aux 2 partenaires
novembre 09	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation campagne GPR
décembre 09	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation campagne GPR
janvier 2010	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation campagne GPR et mission 2010
février 2010	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) SET pau (1) et FEMTO-ST (2) + univ Swansea UK	Rencontre entre partenaire ANR et collègues université de Swansea pour échange en ce qui concerne les investigations GPR
Octobre 2010	Besançon	IDES (1) ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation rapport final ANR
Novembre 2010	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) SET (1) et FEMTO-ST (2)	Rédaction rapport final ANR

Nous n'avons plus traces des réunions entre partenaires de l'année 2007 (non demandé au rapport 2007), mais cette année avait été riche en réunion entre partenaire 1 et 2 en vue de la préparation des stations photo automatique. Le partenaire 2 avait participer en plus à la mission d'avril 2007. De nombreuses réunions avait eu lieu aussi entre les membres partenaire 1 (ThéMA, IDES, SET) tout au long de l'année 2007.

A noter de plus que les missions au Spitsberg sont l'occasion de réunir les partenaires pour plusieurs semaines de travail en commun et permettent, sur place, une excellente collaboration scientifique (exploitation des données, préparation des communications et publications, développement de projets) en plus du travail sur le terrain lui-même.

ThéMA et FEMTO-ST étant dans la même ville il nous est facile et courant de nous rencontrer à Besançon.

Au sein des partenaires 1 les membres des trois UMR concernées (ThéMA, IDES, SET) se rencontrent très souvent aussi ; les congrès en commun sont également l'occasion de nous retrouver pour travailler ensemble. Toutes nos communications sont communes, ce qui suppose de nombreux échanges également.

C.4 COMMENTAIRES LIBRES

Commentaire du coordinateur

Ce bilan final demandé par l'ANR fait état des toutes dernières avancées du programme, des résultats acquis y compris lors de cette mission de septembre 2010. Beaucoup de verrous ont sauté ; s'ils ont la demande initiale sous les yeux, nos évaluateurs noteront d'eux mêmes que nous avons, et de beaucoup, dépassé les objectifs prévus.

L'implication du partenaire 2 (FEMTO-ST) bien au-delà de ce qui était initialement prévu, notamment sa participation active en ce qui concerne les mesures au GPR (GPR récupéré et réparé par le FEMTO-ST et participation d'un membre du FEMTO-ST à quatre missions).

En découlera la cartographie du lit rocheux du glacier. Ce qui au départ devait être réalisé par le partenaire allemand qui s'est désisté.

On notera aussi, tout au long de ces années une étroite collaboration entre les 2 partenaires français en ce qui concerne le traitement des données, les communications et publications. Il s'agit vraiment d'un travail très coopératif dans la totale interdisciplinarité entre les géographes (ThéMA, SET), les hydrochimistes (IDES) (partenaire 1) et les sciences de l'ingénieur (FEMTO-ST, partenaire 2).

Le fait d'avoir deux doctorants (financés hors ANR) a considérablement aidé à l'avancée du programme, ce dont je ne peux que me satisfaire.

Je continue à déplorer le fait que la participation des chercheurs étrangers ne soit pas à la hauteur

des engagements pris à l'origine :

- désengagement des chercheurs russes faute de financement
- désengagement total de G. Schwamborn (Allemagne), engagé dans un programme en Sibérie.
- peu de nouvelles des Espagnols mais nous sommes désormais autonomes sur le plan de l'enregistrement des hauteurs d'eau, courbes de tarage et débits aux émissaires.

Je dirai aussi notre satisfaction d'avoir été acceptés pour communiquer aux très gros congrès faisant suite à l'année polaire internationale (Copenhague en mars 2009, MOCA Montréal en juillet 2009, Oslo en juin 2010) où nous étions parmi les rares Français.

Nous étions conférenciers invités pour l'ouverture du Workshop AWIPEV de Brême (octobre 2008) et invités aussi pour le congrès Pan-Svalbard (international mais très fermé) qui réunissait (en août 2009) 10 atmosphériciens, 10 glaciologues, 10 managers ... une belle reconnaissance à l'international.

