AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE ANR	**Rapport final ANR-10-BLAN-1806**	ANR-10 BLAN-1806 48 mois

Programme ANR-10-BLAN-1806
Cryo-Sensors

A IDENTIFICATION 1
B LIVRABLES ET JALONS 3
C RAPPORT D'AVANCEMENT SUR LA PERIODE 2006-2010 5
C.1 Description des travaux effectués 5
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 9
1. Changement climatique récent :
1.1. les données de la station météo de Ny Alesund
1.2. L'état thermique du glacier
2. Dynamique du manteau neigeux et suivi glaciologique du glacier Loven Est
2.1. Le suivi à partir des stations photo automatiques
2.2. le suivi in situ du manteau neigeux
2.3. Les bilans de masse : accumulation-ablation
2.4. Le recul du front
2.5. Levé au GPS de la surface du glacier et constitution d'un MNT
2.6. Les lames de fonte
3. Suivi hydrologique du bassin versant du Loven Est
3.1. Mesures de débits
3.2. Rivière Goule : exutoire principal du bassin-versant
3.3. Rivière Diable : exutoire secondaire drainant une partie de la zone proglaciaire
4. Les mesures au GPR et photogrammétrie
4.1. Analyse des données acquises dan s la zone morainique
4.2. Analyse des données acquises sur le glacier
4.3. Photogrammétrie
5. Etude de la couche active du pergélisol
Conclusion
C.3 Réunions du consortium (si applicable) 48
C.4 Commentaires libres 49
D IMPACT DU PROJET DEPUIS LE DEBUT 49
D.1 Indicateurs d'impact 49
D.2 Liste des publications et communications 51
D.3 Liste des éléments de valorisation 55
D.4 Personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) 55
D.5 État financier 56

A IDENTIFICATION

Acronyme du projet	Cryo-Sensors
Titre du projet	Impact du réchauffement climatique sur la cryosphère polaire arctique : bassin du glacier Lovén Est, 79°N, Spitsberg
Coordinateur du projet (société/organisme)	GDR 3062, UMR ThéMA 32 rue Mégevand 25030 Besançon Cedex
Date de début du projet	1-11-2010

Date de fin du projet	31-10-2014
Site web du projet, le cas échéant	

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	31/12/2014
Période faisant l'objet du rapport d'activité	1er novembre 2010 31 octobre 2014

Ce rapport devait être rendu le 31 décembre 2014 mais un délai d'un mois nous a été accordé suite à l'hospitalisation de M. Griselin (cf échange de mail avec Madame Guyard).
D'autre part, nous avons manqué les rapports intermédiaires (24 et 30 mois) pour la bonne raison que, dans la précédente ANR, les rapports nous étaient demandés par un avis envoyé par email. Je me suis aperçue, trop tard, que les rapports étaient attendus sur notre espace aap-agencerecherche : j'en suis bien désolée. C'est quand Madame Benoît m'a réclamé en mai 2014 le rapport à 30 mois (qui était dû pour mai 2013) que j'ai vu mon erreur et je lui ai alors proposé d'attendre le rapport final, ce que je fais par la présente. Notons également que je suis partie à la retraite en juillet 2013, ce qui n'a pas aidé. J'ai demandé l'éméritat qui m'a été accordé en janvier 2014, ce qui explique que je prenne la responsabilité du rapport final de cette ANR que j'ai dirigée jusque 2013, mes collègues ayant assuré la pérennité du programme après mon départ.

B LIVRABLES ET JALONS

Quand le projet en comporte, 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 Lovén Est	données	1 et 2	4 années consécutives de bilan glaciologique par relevé sur les 40 balises installées en 2007 (ANR Sensor-FLOWS)
Livré en cours d'exploitation	2	Bilan hydrologique	données	1 et 2	4 années consécutives de mesures hydrologiques et hydrochimiques (faisant suite à l'ANR Sensor-Flows
Livré en cours d'exploitation	3	Suivi manteau neigeux	données	1 et 2	42 carottages annuels ont permis d'établir l'état du manteau neigeux en plus du suivi par photographies automatiques (3 cli-chés par jour). Ce suivi in situ et à distance permet d'établir chaque année les cartes de la dynamique nei-geuse et de la discrimination neige/ glace pour la fonte.
Livré en cours d'exploitation	4	Levé cartographique MNT à l'aide d'un GPS différentiel	données	1 et 2	Le levé de la surface du glacier a été réalisé en avril 2014 et soustrait à celui d'avril 2010 il per- met de mesurer les gains et les pertes du glacier en 4 années de fonte.
Livré en cours d'exploitation	5	Mesures au GPR (Ground penetrating Radar)	données	1 et 2	Un certain nombre de mesures au radar GPR ont été effectuées sur le glacier pour parfaire la connaissance du lit rocheux, trouver les zones de glace dite « chaude », la présence d'eau, les limites du glacier en

État *	N°	Titre	Nature (jalon, rapport, logiciel, prototype, données, …)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
					direction des versants. Des mesu-res GPR récurrentes ont aussi été menées dans la zone morainique en liaison avec l'étude du permafrost
Livré en cours d'exploitation	6	Etat climatique du bassin (température précipitations)	données	1 et 2	Grâce à notre réseau de capteurs nous avons engrangé quatre années de données climatiques concernant le Lovén Est (22 capteurs T°C, 2 pluviomètres, 40 balises à neige et 10 caméras auto-matiques). Ces mesures continuelles ont poursuivi pen-dant 4 années celles engrangées pendant l'ANR Sensor-Flows
Livré en cours d'exploitation	7	Suivi des stations permafrost	données	1 et 2	Des stations thermiques et piezo-métriques ont été installées au cours de cette ANR et permettent le suivi de l'évolution des températures du sous-sol, ainsi que de la nappe phréatique
Livré en cours d'exploitation	8	Etude des versants à l'aide d'un LIDAR terrestre	données	1 et 2	La première année d'ANR a permis de faire des tests concluants qui ont convaincu, puisque, l'année suivante une ANR JCJC a été obtenue par Florian Tolle pour cet aspect de notre programme initial (ANR PRISM)

A noter que les données sont engrangées, traitées, mais qu'une grande partie de l'exploitation est encore en cours en ce qui concerne la valorisation par des publications scientifiques. Deux thèses ont été soutenues dans la période.

C RAPPORT D'AVANCEMENT SUR LA PERIODE 2010-2014

Le programme Cryo-Sensors n'a obtenu que 48 % du budget initialement proposé. Il a donc fallu réduire les ambitions de départ. C'est la partie LIDAR qui a été amputée. Elle a, du reste, fait l'objet d'un projet ANR Jeunes chercheurs porté par Florian Tolle, membre de l'ANR Cryo-Sensors. L'ANR JCJC « PRISM » a donc été obtenue et permet de mener cet aspect qui n'apparaît donc plus en tant que tel dans l'ANR « Cryo-Sensors ».
Beaucoup plus grave que la réduction de budget, le démarrage de notre projet a été partiellement bloqué par un problème rencontré avec l'Institut polaire français (IPEV) qui assure la logistique des scientifiques au Spitsberg (secteur de Ny-Ålesund où se situe le site d'étude). En effet, l'évaluation de notre projet par le Conseil Scientifique de l'IPEV n'a pas été bonne, et totalement contradictoire avec l'évaluation ANR : de ce fait, l'Institut polaire ne nous a pas autorisés à mettre en œuvre les tâches nouvelles du programme (nouvelles par rapport à l'ANR Sensor-FlOWS). Nous avons cependant été autorisés à effectuer la maintenance des équipements en place et à procéder au déchargement des données de 2010-2011 (deux missions, l'une en avril 2011 et l'autre en septembre/octobre 2011). Une partie seulement du programme scientifique de l'ANR Cryo-Sensors a donc pu être réalisée cette année-là. Nous n'avons pas été autorisés à aller sur le terrain en été ce qui a contribué à la perte d'importantes données pour une année 2011 exceptionnelle sur le plan de la fonte !
A l'époque (rapport à 6 mois), j'avais alerté l'ANR qui n'a pas réagi (on trouve dans notre rapport à 6 mois les avis contradictoires de l'ANR et de l'Institut Polaire ; on trouve ma demande restée sans réponse dans la rubrique « questions posées à l'ANR).
En 2012, même sanction de l'Institut polaire. Cette fois, malgré la non-intervention de l'ANR, j'ai saisi la direction scientifique de l'INSHS du CNRS dont je dépends. Mr Bourdelais (directeur de l'INSHS, a reçu le directeur de l'IPEV et un compromis a été trouvé pour que nous puissions aller sur le terrain dans les conditions que nous demandions.
C'est donc envers et contre l'Institut polaire que notre programme a été mené les deux premières années, dans des conditions rendues difficiles, mais nous avons fait de notre mieux pour honorer nos engagements par rapport à l'ANR. Le présent rapport devrait le démontrer.

C.1 DESCRIPTION DES TRAVAUX EFFECTUES

Le programme Cryo-Sensors repose sur une importante phase de collecte d'informations sur le terrain. La plupart des capteurs ont été installés au cours de l'ANR Sensor-Flows, (thermomètres, pluviomètres, stations météo, stations photos automatiques, sondes hydrologiques) : ils 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) sont menées selon les besoin aux différentes saisons (avril, septembre).
Les grandes nouveautés de l'ANR Cryo-Sensors touchaient les zones d'ombres du bilan hydro-glaciologique à savoir les versants (Lidar terrestre), les écoulements intra et sous-glaciaires, le permafrost. L'installation de stations permafrost (températures, piézomètres), les mesures *in-situ* au LIDAR et au GPR ont permis de développer ses aspects nouveaux.
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

Malgré les difficultés dues à l'Institut polaire, nous avons pu, au cours de l'ANR Cryo-Sensors, effectuer 12 missions de terrain, dont 4 en commun avec l'ANR JCJC PRISM, ce qui correspond à 51 vols pour le Spitsberg et 718 jours-homme (dont un tiers en commun avec PRISM) :
– 2 missions en 2011 : printemps ; automne –> 60 ; 56 soit un total de 116 jours-homme
– 3 missions en 2012 : printemps ; été ; automne –> 84 ; 78 ; 61 ; soit un total de 223 jours-homme
– 3 missions en 2013 : printemps ; été ; automne –> 66 ; 66 ; 40 ; soit un total de 172 jours-homme (dont 132 en commun avec ANR PRISM)
– 4 missions en 2014 : printemps ; été A ; été B ; automne –> 64 ; 22 ; 77 ; 44 ; soit un total de 207 jours-

homme (dont 141 en commun avec ANR PRISM).

Au total donc depuis 4 ans, 12 missions annuelles, 51 vols pour le Spitsberg, 718 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 du GDR Mutations polaires (2 missions de 2 personnes par an [8 K€]), et le soutien logistique de l'AWIPEV sur place.
Dans le programme ANR retenu en 2010, il était prévu au total 12 missions par an et nous demandions 240 jours-homme annuels. Malgré les embûches et la réduction de budget nous avons assuré 2 à 4 missions par an, correspondant à 13 vols en moyenne et une présence à peine inférieure à ce qu'on demandait (718 au lieu de 960). La réduction budgétaire a imposé un raccourcissement de la durée des missions sur le terrain.