Lors de ce dernier congrès, une collaboration très intéressante s'est développée avec une glaciologue de l'université de Swansea (UK) spécialiste du GPR. Elle est venue en France comme professeur invitée à l'université d'Orsay (IDES) dans le cadre de notre ANR : ce fut l'occasion d'exploiter en commun nos données GPR acquises sur le Loven Est et d'en tirer plus amples données que la simple interface glace-lit rocheux. C'est en collaboration avec cette glaciologue expérimentée en radar que nous exploiterons les données GPR acquises en ce mois d'avril 2010.

Le programme est arrivé à son terme. Les capteurs et balises en place sont désormais tout à fait opérationnels et peuvent fonctionner 20 ans. C'est sur le long terme qu'il est intéressant de suivre les glaciers et le permafrost. C'est pourquoi nous avons proposé en prolongement du programme Senso-Flows, le programme Cryo-Sensor pour étendre au permafrost la réaction aux changements climatiques contemporains en Arctique. Ce programme ANR Cryo-Sensor a été accepté, il n'y aura donc pas de rupture entre les deux programmes, même s'il ne sera financé qu'à 48 % de ce que l'on escomptait.

D IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT

Ce rapport rassemble des éléments cumulés depuis le début du projet qui seront suivis tout au long de l'avancée du projet et repris dans son bilan.

D.1 INDICATEURS D'IMPACT

Nombre de publications et de communications (à détailler en D.2)

Comptabiliser séparément les actions monopartenaire, impliquant un seul partenaire, et les actions multipartenaires résultant d'un travail en commun.

Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multipartenaires	Publications monopartentaires
International	Revue à comité de lecture	1 + 3 soumises + 3 en cours de rédaction	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	23 dont 3 invité ou keynote d'ouverture	
France	Revue à comité de lecture	1 + 1 soumise	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	12	
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation		11
	Autres		4

Autres valorisations scientifiques (à détailler en D.3)

Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
Brevets internationaux obtenus	
Brevet internationaux en cours d'obtention	
Brevets nationaux obtenus	
Brevet nationaux en cours d'obtention	
Licences d'exploitation (obtention / cession)	
Créations d'entreprises ou essaimage	
Nouveaux projets collaboratifs	
Colloques scientifiques	
Autres (préciser)	

D.2 LISTE DES PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section *Erreur ! Source du renvoi introuvable.* en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.

ANR Blan0310 : Hydro-Sensor-FLOWS

Liste complète des communications et des publications depuis le début du programme (novembre 2006 - novembre 2009)

International

• revues à comité de lecture

- [1] FRIEDT JM., RETORNAZ T., ALZUAGA S., BARON T., LAROCHE T., BALLANDRAS S., GRISELIN M., SIMONNET JP., (accepté septembre 2010) : Surface Acoustic Wave Devices as Passive Buried Sensors, *Journal of Applied Physics*
http://jmfriedt.free.fr/jap_gpr.pdf

soumise :

- [2] FRIEDT JM., LAFFLY D., BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., MARLIN Ch., 2010 : « Limits of using Digital Elevation Models to evaluate glacier mass balance: application to the Austre Lovénbreen (Spitsbergen, 79°N) », soumis à *Polar Record*, 15 p.
- [3] LAFFLY D., BERNARD E., FRIEDT JM., MARTIN G., MARLIN Ch., GRISELIN M., 2010 : « Snow cover monitoring using FORMOSAT satellite imaging and in situ sensing oblique view ground-based pictures », soumis à *Polar Record*, 15 p.
- [3b] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J-M., SCHWAMBORN G. et TOLLE F. (proposition acceptée) : « Austre Lovén Glacier variation in surface and volume (1964-2008) through remote sensing, DEM, maps and field measurements during the IPY program Hydro-Sensor-FLOWS », *Canadian Journal of Remote Sensing*, special issue "Remote Sensing Innovations During the International Polar Year", 10 p.

en cours de rédaction :

- [4] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., FRIEDT J.M., DELANGLE E., : « The influence of daily surface temperature on snow and ice melting. Austre Lovén glacier (Svalbard) », *Geographiska Annaler A*
- [5] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., FRIEDT J.M., DELANGLE E., : Seasonal snow cover dynamics and melting processes on a polar glacier, *Journal of glaciology*

[6] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., TOLLE F., DELANGLE E., FRIEDT J.M. : « The increase of warm events in winter, a process fatal to glaciers (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N) », *Journal of climatology*

• **ouvrages ou chapitres d'ouvrage**

• **communications (conférence)**

[7] MARLIN Ch. and GRISELIN M., 2011 : « Climate recent evolution observed in Svalbard (air temperature and precipitation): a focus on the last 40 years in Ny Alesund (79°N) », *International Conference Polar Worlds*, Paris 25-28 janvier 2011.

[8] BERNARD E., FRIEDT J.-M., MARTIN G., MOREAU L., D. LAFFLY D., CHRETIEN S., MARLIN Ch., GRISELIN M., 2011 : « Automated high resolution digital image acquisition and processing applied to polar glaciers », *International Conference Polar Worlds*, Paris 25-28 janvier 2011.

[9] DELANGLE E., MARLIN Ch., GRISELIN M., BERNARD E., LAFFLY D. et FRIEDT J.-M., 2011 : « Hydrological and geochemical response of a polar glacier facing the recent climate changes (Austrelovenbre, Svalbard, 79°N) », *International Conference Polar Worlds*, Paris 25-28 janvier 2011.

[10] TOLLE FL., BERNARD E., FRIEDT JM., LAFFLY D., MARLIN Ch., GRISELIN M. 2011 : « Seasonal snow cover dynamics and melting processes on a polar glacier », *International Conference Polar Worlds*, Paris 25-28 janvier 2011.

[11] FRIEDT JM., LAFFLY D., SAINTENOY A., BERNARD E., GRISELIN M., MARLIN Ch., 2010 : « Evaluating the Austre Lovénbreen (Svalbard) glacier ice volume, area and its bedrock topography using Ground Penetrating Radar and differential GPS measurements. », 11th International Circumpolar Remote Sensing Symposium, September 20-24, 2010, Cambridge, United Kingdom.
http://jmfriedt.free.fr/cambridge_2010.pdf

[12] LAFFLY D., BERNARD E., FRIEDT JM., MARTIN G., MARLIN Ch., GRISELIN M., 2010 : « Snow cover monitoring using combined FORMOSAT satellite imaging, oblique view ground-based pictures and snow drills (East Loven glacier, Spitsbergen, Svalbard) », 11th International Circumpolar Remote Sensing Symposium, September 20-24, 2010, Cambridge, United Kingdom.
http://jmfriedt.free.fr/Cambridge_laffly.pdf

[13] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D., and MARLIN Ch., 2010 : « Snowcover Survey of an Alpine Type Glacier in High Latitude (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N) », 14th Alpine Glaciology Meeting, 25-26.03.2010, Milano, Italy

[14] DELANGLE E., MARLIN Ch., GRISELIN M., LAFFLY D., BERNARD E., FRIEDT J.-M., 2010 : « Hydrochemical response of a polar glacier facing the recent climate changes (Austrelovenbre, Svalbard, 79°N) », *Third European Conference on Permafrost*, 13-17 June 2010, Longearbyen, Svalbard.

[15] BERNARD E., GRISELIN M., FRIEDT J.-M., TOLLE F., LAFFLY D., MARLIN Ch. and DELANGLE E. 4, 2010 : Monitoring snow cover dynamics on an arctic hydrosystem using field measurements, remote and in situ sensing (Austre Lovénbreen - Spitsberg 79°N), *IPY Oslo Science Conference 2010*, 8-12 June 2010, Oslo, Norway.

[16] DELANGLE E., MARLIN Ch., GRISELIN M., LAFFLY D., BERNARD E., FRIEDT J.-M., 2010 : « Hydrochemical response of a polar glacier facing the recent climate changes (Austrelovenbre, Svalbard, 79°N) », *IPY Oslo Science Conference 2010*, 8-12 June 2010, Oslo, Norway.

[17] GRISELIN M., LAFFLY D., BERNARD E., Florian TOLLE F., MARLIN Ch., FRIEDT J.-M. , DELANGLE E., SCHAWMBORN G., 2010 : "2D and 3D Variations of an Arctic Glacier to Recent Climate Change since Forty Years (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N)", *IPY Oslo Science Conference 2010*, 8-12 June 2010, Oslo, Norway.

[18] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D., and MARLIN Ch., 2010 : « Snowcover Survey of an Alpine Type Glacier in High Latitude (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N) », 14th *Alpine Glaciology Meeting*, 25-26.03.2010, Milano, Italy

[19] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J.-M., SCHWAMBORN G. et TOLLE F., 2009 : « Hydro-glaciology research on the Austre Lovénbreen since the 60s to the last IPY », *Pan-Svalbard Cooperation Workshop, Svalbard Science Forum*, Longyearbyen, Hornsund, Barentsburg, Ny Alesund, 17-22 aout 2009, **(conférencier invité)**.