Voyages et missions ANRblan-1806 Cryo-Sensors

				total annuel			
		vols Spitsberg	mission en jours-homme	vols Spitsberg	mission en jours-homme	financement	remarques
2011	printemps 2011	4	60			ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES	
	automne 2011	4	56	8	116	ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES	
2012	printemps 2012	7	84			ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
	été 2012	5	78			ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
	automne 2012	4	61	16	223	ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
2013	printemps 2013	5	66			ANR Cryo-sensors + ANR PRISM+ GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	en commun avec ANR JCJC PRISM
	été 2013	4	66			ANR Cryo-sensors + ANR PRISM+ GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	en commun avec ANR JCJC PRISM
	automne 2013	4	40	13	172	ANR + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
2014	printemps 2014	4	64			ANR Cryo-sensors + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique	en commun avec ANR JCJC PRISM
	été 2014 A	2	22			ANR Cryo-sensors + ANR PRISM+ GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
	été 2014 B	4	77			ANR Cryo-sensors + ANR PRISM+ GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	en commun avec ANR JCJC PRISM
	automne 2014	4	44	14	207	ANR Cryo-sensors + GDR Mutations polaires, UMR ThéMA et IDES, soutien logistique AWIPEV	
				vols	jours-homme		
total 2011-2014				51	718		
	dont en commun avec ANR PRISM			17 vols	273 jours-homme		

Figure 1 – Missions réalisées au cours du programme ANR Cryo-Sensors 2011-2014

C.1.2. Descriptif des mesures effectuées pendant les missions

L'ANR Cryo-Sensors a poursuivi le programme de l'ANR Sensor-Flows et a donc bénéficié du réseau de capteurs installé de 2006 à 2010. Le réseau initial a été complété de 2011 à 2013 par l'installation de stations d'étude du permafrost (capteurs de température à différentes profondeurs et suivi de la nappe par piézomètre). Le réseau actuel se compose de :
– une station météo d'altitude (dont T, P, radiation, pression atmosphérique)
– 22 capteurs de température de l'air
– 5 stations de mesure de la température de la couche active du pergélisol, et 5 stations piézométriques
– 13 stations photo automatiques

– 2 stations hydrologiques (stations jaugées équipées de sondes multiparamètres et de prèleveurs automatiques d'eau)

Le réseau initial a subi bien des évolutions au cours de la première ANR (2006-2010), 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.

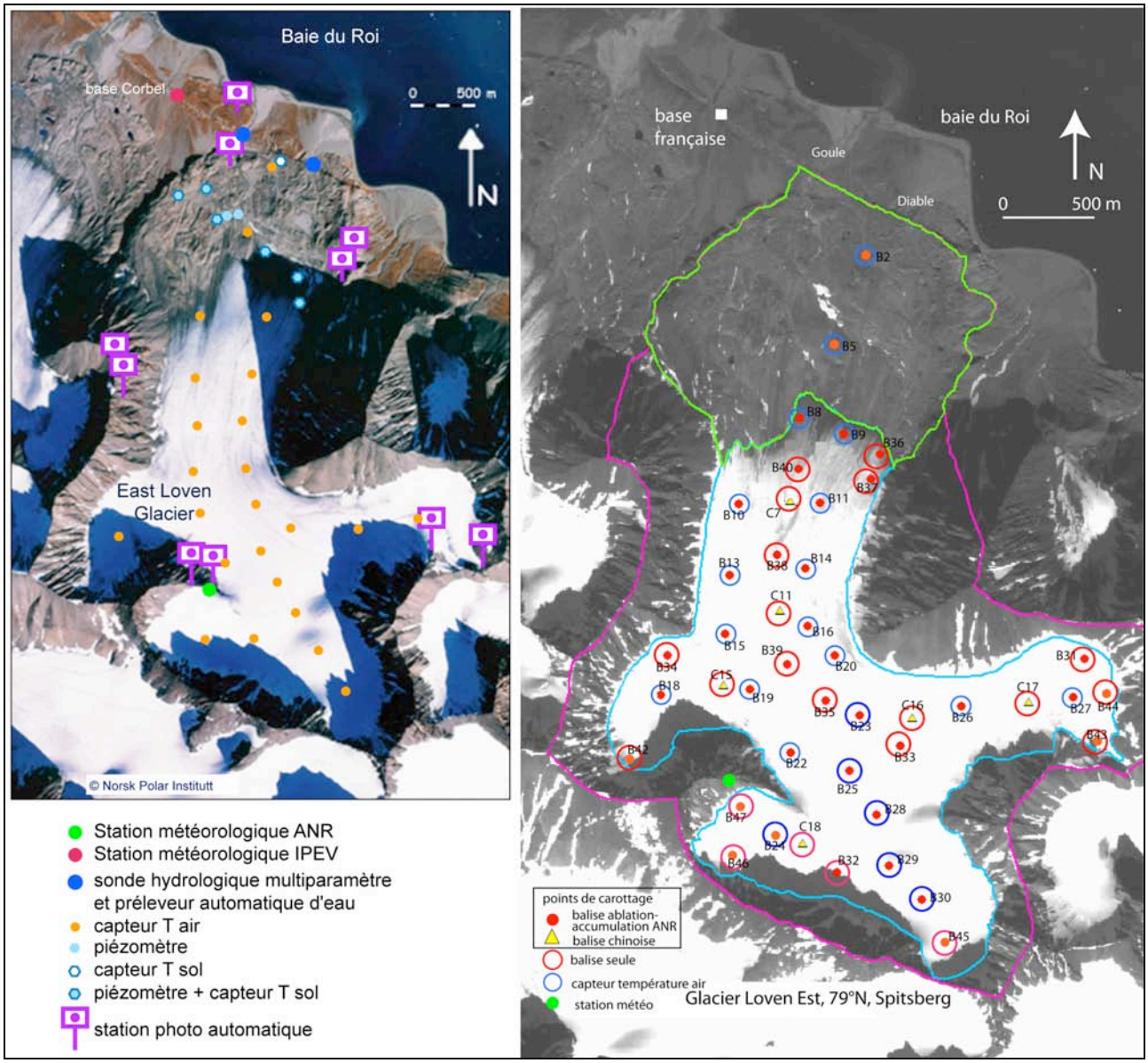


Figure 2 – Le réseau de capteurs et le réseau de balises à glace 2011-2014

Comme pour l'ANR Sensor-FLOWS, chaque année depuis 2007, les missions de l'ANR Cryo-Sensors se sont déroulées de la façon suivante. L'accent a été mis lors de cette deuxième ANR sur l'installation de stations d'études du permafrost.

• **Avril-mai**

- déchargement et maintenance des stations photos automatiques
- déchargement et maintenance des capteurs qui restent en place toute l'année (capteurs thermiques, air et sol, station météo)
- mesures au radar GPR (Ground Penetrating Radar) 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.

Avril 2012 et 2013
Implantation des stations d'étude du permafrost par forage de la couche active du permafrost et installation de capteurs de T et de piézomètres.

En 2011 et 2012
- évaluation du manteau neigeux sur les versants par mesures au LIDAR terrestre . Ce programme a fait les années suivantes l'objet de l'ANR JCJC « PRISM »

en 2014 (comme en 2010)
- grande campagne de mesure GPS (partenaire 1 et 2) afin d'établir un nouveau MNT de surface du glacier

• Juillet

Opérations d'hydrochimie et d'hydrologie, tout en continuant les mesures d'évolution du manteau neigeux :
- mise en place des stations hydrologiques multiparamètres et des préleveurs d'eau automatiques
- confirmation de la courbe de tarage des deux émissaires équipés de stations hydrologiques par dilution chimique de NaCl (courbe établie lors de la précédente ANR de 2007 à 2010)
- mesures quotidiennes d'hydrochimie
- préparation des échantillons à rapporter en France pour analyse

2012
- installation de 2 stations piézométriques pour suivre la nappe près d'une des rivières

en 2013
- suivi par carottage de la neige de l'évolution du manteau neigeux estival

• Juillet-août

- mesure de l'évolution nivologique et géomorphologique des versants grâce au Lidar terrestre.
Ces mesures ont été partie intégrante du programme la première année puis ont fait l'objet d'un programme ANR JCJC « PRISM »

• 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. Travail sur les limites du glacier et sur les zones de glace dite « chaude » et comparaison avec le glacier voisin Midtre Lovén
- nombreuses mesures GPR/GPS dans la moraine pour suivi de la couche active du permafrost, le tout en liaison avec des mesures électriques dans la couche active
- 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, 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 2014. 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 2014 comprise, sachant que pour cette dernière année, les données sont loin d'être totalement exploitées et les résultats sont donc encore préliminaires.
Notre demande initiale pour Cryo-Sensors, annonçait la poursuite de l'étude hydro-glaciologique commencée quatre avant avec une emphases sur les zones d'ombre, en particulier sur trois points extrêmement réactifs aux variations climatiques, généralement peu ou pas pris en compte dans les études glaciologiques : la dynamique du manteau neigeux, la dynamique du permafrost, la dynamique des écoulements intra- et sous-glaciaires. Comme il a été dit précédemment, la réduction du budget nous a contraints à laisser le volet versants et Lidar terrestre, programme qui a cependant été lancé dans le cadre de Cryo-Sensors jusqu'à ce qu'il devienne un programme à part entière fin 2012 (ANR JCJC « PRISM »).

• L'objectif initial annoncé est une étude hydrologique et hydrochimique du bassin du glacier Loven Est. Elle ne saurait se concevoir sans un regard sur les données météorologiques à plus long terme dont on dispose, à savoir la chronique 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 (photos des stations automatiques), (§ 2).
• Quatre 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 quatre années très différentes sur le plan climatique (§ 3).
• Des mesures au GPR couplées au DGPS ont permis d'affiner les travaux réalisés au cours de l'ANR précédente. L'accent a été mis sur les limites du glacier mais aussi sur la zone morainique pro-glaciaire, en liaison avec l'étude de la couche active du permafrost (§ 4).
• Enfin, la mise en place de stations permafrost a permis le suivi de la température de la couche active du permafrost et celui de la dynamique de la nappe phréatique et sa contribution au bilan hydrologique (§ 5).
• Nous évoquerons les premières mesures effectuées avec le LIDAR terrestre pour le suivi des versants avant que ce volet ne fasse l'objet de l'ANR JCJC « PRISM » (§ 6).

Il va sans dire que nous avons communiqué nos résultats chaque année dans des congrès internationaux et nationaux. Nous avons nous mêmes organisé une conférence internationale « Mondes polaires Paris 2011 » qui, sous l'égide du GDR Mutations polaires (partenaire 1 de cette ANR), a fait le point sur les changements observés [5] [1].
Sur un programme suivant la dynamique à moyen terme 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. Neuf publications sont désormais sorties [1 à 9], 1 est en retour de correction [10], 1 est soumise [11] et plusieurs sont en cours de rédaction.

1. Changement climatique récent

1.1. les données de la station météo de Ny-Ålesund

Un travail conséquent réalisé dans le cadre de ce programme sur l'analyse des données météo de Ny-Ålesund (1969-2010) nous permet de comprendre et de quantifier le changement climatique nettement perceptible des deux dernières décennies [10, 12, 21, 39, 45, 63]. En fait, les 2,54°C d'augmentation de la température de l'air enregistrés (et classiquement annoncés) en 44 ans (Fig. 3 A et C, trait bleu) sont exclusivement dus à l'augmentation des températures des 14 dernières années (trait fushia). Il en va de même pour les précipitations (Fig. 3 B et D) : l'augmentation des précipitations totales est due uniquement à une augmentation de la pluie (+22,4 mm / décennie) tandis qu'on n'observe qu'un gradient très faible sur les quantités de neige précipitées (+4,1 mm par décennie).