[20] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J.-M., SCHWAMBORN G. et TOLLE F., 2009 : « Recent climate change observed in Svalbard since fourty years in Ny Alesund (79°N) », *MOCA 09, Our warming Planet, Joint assembly, symposium J01 Observations of High Latitude Climate Change*, Montréal, 19-29 juillet 2009.

[22] MARLIN Ch., GRISELIN M., BERNARD E., DELANGLE E., LAFFLY D., FRIEDT J.-M., 2009 : « Impact of climate conditions on the hydrological response of a polar glacier system – Austrelovénbreen - Svalbard », *MOCA 09, Our*

warming Planet, Joint assembly, symposium J15 High Latitude Terrestrial Processes: Hydrology and Interactions with the Atmosphere, Montréal, 19-29 juillet 2009.

- [23] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E. et DELANGLE E., 2009 : "Fourty Years of Weather Data to Understand Recent Climate Change in the Arctic (Svalbard, 79°N)", *International scientific Congress on Climate Change*, Copenhagen, Danemark, 10-12 mars 2009.
- [24] MARLIN Ch., GRISELIN M., BERNARD E. et DELANGLE E., LAFFLY D. et FRIEDT JM., 2009 : poster "Impact of warm events during cold seasons on the hydrological response of a polar glacier system", *International scientific Congress on Climate Change*, Copenhagen, Danemark, 10-12 mars 2009.
- [25] GRISELIN M., BERNARD E., MARLIN Ch., LAFFLY D., MARTIN G., FRIEDT J-M., 2008 : « Hydro-Sensor-FLOWS : a IPY French-German Program (2006-2010) to Survey a Polar Glacier (Austrelovenbre, 79°N, Spitsbergen) », *The second AWIPEV scientific workshop French – German Polar Science on Spitsbergen during IPY*, 8–10 October 2008, University of Bremen. **Conférence d'ouverture**
- [26] MARLIN Ch., GRISELIN M., LAFFLY D., GRISOLLE F., NORET A., BERNARD E., FRIEDT J.-M., MARTIN G. et SCHWAMBORN G., 2008 : poster : « Impact of Climate upon the Hydrology of a Small Polar Glacier, Austrelovenbre (79°N, Svalbard) », *Conference Hydrology in the Arctic Climate*, 16th-18th June 2008, UNIS Longyearbyen, Svalbard.
- [27] GRISELIN M., LAFFLY D., MARLIN Ch., BERNARD E., FRIEDT J.-M. et MARTIN G., 2008 : « Formosat, automatic cameras and GPS to survey a polar glacier (Austre Lovénbre, 79°N, Svalbard) : first results of the IPY field trips », *10th International Circumpolar Remote Sensing Symposium and 29th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Whitehorse, Canada, June 2-5, 2008.
- [28] FRIEDT J.-M., FERRANDEZ Ch., MARTIN G., MOREAU L., GRISELIN M., BERNARD E., LAFFLY D., et MARLIN Ch., 2008 : « Automated High Resolution Image Acquisition in Polar Regions », *European Geosciences Union* (Vienna, Austria, 13-18 April 2008.
- [29] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., SCHWAMBORN G., FRIEDT J.-M., MARTIN G., 2007 : « The Austreloven (79°N), a Glacier under Hydrological Survey », *NysMAC Seminar*, Ny Alesund and IPY, Cambridge, 16-18 October 2007 (**Conférencier invité pour Keynote d'ouverture**)
- [30] GRISELIN M. (**conf invité**), MARLIN Ch., LAFFLY D., 2007 : « Water and cryokarst to understand the recent evolution of glaciers in Spitsbergen : Hydro-Sensor-FLOWS, a IPY international program » *7th International Symposium "Karst and cryokarst in polar and high mountain region"* Sosnowiec - Wroclaw, Poland, 19-26 March 2007

France

• revues à comité de lecture

- [31] GRISELIN M., 2010 : La présence sur le terrain est-elle toujours nécessaire en géoscience ? Exemple des programmes d'hydro-glaciologie au Spitsberg (79°N), *L'information géographique*, numéro thématique « La place du terrain dans la géographie d'aujourd'hui », pp. 27-39.

soumise

- [32] BERNARD E., FRIEDT JM., GRISELIN M., LAFFLY D. et MARLIN Ch. 2011 : « La photo haute résolution pour comprendre les dynamiques des versants : l'exemple d'un système glaciaire arctique (Loven Est – Spitsberg) ». Soumis à *La Houille Blanche*, 13 p.

• ouvrages ou chapitres d'ouvrage

- [33] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J-M. et TOLLE F. (proposition acceptée) : Hydroglaciologie au Spitsberg in *Arctique* collection Territoire et sociétés, ed. Hermès, sous la direction de Daniel Joly

• communications (conférence)

- [34] BERNARD E., FRIEDT JM., GRISELIN M., LAFFLY D., MARLIN Ch., 2010 : « La photo haute définition pour comprendre les dynamiques des versants (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N) », Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France, Grenoble, 31 mars-1er avril 2010.
- [35] GRISELIN M, BERNARD E., LAFFLY D., TOLLE F., MARLIN Ch. et FRIEDT J-M., 2010 : Variations en surface et en volume du glacier Loven Est (79°N, Spitsberg) en relation avec les changements climatiques contemporains, Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France, Grenoble, 31 mars-1er avril 2010.
- [36] DELANGLE E., 2010 : "Hydrochemical response of a polar glacier facing the recent climate changes (Austrelovenbre, Svalbard, 79°N)", Présentation orale à la journée de l'Ecole Doctorale *Modélisation et Instrumentation en Physique, Energies, Géosciences et Environnement*, Orsay le 26 Avril 2010.

- [37] MARLIN Ch., GRISELIN M., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J.M., SCHWAMBORN G., TOLLE F., 2009 : « Changements climatiques récents observés à Ny Alesund (Svalbard, 79°N) et impact sur les glaciers ». *Atelier Climat et Impact*, 5 et 6 Novembre 2009, Université Paris XI, Orsay, France.
- [38] DELANGLE E., MARLIN Ch., GRISELIN M., LAFFLY D., BERNARD E., 2009 : poster « Impacts climatiques récents sur les écoulements d'eau d'un glacier polaire ». *Atelier Climat et Impact*, 5 et 6 novembre 2009, Université Paris XI, Orsay, France et 14^e journée des doctorants de l'école doctorale 143 "Physico-chimie de la Terre et des Planètes", 1^{er} avril 2009, Orsay, FRANCE
- [39] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D. et MARLIN Ch., 2009 : "Quantification des hauteurs de neige et des températures de l'air à la surface d'un glacier : du terrain à l'interpolation, confrontation de méthodes", 9^{es} *Rencontres de ThéoQuant*, Besançon, 4-6 mars 2009. Publiée en 2010 (pear reviewed)
- [40] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E. et FRIEDT J.M., 2009 : "Le croisement d'information en remote et in situ sensing pour suivre la dynamique hydrologique d'un glacier polaire : exemple de la crue d'automne 2008, Loven Est, Spitsberg (79°N)", 9^{es} *Rencontres de ThéoQuant*, Besançon, 4-6 mars 2009.
- [41] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., BERNARD E., DELANGLE E. et FRIEDT J.M., 2009 : "Suivi hydro-glaciologique du glacier Loven Est (79°N, Svalbard) : premiers résultats après deux années hydrologiques très différentes", *Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France*, Grenoble, 17 et 18 mars 2009.
- [42] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D. et MARLIN Ch., 2009 : Hauteurs de neige et équivalent-eau du manteau neigeux d'un glacier arctique : du terrain à l'interpolation, confrontation de méthodes (exemple du Loven Est, Spitsberg 79°N, *Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France*, Grenoble, 17 et 18 mars 2009.
- [43] GRISELIN M., BERNARD E., LAFFLY D., MARLIN Ch. et FRIEDT J.-M., 2008 : « Géomatique, image au sol et image satellite pour suivre l'évolution du manteau neigeux d'un glacier polaire (Loven Est, Spitsberg, 79°N), *Colloque de la Société Hydrotechnique de France (SHF)*, Section de Glaciologie-Nivologie, Chamonix 5-7 Mars 2008
- [44] GRISELIN M., MARLIN Ch., LAFFLY D., 2007 : « Changement climatique récent (1969-2006) en Arctique à travers les relevés météorologiques de Ny Alesund (Spitsberg, 79°N) » *Colloque de la Société Hydrotechnique de France (SHF)*, Section de Glaciologie-Nivologie, Grenoble 15 et 16 Mars 2007 [SHF, Grenoble 2007](#)
- [45] FRIEDT J.-M., FERRANDEZ C., MARTIN G., GUINOT S., CARRY E., BERTHELOT P., GRISELIN M., 2007 : « Instrumentation pour l'acquisition automatique de données : application à la capture autonome d'images haute résolution » *Colloque de la Société Hydrotechnique de France (SHF)*, Section de Glaciologie-Nivologie, Grenoble 15 et 16 Mars 2007 [SHF, Grenoble 2007](#)