[1] Les numéros entre crochets renvoient à la bibliographie du programme page 51.

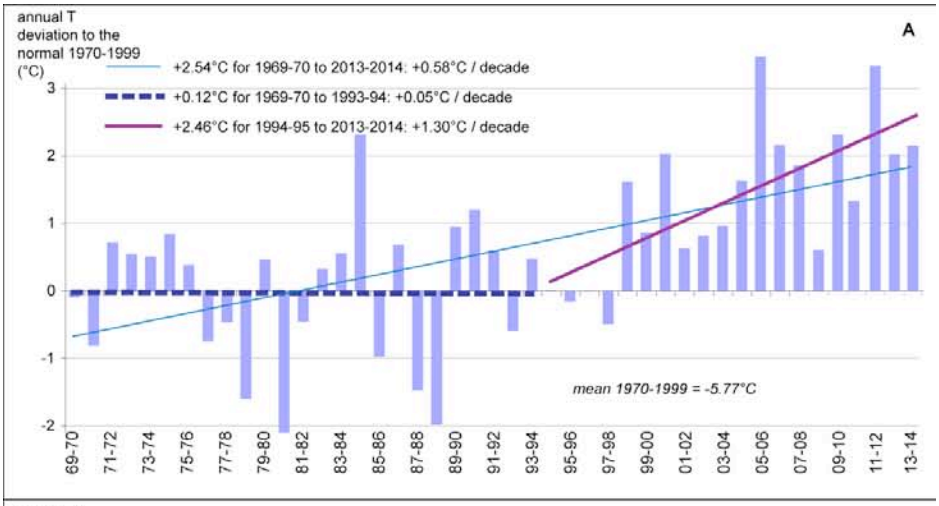
Figure 3 – Température de l'air et précipitations à Ny-Ålesund pour 1970–2014 (source : Norwegian Meteorological Institute [DNMI] ; http://eklima.met.no). Les valeurs annuelles correspondent aux années hydrologiques à savoir 1er octobre-30 septembre.

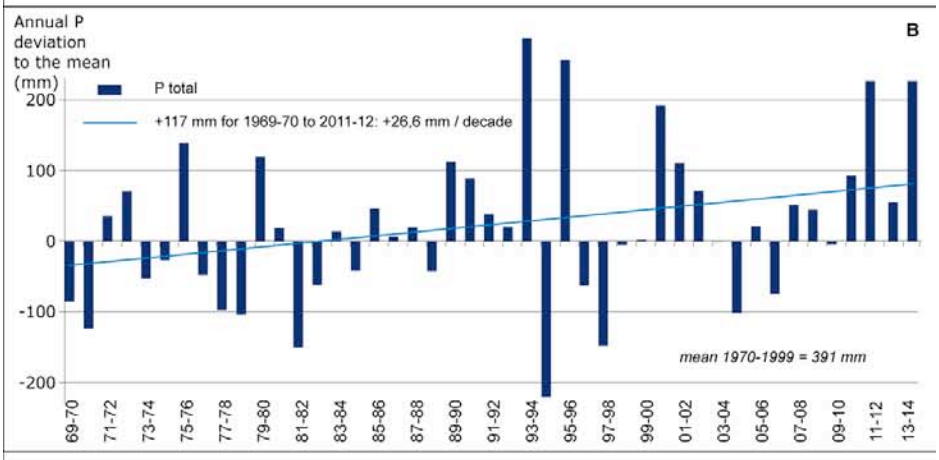
A – Température de l'air moyenne annuelle (T) écart à la moyenne 1970–1999 (–5,77°C). Entre 1970 et 2014, le gradient des T est de +0,58°C par décennie (trait continu bleu). Un point de cassure a été statistiquement déterminé entre 1994 et 1995. Cependant seule les températures des 14 dernières années sont continuellement au-dessus de la normale 1970-1999. Il n'y a pas de gradient significatif pour les 25 premières années (pointillé bleu marine) alors que la pente s'accroît à partir de 1995 avec un gradient de 1,30°C par décennie (trait continu fushia).

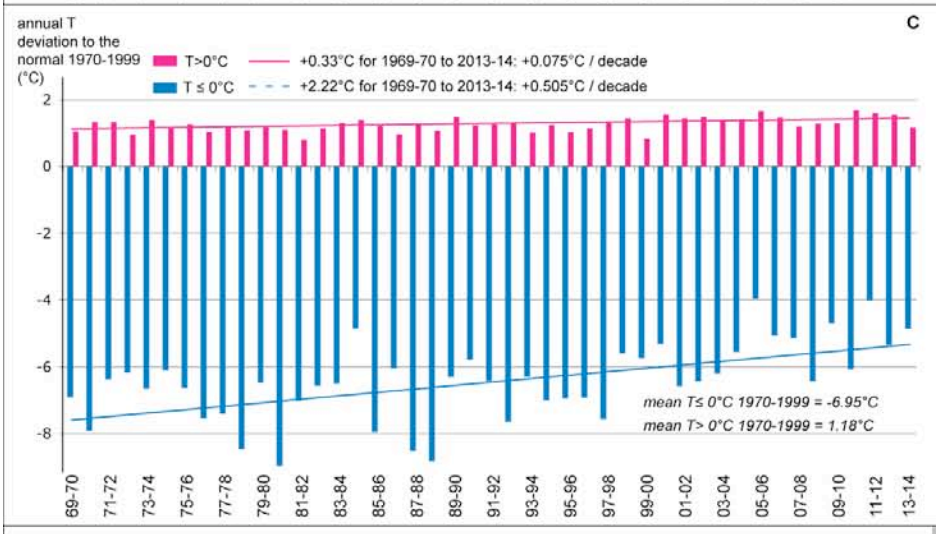
B – Précipitations totales annuelles (P) : écart à la moyenne 1970-1999 (391 mm). Le gradient des P totales est de +26,6 mm par décennie.

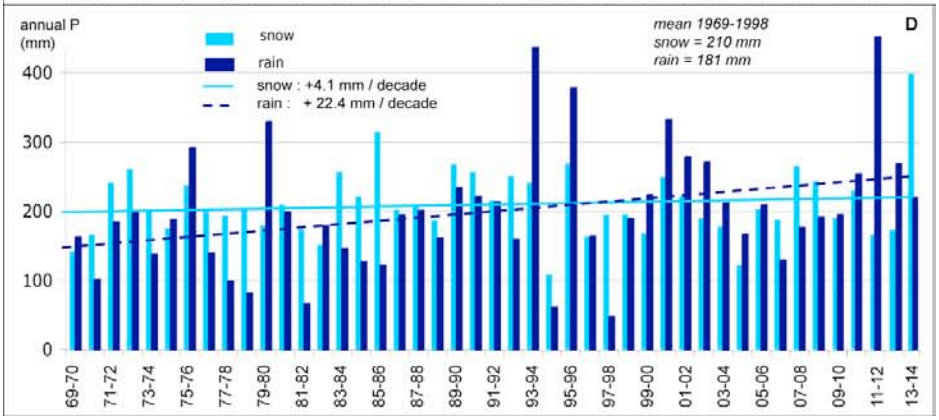
C – Températures annuelles positives et négatives. L'accroissement de la température annuelle de 1969-1970 à 2013-2014 est plus dû à un accroissement des températures négatives (+0,505°C/décennie, ligne bleue) qu'à celui des températures positives (+0,075°C/décennie, ligne fushia).

D – Précipitations annuelles solides et liquides : l'accroissement des précipitation est exclusivement dû à un accroissement de la pluie (+22,4 mm/décennie ; pointillé bleu foncé) alors que les quantités de neige (trait continu bleu turquoise) restent constantes. Figure tirée de l'article à paraître dans GeoAnnaler [11]


annual T
deviation to the
normal 1970-1999
(°C)
A
+2.54°C for 1969-70 to 2013-2014: +0.58°C / decade
+0.12°C for 1969-70 to 1993-94: +0.05°C / decade
+2.46°C for 1994-95 to 2013-2014: +1.30°C / decade
mean 1970-1999 = -5.77°C
3
2
1
0
-1
-2
69-70
71-72
73-74
75-76
77-78
79-80
81-82
83-84
85-86
87-88
89-90
91-92
93-94
95-96
97-98
99-00
01-02
03-04
05-06
07-08
09-10
11-12
13-14


Annual P
deviation
to the mean
(mm)
B
P total
+117 mm for 1969-70 to 2011-12: +26,6 mm / decade
mean 1970-1999 = 391 mm
200
100
0
-100
-200
69-70
71-72
73-74
75-76
77-78
79-80
81-82
83-84
85-86
87-88
89-90
91-92
93-94
95-96
97-98
99-00
01-02
03-04
05-06
07-08
09-10
11-12
13-14


annual T
deviation to the
normal 1970-1999
(°C)
C
T>0°C
T ≤ 0°C
+0.33°C for 1969-70 to 2013-14: +0.075°C / decade
+2.22°C for 1969-70 to 2013-14: +0.505°C / decade
mean T≤ 0°C 1970-1999 = -6.95°C
mean T> 0°C 1970-1999 = 1.18°C
2
0
-2
-4
-6
-8
69-70
71-72
73-74
75-76
77-78
79-80
81-82
83-84
85-86
87-88
89-90
91-92
93-94
95-96
97-98
99-00
01-02
03-04
05-06
07-08
09-10
11-12
13-14


annual P
(mm)
D
snow
rain
snow : +4.1 mm / decade
rain : + 22.4 mm / decade
mean 1969-1998
snow = 210 mm
rain = 181 mm
400
300
200
100
0
69-70
71-72
73-74
75-76
77-78
79-80
81-82
83-84
85-86
87-88
89-90
91-92
93-94
95-96
97-98
99-00
01-02
03-04
05-06
07-08
09-10
11-12
13-14

En cette fin de second programme ANR nous avons donc acquis les données hydro-glacio-climatologiques pour quatre années hydrologiques complètes (1er octobre - 30 septembre), de 2011 à 2014, qui permettront une comparaison entre ces quatre années elles-mêmes, très différentes, et une mise en relation avec les données antérieures de notre précédent programme ANR (2006-2010), mais aussi avec des données partielles des Espagnols, des Français (1964-70 ; 1980-81) ainsi qu'avec les 44 années d'enregistrement météo de la station de Ny-Ålesund (Fig. 4).