Action de diffusion

• articles de vulgarisation

• conférences de vulgarisation

– Conférence Grand public

- [46] GRISELIN M., 2008 : « Autour de l'année polaire, 2007-2009 ». Conférence présentant le programme Hydro-Sensor-FLOWS dans le contexte de l'année polaire internationale 2007-2009, présenté à de nombreuses reprises
- [47] GRISELIN M., 2007 : "Réchauffement climatique et recherche de terrain", Festival des Sciences de Chamonix, juin 2007
- [48] GRISELIN M., 2007 : Quel paysage, aujourd'hui en Arctique ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007, <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article42>
- [49] GRISELIN M., 2007 : Comment vit un glacier ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007, <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article43>
- [50] GRISELIN M., 2007 : Pourquoi aller sur le terrain ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007, <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article44>
- [51] GRISELIN M., 2007 : Comment suivre un glacier ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007 <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article54>
- [52] GRISELIN M., 2007 : Comment étudier un glacier ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007, <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article55>
- [53] GRISELIN M., 2007 Est-ce que les glaciers fondent ?, podcast vidéo CNRS, année polaire internationale, © CNRS Images, IPEV - 2007, <http://www.cnrs.fr/anneepolaire/spip.php?article56>
- [54] GRISELIN M., 2007 : « Un glacier sous surveillance au Spitsberg : impact du réchauffement climatique récent sur les écoulements des glaciers polaires », conférence de presse d'ouverture de l'année polaire organisée par le CNRS à Paris le 7 mars 2008. Seuls 7 chercheurs étaient invités à présenter leur programme devant la presse.

• autres

- [55] GRISELIN M., 2008 : *Prendre des ados par la main dans le cadre du programme Hydro-Sensor-FLOWS, Spitsberg été 2007 : l'inoubliable mission*, montage audiovisuel de 33 minutes à l'invitation de la région Franche-Comté, de la DR6 du CNRS, de la ville d'Orsay, présenté en de nombreuses occasions (Science en fête, etc.).

[56] MARLIN Ch. et ZULLATO C., 2008 : Voyage au Spitsberg 2007 - à la rencontre des glaciers de l'Arctique, film de 32 minutes réalisé dans le cadre du projet "prendre des ados par la main".

• **Publication à diffusion restreinte, rapports, contrats**

[57] GRISELIN M., 2010 : appel d'offre IPEV programme Cryo-Sensors (évaluation en cours)

[58] GRISELIN M., 2010 : Rapport final IPEV programme Loven-FLOWS (2006-2010)

[59] GRISELIN M., 2010 : Rapport final ANR programme Sensor-FLOWS (2006-2010)

[60] GRISELIN M., 2010 : dossier CNRS renouvellement GDR 3062 « Mutations polaires » (évaluation en cours)

[61] GRISELIN M., 2010 : Rapport final provisoire ANR programme Sensor-FLOWS (2006-2010)

[62] GRISELIN M., 2010 : appel d'offre ANR Blanc programme Cryo-Sensor (programme accepté)

[63] GRISELIN M., 2009 : appel d'offre IPEV programme Loven-FLOWS

[64] GRISELIN M., 2009 : Rapport semestriel ANR programme Sensor-FLOWS

[65] GRISELIN M., 2008 : appel d'offre IPEV programme Loven-FLOWS

[66] GRISELIN M., 2008 : Rapport semestriel ANR programme Sensor-FLOWS

[67] GRISELIN M., 2007 : convention pour édition « Trois jeunes Françaises au Spitsberg », Région Franche-Comté

[68] GRISELIN M., 2007 : appel d'offre IPEV programme Loven-FLOWS

[69] GRISELIN M., 2007 : Rapport semestriel ANR programme Sensor-FLOWS

[70] GRISELIN M., 2007 : Encadrement jeunes au Spitsberg, Dircom CNRS 01/06/2007

[71] GRISELIN M., 2007 : Encadrement jeunes au Spitsberg, Région Franche-Comté 01/11/2007

[72] GRISELIN M., 2007 : "Millet expedition project" Equipement de montagne pour ados du programme Hydro-sensor-FLOWS au Spitsberg, Millet SA (entreprise)

[73] GRISELIN M., 2006 : appel d'offre IPEV programme Loven-FLOWS

[74] GRISELIN M., 2006 : Dossier de demande de création du *GDR Mutations polaires*, 30 p.