Les quatre années prises en considération pour le programme ANR Cryo-Sensors sont très différentes, tant en températures moyennes annuelles, qu'en précipitations solides et liquides (Fig. 4 et tableau 1). Elles sont ici mises en relation avec les quatre années précédemment étudiées dans l'ANR Sensor-Flows (2006-2010)

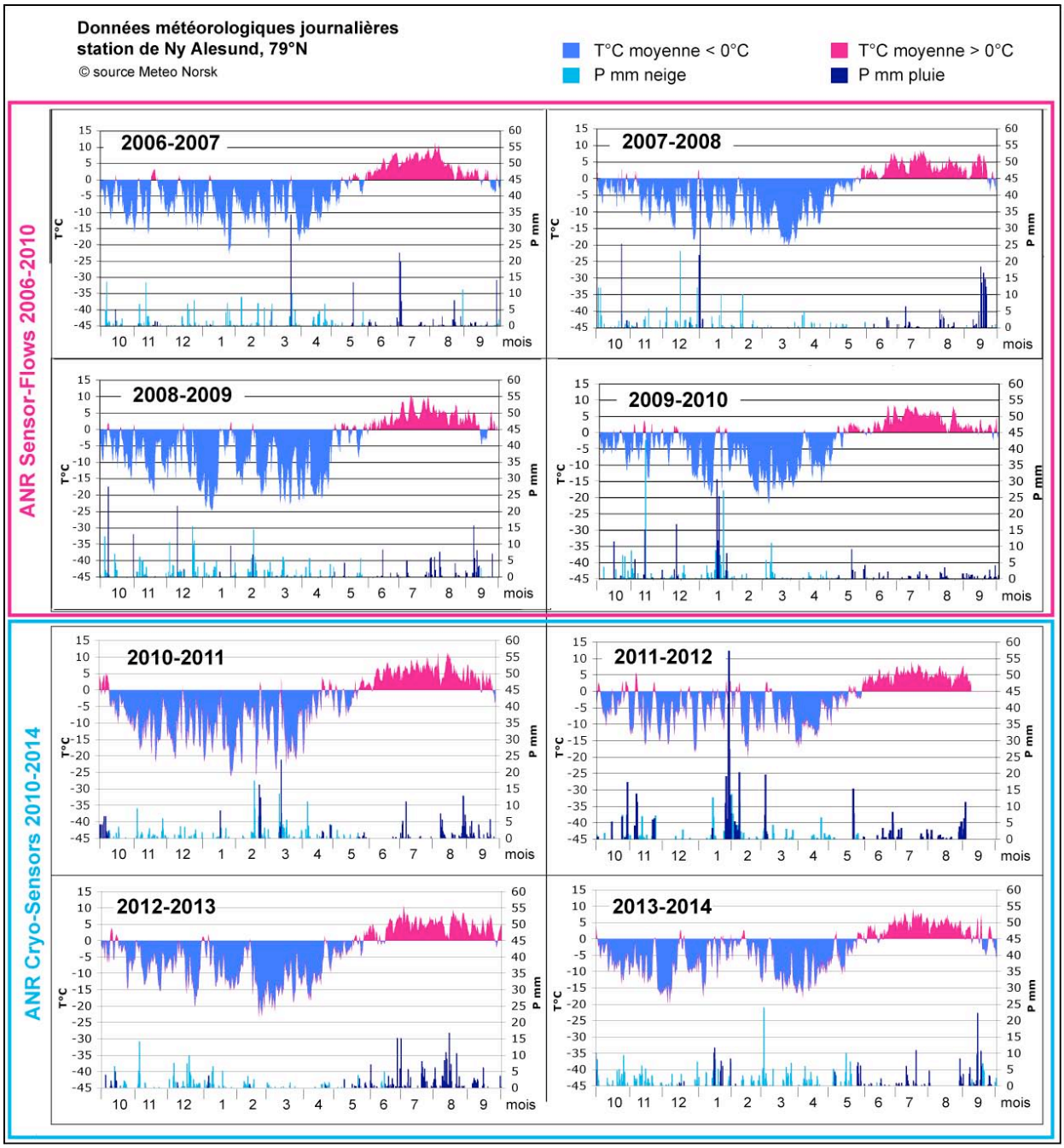


Figure 4 – Données météorologiques journalières enregistrées à Ny-Alesund, 79°N :
les quatre années hydrologiques prises en compte pour l'ANR Cryo-Sensors (2010-2011 à 2013-2014) mises en relation avec les quatre années de suivi de l'ANR Sensor-Flows (2006-2007 à 2009-2010)

ANR	année	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	Pmm pluie	Manteau neigeux fin avril en	Bilan de masse en mm.weq
Sensor-Flows 2006-2010	2006-2007	-3,62	-5,07	1,45	**317**	188	**129**		
	2007-2008	-3,92	-5,2	1,24	442	265	177	859	-104
	2008-2009	**-5,17**	**-6,44**	1,27	435	244	192	847	-148
	2009-2010	-3,56	-4,84	1,28	386	191	195	717	-165
	moyenne	-4,07	-5,39	1,31	395	222	173	808	-139
Cryo-Sensors 2010-2014	2010-2011	-4,33	-6,08	**1,75**	483	230	239	532	-1 053
	2011-2012	**-2,42**	**-4,01**	1,58	617	**166**	**452**	**890**	-241
	2012-2013	-3,76	-5,31	1,56	446	175	271	**408**	**-1 110**
	2013-2014	-3,63	-4,81	**1,18**	**617**	**396**	221	759	**10**
	moyenne	-3,54	-5,05	1,52	541	241	296	647	-599
	normale 1969-1998	**-5,77**	**-6,95**	**1,18**	**391**	**210**	**181**		

Tableau 1 – Caractérisation des années hydrologiques (1er octobre-30 septembre) prises en compte dans les deux programmes ANR. En jaune Sensor-Flows (2006-2010) ; en bleu clair Cryo-Sensors (2010-2014).
Dans chaque colonne, les valeurs extrêmes pour chaque programme sont en bleu ou en rouge. Les valeurs sur fond blanc sont les extrêmes des huit années considérées.
Seule l'année 2013-2014 est dans la norme en ce qui concerne les températures positives : c'est l'année la plus fraîche en été, juste à la valeur normale 1969-1998. 2013-2014 détient également le record d'enneigement. Cette double particularité entraîne le seul bilan de masse positif des huit années d'observation. Les deux années très négatives pour le glacier (2012-2013 puis 2010-2011) montrent des bilans 4 à 10 fois supérieurs aux autres : ils s'expliquent par la conjonction de faibles manteaux neigeux suivis d'étés très chaud pour 2011 et très mouillé pour 2013.

Au total donc, depuis le début du premier programme ANR, huit années d'observation. Le programme Cryo-Sensors se déroule dans une configuration météorologique plus « chaude » étés comme hivers. Ces quatre dernières années sont beaucoup plus arrosées que les quatre premières années (globalement dans la normale), avec à la fois le record des huit ans pour la plus faible et la plus forte valeur de précipitations neigeuses. Notons au passage que les valeurs sont au niveau de la mer et n'augure pas de ce qui se passe en altitude, puisque, à ces valeurs extrêmes correspondent des manteaux neigeux importants, dont le plus fort des huit dernières années pour l'année aux precipiations neigeuses les plus faibles. Cela n'a rien d'étonnant puisque nous avons déjà monté [10, 12, 45] que les pluies d'hiver à Ny-Alesund (8 m d'altitude) donnent le plus souvent de la neige sur le glacier.
Ces données générales montrent déjà l'importance du manteau neigeux : plus il est épais à la sortie de l'hiver plus il va protéger le glacier contre la fonte et/ou les précipitations estivales.
Les températures estivales sont en tout cas un élément majeur dans la fonte de la glace. Elle sont très fortes en été 2011, elles le sont aussi en 2012 et 2013 (bien au-dessus de la moyenne) ; en revanche, 2014 qui montre les seules températures estivales dans la norme 1968-1999, affiche le seul bilan de masse positif de ces huit années.

1.2. L'état thermique du glacier Austre Lovén

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. 5).

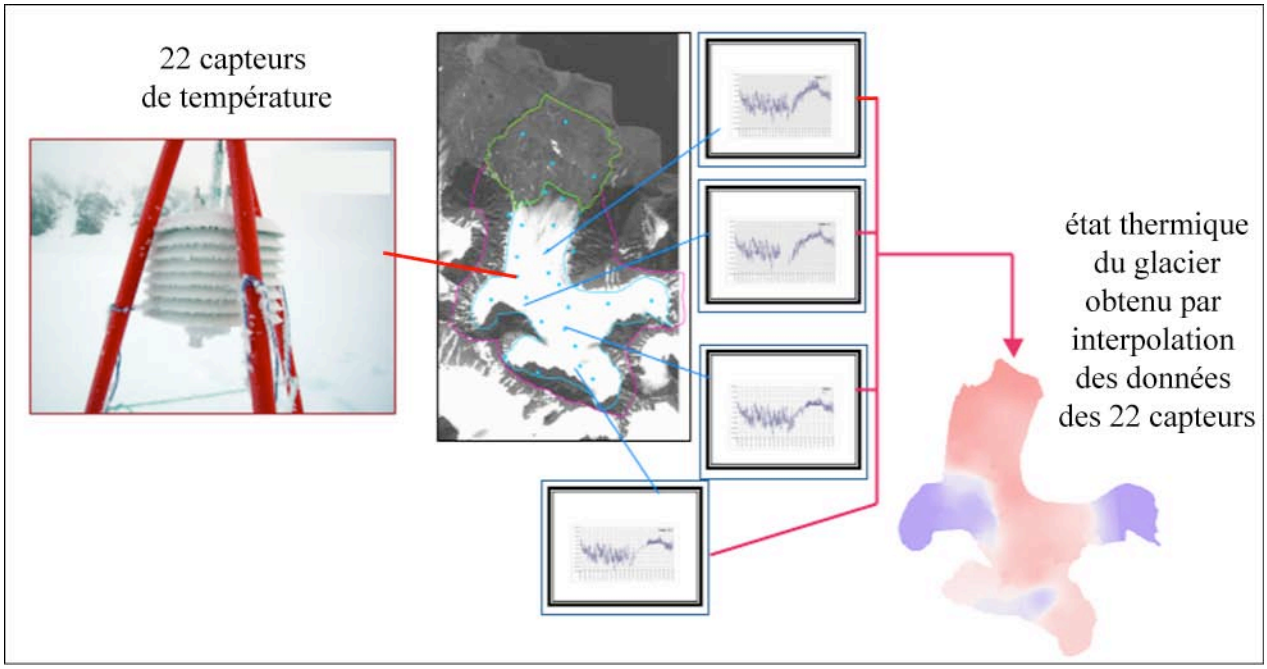


Figure 5 – Détermination de l'état thermique du glacier (pas de temps horaire, soit 9 000 cartes par an). La température est enregistrée heure par heure en 22 points du glacier. Les données sont ensuite interpolées (IDW) pour spatialiser l'information et produire un état thermique du bassin (une valeur 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.

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

Afin d'affiner l'approche hydrologique, nous avons développé depuis 2007 un volet nivo-glaciologique, renseignant, en amont, l'équation des bilans des écoulements. 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 [64].

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). Les 3 clichés par station et par jour issus de notre réseau de 13 stations photos automatiques permettent d'affiner au jour le jour l'information concernant la dynamique du manteau neigeux (Fig. 6).

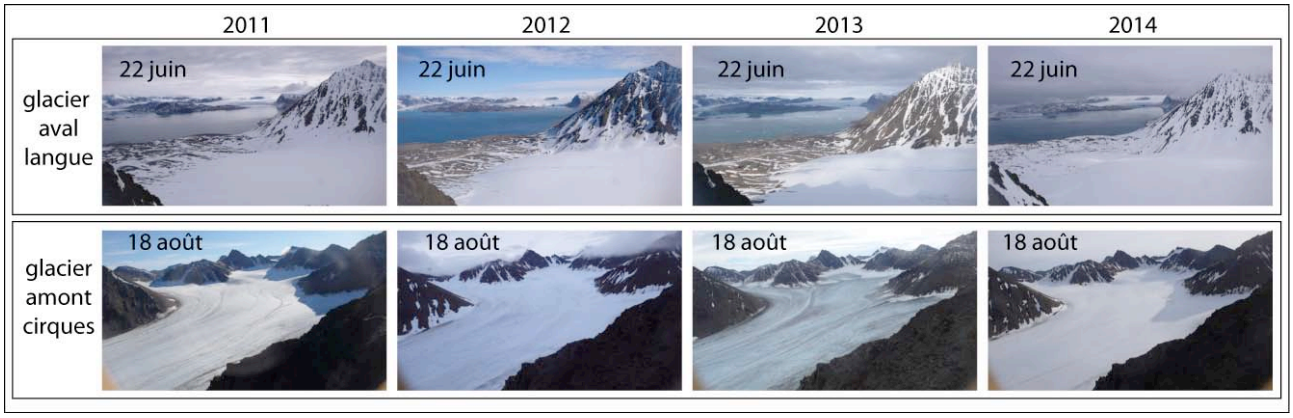


Figure 6 – Suivi de la dynamique du manteau neigeux du glacier Austre Lovén à partir des clichés des stations photos automatiques : comparaison multidates 2011-2012-2013-2014.
2014 est une année tardive pour la fonte sur le glacier et même dans la zone morainique. 2011, 2012 et 2013 sont similaires pour le début de la fonte en juin mais le glacier est beaucoup plus lessivé en août 2011 et 2013 qu'en 2012.

2.1 le suivi à partir des stations photo automatiques

Les photos acquises par nos stations automatiques permettent, une fois orthorectifiées, de faire des délimitations très précises, 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 [7] et d'une publication dans ISPRS [3] en prenant pour exemple l'évolution de la surface du glacier lors de la crue de septembre 2008 (fig. 7).

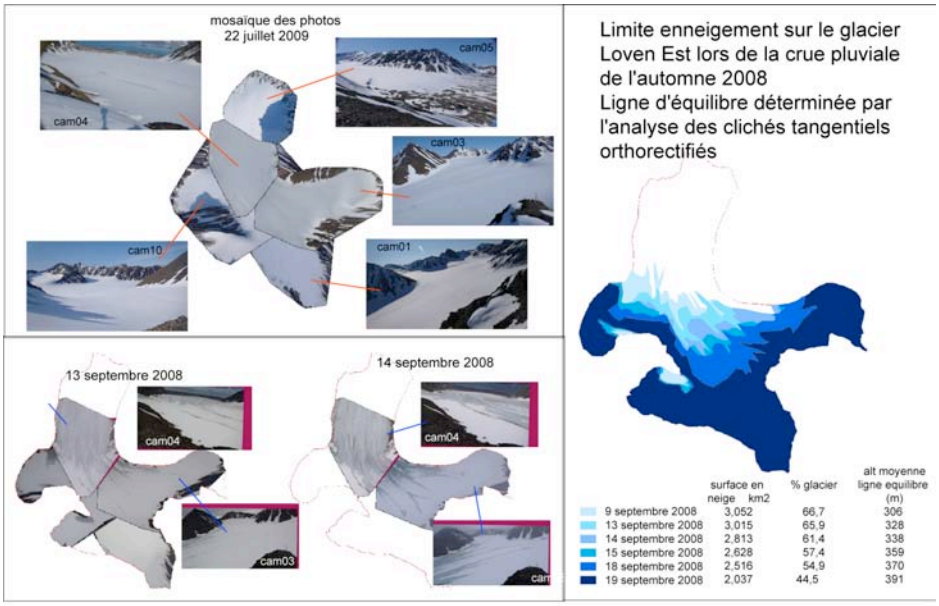


Figure 7- Rectification géométrique des clichés des stations photo automatiques et leur application pour déterminer la limite glace-neige et son évolution lors de la crue de l'automne 2008

Une fois les mosaïques de clichés rassemblées, il est possible jour après jour de définir la fraction de surface du glacier en neige et glace. Les cartes de discrimination neige-glace permettent le suivi très précis de la fonte sur le glacier [3, 64]. Chaque année depuis 2008 sont établies les cartes de discrimination neige-glace (fig. 8) [3, 64].

Figure 8 - Cartes de discrimination neige-glace établies à partir des clichés des stations photo automatiques. L'orthorectification des clichés puis leur assemblage en mosaïques permettent d'établir jour après jour l'état de surface du glacier et donc de déterminer si la fonte affecte la neige ou la glace. A gauche les années de l'ANR Sensor-FLOWS, à droite l'ANR Cryo-sensors
En ce qui concerne les quatre années de Cryo-Sensors, les étés 2011 et 2013 se distinguent par un dégagement précoce du manteau neigeux. Au 29 juillet, le glacier est semblablement découvert. Un épisode neigeux en août 2013 recouvre l'ensemble, mais le glacier est dans le même état le 17 août en 2011 et en 2013, années de fonte maximale de la glace.
En 2012 et 2014 le glacier est protégé plus longtemps par un abondant manteau neigeux qui se reconstitue à 3 reprises pendant l'été 2014 qui affiche le premier bilan de masse positif depuis plus de 20 ans.

2.2. Suivi *in situ* du manteau neigeux

Le monitoring de la dynamique du manteau neigeux repose aussi sur des 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 (Fig 9). Ils permettent de définir des hauteurs de neige au point de mesure, mais aussi, par pesée des carottes retirées, l'équivalent en eau (weq 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 équivalant 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.

Figure 9 – Carottage au drill Pico (à gauche) et pesée in situ *des carottes de neige (à droite)*

Le manteau neigeux a été suivi depuis 2008 (Fig. 9). Les mesures sont effectuées chaque année à la fin avril. Ce n'est pas forcément le maximum mais c'est l'état du manteau avant le début de la fonte qui survient chaque année au tout début de mai.

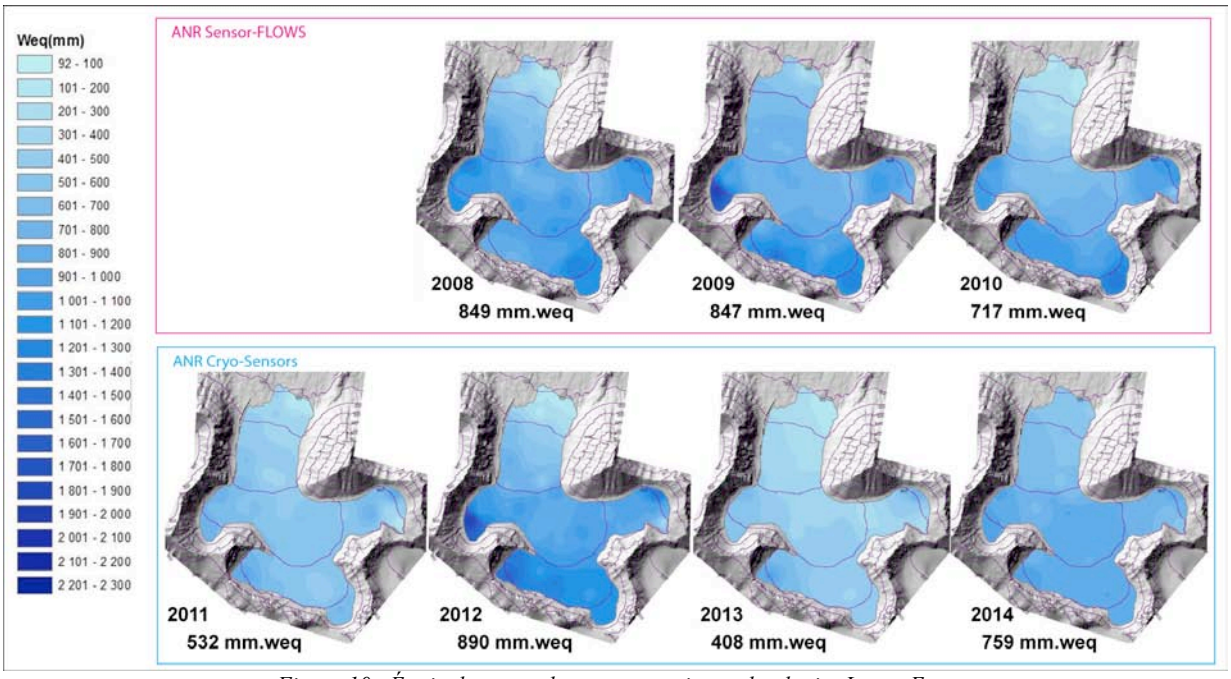


Figure 10 –Équivalent-eau du manteau neigeux du glacier Loven Est
de 2008 à 2010 (ANR Sensor-FLOWS) puis de 2011 à 2014 (ANR Cryo-sensors)
Les données sont interpolées (IDW) à partir de 42 carottages répartis sur la surface du glacier.
Les quatre dernières années affichent à la fois les plus faibles manteaux (2013 et 2011) ainsi que le plus important (2012).

2.3. Les bilans de masse : accumulation-ablation

Les mesures sur les balises d'ablation/accumulation donnent avec précision la variation annuelle en épaisseur du glacier (en cm de glace et en mm d'équivalent eau) : nous avons effectué au total en fin de programme Sensor-Flows trois bilans glaciologiques par mesures physiques aux balises implantées depuis fin 2007, et quatre bilans en ce qui concerne l'ANR Cryo-Sensors. Ces mesures seront mises en relation avec les différences entre les MNT acquis au GPS en 2010 et 2014, 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 (fig 11).

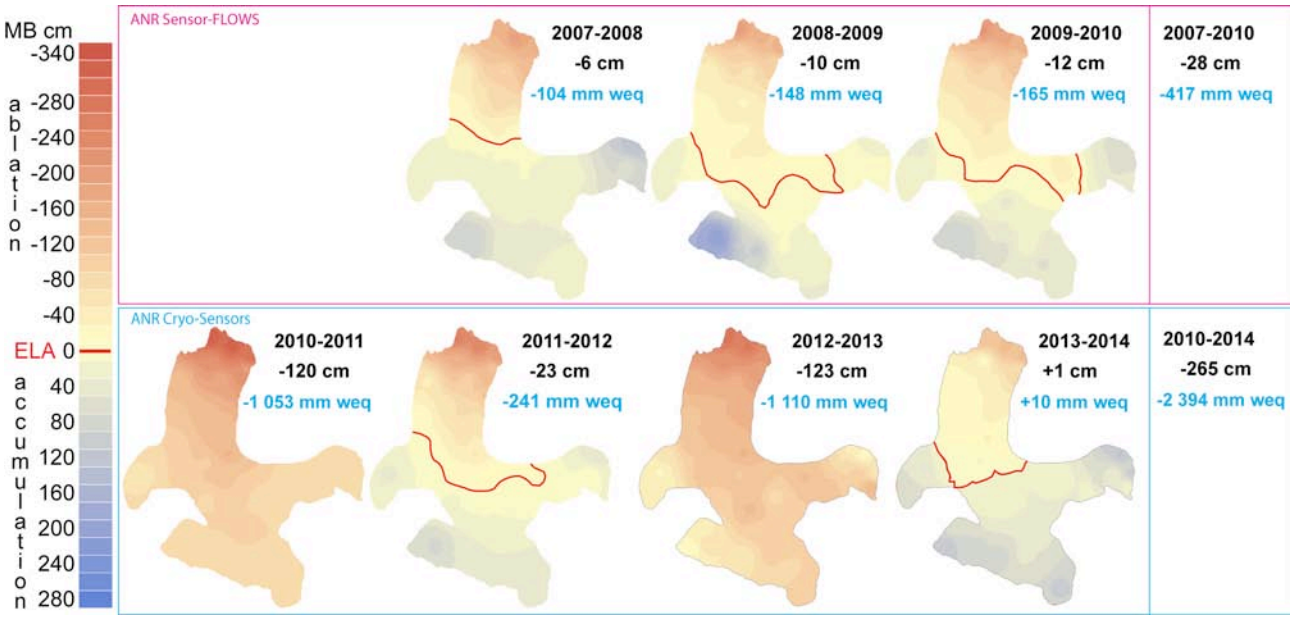


Fig 11 – Bilan glaciologique annuel du Lovén Est de 2008 à 2014.
Mesures aux 36 balises interpolées par IDW à l'ensemble du glacier
Les valeurs de bilan de masse (BM) d'accumulation et d'ablation sont rapportées à la surface globale du glacier

Les premières années (ANR Sensor-Flows), les bilan sont faiblement négatifs, tout à fait dans la « normale » du glacier voisin (Midtre Loven) suivi depuis 60 ans [10]. Les quatre années suivantes (ANR Cryo-Sensors) commencent par un bilan qualifié d'exceptionnel, près de dix fois supérieur à la moyenne des 3 bilans précédents. Cette exception se reproduit en 2012-2013 où le record absolu est battu. L'ensemble du glacier est en ablation comme en 2010-2011. 2011-2012 affiche un bilan un peu plus négatif que la moyenne tandis que 2013-2014 est le seul bilan positif (faiblement) de la période étudiée. Si on en juge par les mesures sur le glacier voisin, cela n'est pas arrivé depuis 1995-1996 (données communiquées par Jack Kolher du NPI), [10].