[75] GRISELIN M., 2006 : appel d'offre ANR programme Sensor-FLOWS

[76] GRISELIN M., 2006 : appel d'offre contrat région Franche-Comté, instrumentation

• **Banque d'images**

[77] – Spitsberg monitoring du glacier Loven Est 3 clichés par jour sur 8 stations de 2007 à 2010 = 30 000 clichés

• **Prestation dans les médias**

– Presse écrite

Nombreuses interviews ou articles dont journal CNRS Participation ponctuelle

– Radio/Télévision/Film

nombreuses interventions dont 5 JT 20 heure TF1 en avril 2007, plusieurs FR3, BBC et ZDF en 2010, plusieurs émissions radio

très sollicités pour l'année polaire (API) : un des 6 programmes dirigés par la France.

• **Site Web**

[78] Site web de vulgarisation Hydro-Sensor-FLOWS site du programme ANR Hydro-Sensor-FLOWS

<http://www.hydro-sensor-flow.com/>

[79] Site web de la conférence « Mondes polaires » Paris 2011

<http://thema.univ-fcomte.fr/polarworlds-2011/>

• **Edition ouvrages grand public**

[80] GRISELIN M., 2007 : Edition de *Trois jeunes Françaises au Spitsberg* de D. Bruyère, A. Griselin et A. Jouvenot, financé par Région Franche-Comté, livret de 128 p. couleur relatant l'expérience des trois jeunes qui nous accompagnaient en été 2007, direction et mise en page M. Griselin

D.3 LISTE DES ELEMENTS DE VALORISATION

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** On détaillera notamment :*

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype

- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,...)

Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.

Développement de prototypes de station photo automatiques autonome (collaboration UMR ThéMA et UMR FEMTO-ST)

D.4 PERSONNELS RECRUTES EN CDD (HORS STAGIAIRES)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet.

Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés.

Des données complémentaires sur le devenir professionnel des personnes concernées seront demandées à la fin du projet. Elles pourront faire l'objet d'un suivi jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification				Avant le recrutement sur le projet			Recrutement sur le projet			
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. antérieure (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Date de recrutement	Durée missions (mois) (3)

Aucun personnel n'a été recruté. Deux doctorants, financés hors ANR, ont intégrés le programme, l'un fin 2007, l'autre fin 2008. Les assistants de terrain que nous recrutons sont tous volontaires et ne sont pas rémunérés : seuls leurs voyages et missions sont pris en charge (entre autres) sur les crédits ANR.

Aide pour le remplissage

(1) **Adresse email** : indiquer une adresse email la plus pérenne possible

(2) **Poste dans le projet** : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)

(3) **Durée missions** : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées ou prévues sur le projet

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).

D.5 ÉTAT FINANCIER

Donner un état indicatif de la consommation des crédits par les partenaires. Indiquer la conformité par rapport aux prévisions et expliquer les écarts significatifs éventuels.

100 % des crédits ont été dépensés avant la fin de l'ANR pour partenaire 1 et 2, voir rapport financier joint.

E ANNEXES EVENTUELLES

En annexe numérique : tableau des missions effectuées au cours du programme (2007-2010) et rappel des missions préparatoires pré-ANR (2006)
decompte-mission-ANR_2007-2010.xls

1 communication publiée (peer reviewed)

BERNARD E., TOLLÉ F., GRISELIN M., LAFFLY D. et MARLIN Ch., 2009 : "Quantification des hauteurs de neige et des températures de l'air à la surface d'un glacier : du terrain à l'interpolation, confrontation de méthodes", 9^{es} *Rencontres de ThéoQuant*, Besançon, 4-6 mars 2009. Publiée en 2010 (peer reviewed)
TQ2009 ARTICLE 81.pdf

2 communications soumises à Polar Record

polar_rec_friedt.pdf

polar_rec_laffly.pdf

1 communication soumise à *La Houille Blanche*