Une mise en relation avec les données de températures de l'air et des précipitations s'impose (Fig. 12). Elle montre l'importance du manteau neigeux hivernal : plus il est fort plus le glacier est protégé et moins la fonte sera importante. Le croisement avec les températures moyennes relevées à Ny-Alesund montre que des étés chauds et secs (2011) peuvent être aussi dévastateurs que des étés un peu moins chauds mais très arrosés (2013). L'année 2013-2014 doit son bilan de masse positif a un été « frais » suivant un hiver très neigeux renforcé par un été marqué de plusieurs chutes de neige ayant recouvert et protégé durablement le glacier.

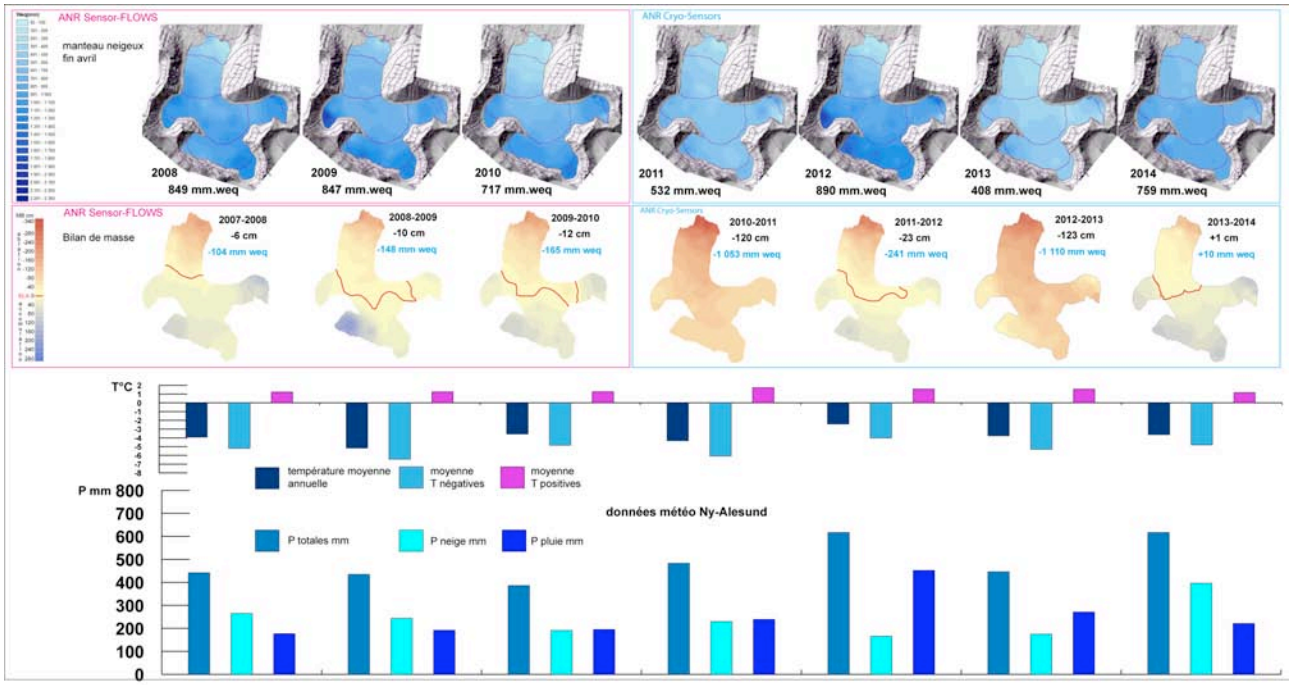


Fig 12 – Bilan de masse du glacier Lovén Est, enneigement hivernal mesuré sur le glacier et données météorologiques annuelles de la station de Ny-Alesund distante de 6 km. Les deux facteurs les plus importants sont l'état du manteau neigeux à la fin de l'hiver et la moyenne des températures positives. Le seul bilan de masse positif survient en 2013-2014 suite à un hiver très neigeux suivi d'un été frais (dans a norme 1970-1999. Les deux bilans les plus négatifs sont dus à de très faibles manteaux neigeux suivis d'été très chaud et sec (2011) chaud et arrosé (2013).

2.4. Le recul du front

Un glacier réagit immédiatement en volume aux fluctuations climatiques. Son retrait en longueur est différé à cause de l'avancée, même lente (4 m / an ici) du glacier dans sa partie terminale [10].
Depuis le début de la première ANR, le recul du front du glacier a été mesuré chaque année au GPS (Fig. 13).

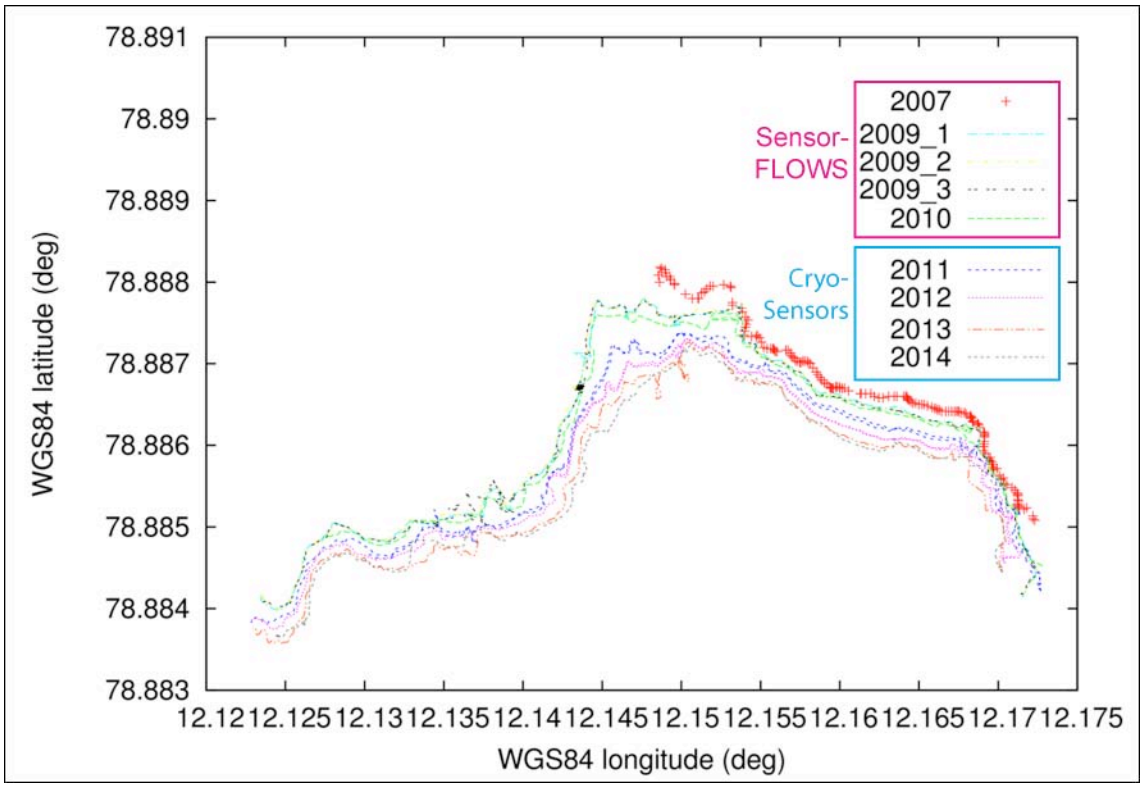


Fig 13 - Évolution de la position du front du glacier observé chaque année au mois de septembre, lorsque l'interface glace-moraine est visible. Le retrait annuel est clairement visible, et particulièrement marqué sur la zone à l'est. Les années de bilan de masse fortement négatif se remarquent aisément malgré l'effet retard.

La fig. 13 illustre le retrait progressif du front du glacier tel qu'observé entre 2007 et 2014 : la relation entre recul du front et ablation est donnée par l'angle de contact de la glace au niveau de la langue. Les régions les plus affectées par la fonte (zone centrale du glacier) correspondent au régions de glace la plus fine où l'angle de contact est le plus élevé. Un recul moyen annuel de 19 m a été estimé pour l'axe central du glacier depuis l'année 1948. Une perte de surface glaciaire moyenne de -0.028 km2 par an a été obtenue en analysant une série de documents anciens (carte, photos aériennes et satellite) et des récentes données par GPS

2.5. Levé au GPS de la surface du glacier et constitution d'un MNT

Les mesures annuelles effectuées aux balises (BM) donnent une indication relative de l'accumulation et de l'ablation à la surface du glacier. Les mesures au GPS permettent de mesurer l'altitude de cette surface et de comparer les variations à long terme.

Dans une publication de 2011 [6] nous avons montré que la barre d'erreur des mesures au GPS n'autorisait pas des mesures annuelles récurrentes. Il faut un délai de trois ans pour que les valeurs de différences soient pertinentes. Avec les deux bilans de masse record de 2011 et 2013, on est tout à fait au-delà de la barre d'erreur. Le MNT établi en avril 2014 dont on déduit la couche de neige et qui donne donc l'altitude de surface de fin d'été 2013 a pu être mis en relation avec le MNT réalisé dans les mêmes conditions en 2010. Les calculs sont en cours et donneront très prochainement les valeurs de perte et gain du glacier entre l'été 2009 et l'été 2013 qui pourront être comparées aux mesures cumulées d'ablation et d'accumulation dans la même période.

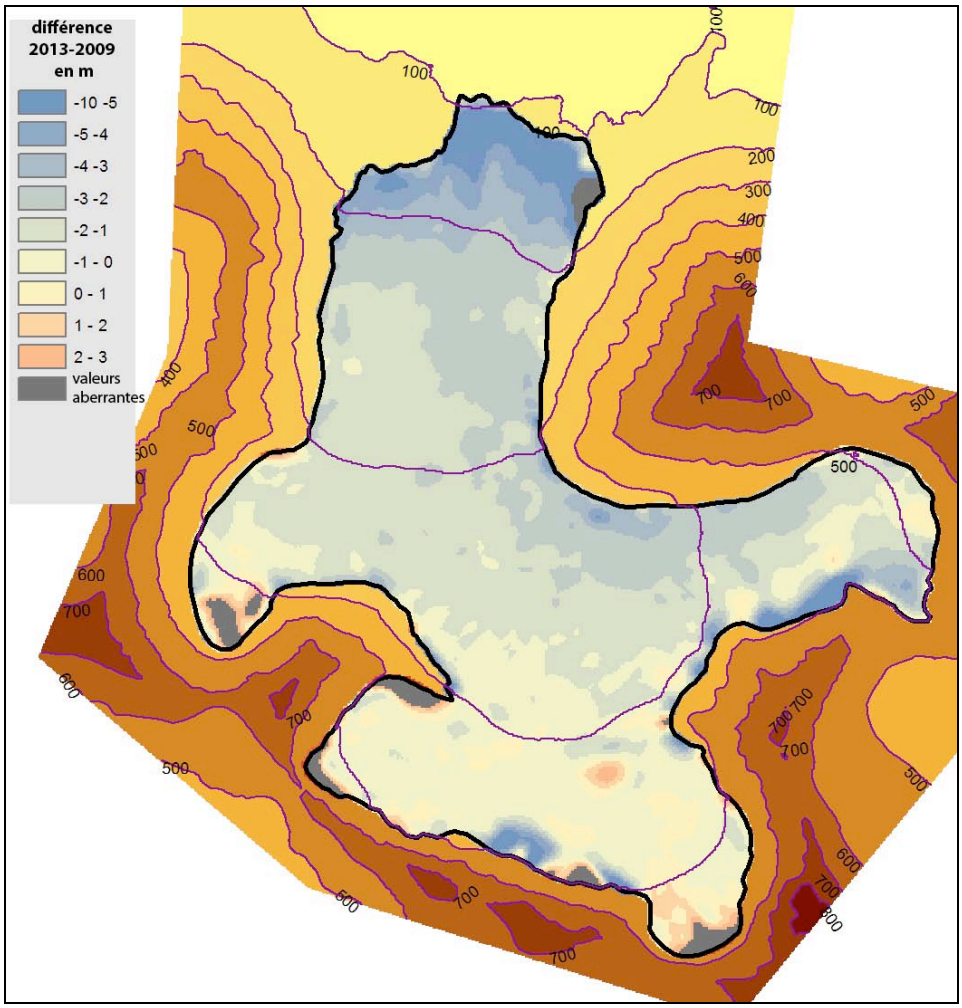


Fig 14 - Différence entre les MNT 2009 et 2013 de la surface du glacier Lovén Est. Le glacier a été sillonné en moto-neige en avril 2010 et avril 2014. Les données acquise au GPS ont été interpolées. On en a soustrait les épaisseurs de manteau neigeux mesurées et interpolées au moment du passage en moto-neige ce qui donne la valeur de la surface du glacier à la fin de l'été précédent. Un lissage a ensuite été effectué pour un meilleur rendu. Les valeurs aberrantes ont été grisées et correspondent a des zones difficilement accessibles où on a donc peu de points ce qui entraîne d'inévitables artefacts.

2.6. Les lames de fonte

En croisant les données des capteurs de températures et celles des stations photos indiquant l'état de la surface du glacier (neige ou glace), on peut déterminer pour chaque jour le potentiel thermique pour la fonte de la neige ou de la glace (Fig. 15).

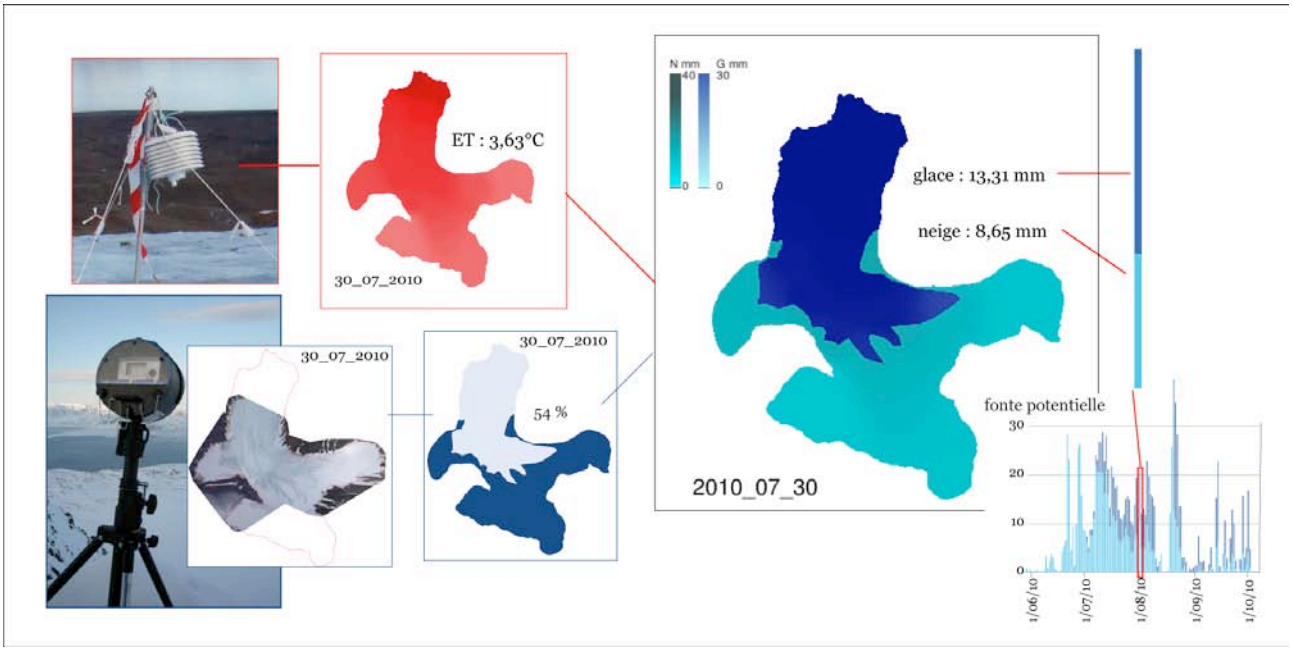
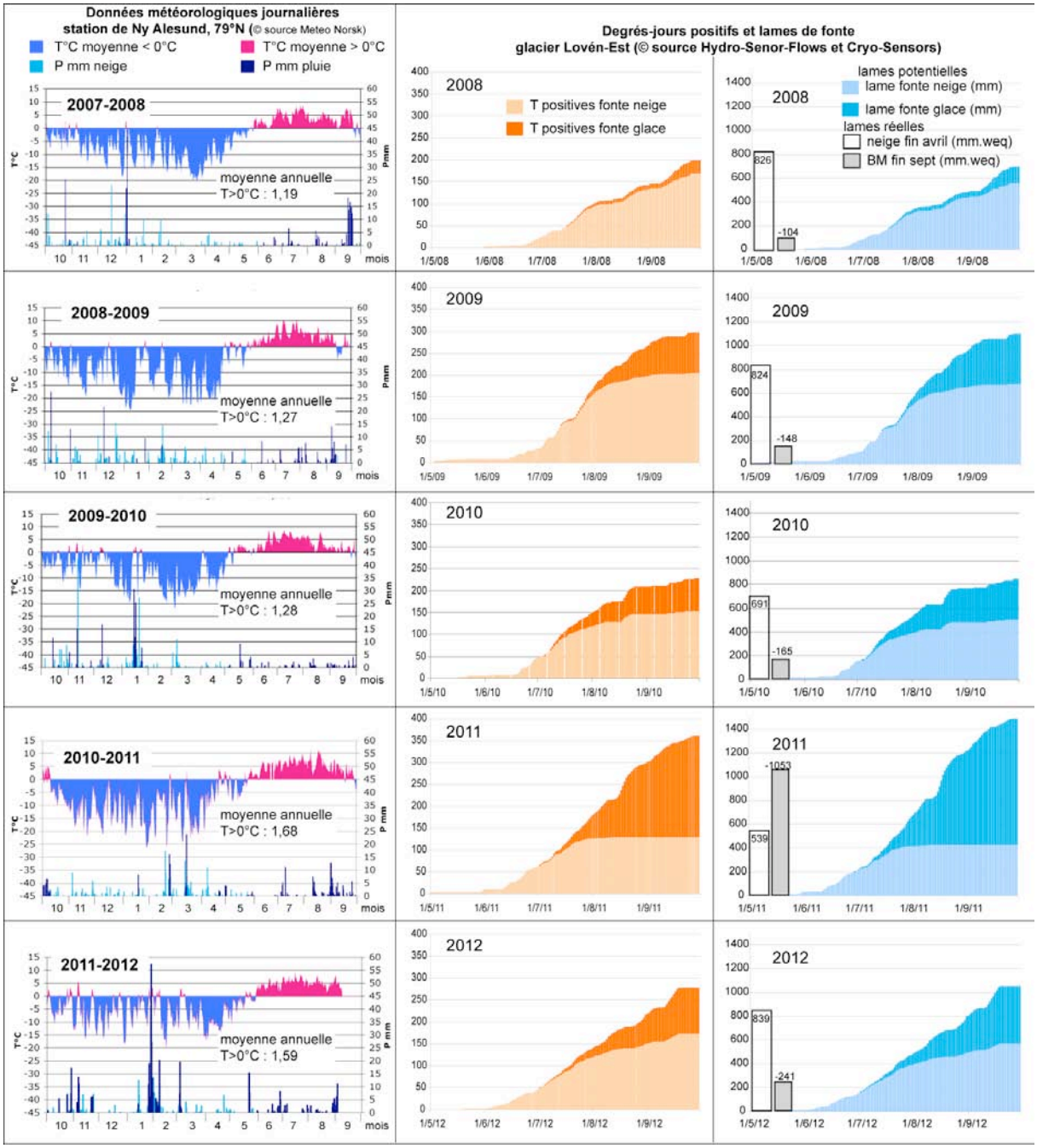


Fig 14 - Spatialisation d la fonte potentielle : les données interpolées des capteurs de températures sont croisées avec la carte binaire (neige / glace) de l'état de surface du glacier, pour obtenir une carte de la fonte potentielle en chaque point. La résultante de cette carte donne la lame de fonte potentielle due à la neige et due à la glace, rapportée ici à la surface du glacier. Ces lames traitées au pas horaires peuvent être ramenées à l'échelle de la journée [64].

Ces lames de fontes sont établies avec des coefficient de fonte K couramment utilisés mais sans doute peu adaptés aux conditions de fonte de l'Arctique. Les cartes cumulées de la fonte potentielle permettent néanmoins de voir comment le manteau neigeux est protecteur et comment les étés chauds sont destructeurs si le glacier n'est plus en neige. Les traitements sont en cours pour les étés 2013 et 2014 (Fig. 15).



Fi.g 15 – Cinq étés successifs de fonte sur le glacier Lovén Est. Degrés-jours positifs et lame de fonte, obtenus à partir d'un réseau de 20 capteurs sur le glacier [source HSF], en regard des données météorologiques de Ny-Ålesund (6 km plus à l'ouest), [source MeteoNorsk]. Aux lames de fonte potentielle déduite de l'état thermique sont confrontés les mesures réelles d'accumulation de neige (fin avril) et de bilan de masse (gain ou perte en glace) fin septembre [63].

En chaque point des 20 capteurs de températures, on peut suivre la fonte réelle, ce qui permet de définir les coefficients de fonte effective (F mm = K (mm/°C) T(°C). Cela fera l'objet d'un prochain article et communication. Les résultats préliminaires montrent que plutôt que les habituels coefficients K de 3 et 4,2 donnés respectivement pour la neige et pour la glace, on est ici dans des valeurs récurrentes pour la fonte de la neige de 4,6 mm/°C. Pour la glace, on obtient deux valeurs très distinctes : la glace du front très chargée de débris fait corps noir affiche des coefficients de fonte très élevés (8,4 mm/°C) et plus faibles pour la glace propre de l'ensemble du glacier (3,72 mm/°C).

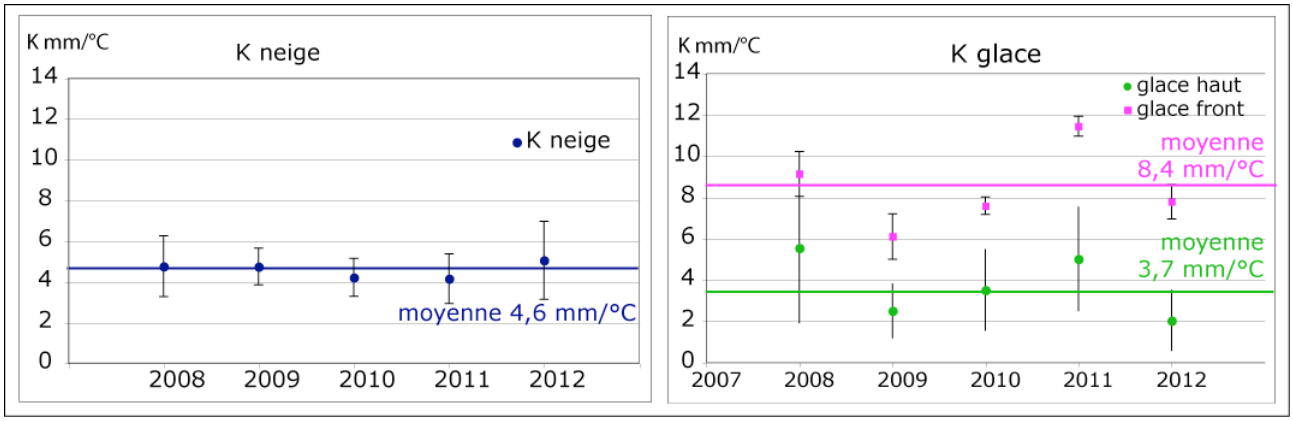


Fig. 16 – Coefficients de fonte K établis sur le glacier Lovén Est aux 20 points de mesures de la températures. Pour la neige où que ce soit à la surface du glacier, le coefficient de fonte affiche une constante récurrente chaque année de 4,7 mm/°C en moyenne. Pour la glace, il faut distinguer la glace chargée de débris du front qui fait corps noir où le coefficient atteint en moyenne 8,4 mm/°C alors que la glace propre sur l'ensemble du glacier est affectée d'un coefficient de fonte en moyenne de 3,7 mm/°C pour les 5 années d'observation

3. Suivi hydrologique du bassin versant du Lovén Est

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

- La Goule, principal 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 zone morainique proglaciaire (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 depuis 2007 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). La décision de l'institut polaire de nous empêcher de nous rendre sur place en été 2011 a considérablement pénalisé l'étude hydrologique. Les conditions difficiles de terrain ont conduit aussi à une perte d'une partie des instruments durant certains événements de crue importants ou à la dégradation des capteurs de pression par le gel certaines années (par ex. 2013). Ainsi, pour compléter les hydrogrammes (début et fin de saison, période de lacune d'enregistrement), une méthode innovante de reconstitution des débits à partir de photos de l'exutoire principal a été développée dans le cadre du projet [65].

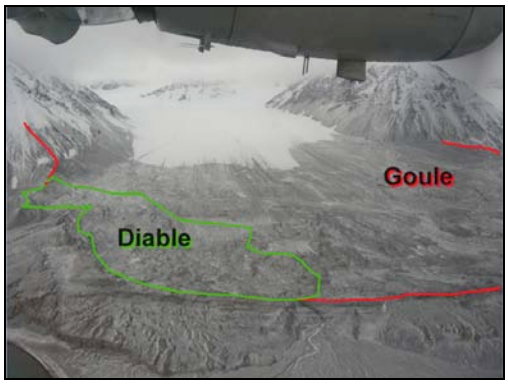


Figure 17 – La Goule, exutoire du glacier Lovén Est, et le Diable, bassin intramorainique déconnecté du glacier

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) ;
3. des photos de l'exutoire.

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). Chaque année suivant l'établissement de cette courbe, donc pendant l'ANR Cryo-Sensors, des mesures de débits par jaugeage au sel ont été effectuées pour recaler les hauteurs des sondes [65].

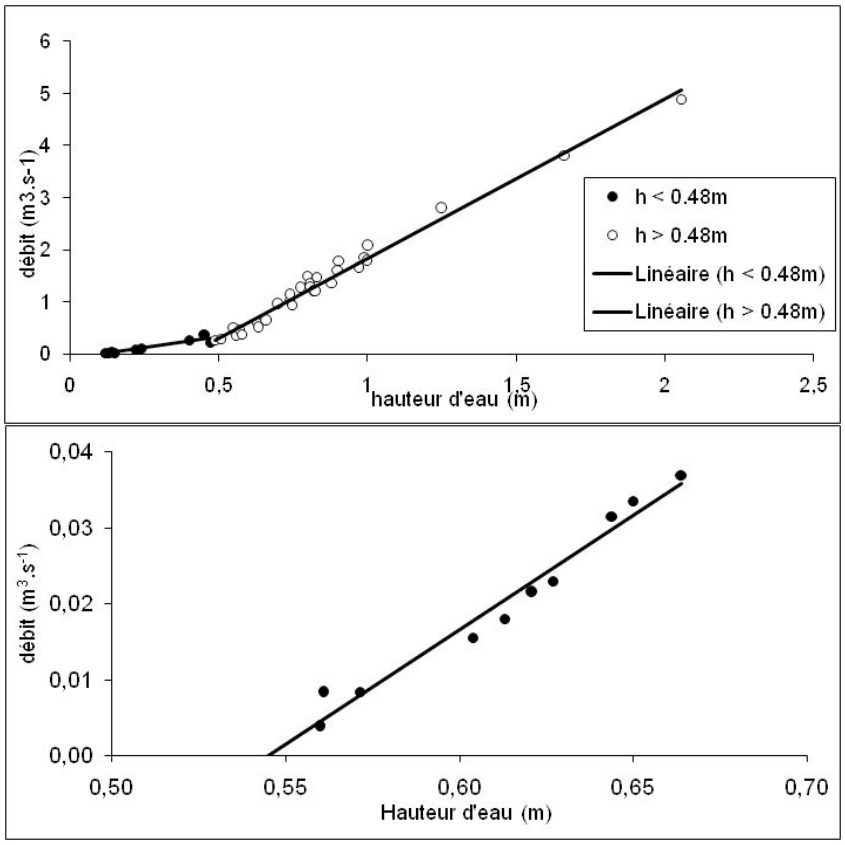


Figure 18 – Courbes de tarage établies pour la Goule (haut) et le Diable (Bas) à partir de mesures ponctuelles de débits réalisées durant trois étés successifs (2008, 2009 et 2010).

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. 19). Cette géométrie est rarement rencontrée dans l'Arctique.

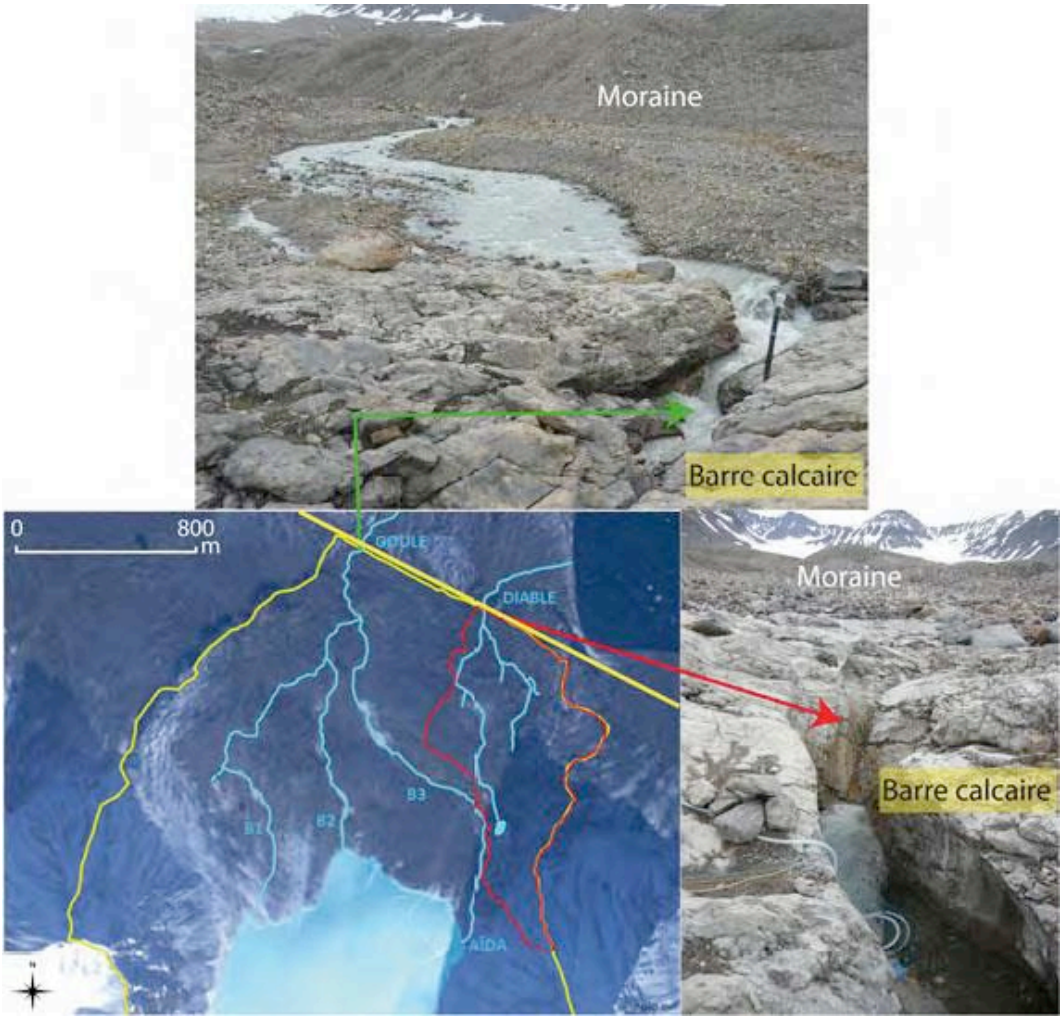


Figure 19 – Vue de La Goule à l'exutoire du bassin versant (haut) et du Diable (à droite).

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). La lame d'eau écoulée moyenne est de l'ordre de 1 m par an mais montre une variabilité importante d'une année à l'autre (0,4 à 1,1 $m.a^{-1}$). Les écoulements surviennent sur une période de 141 jours en moyenne, avec une faible variabilité interannuelle (de l'ordre de 4,5 jours), et comprise entre les 9-10 mai et les 26-27 octobre. Cette période peut être considérée comme l'année hydrologique dans cette région.

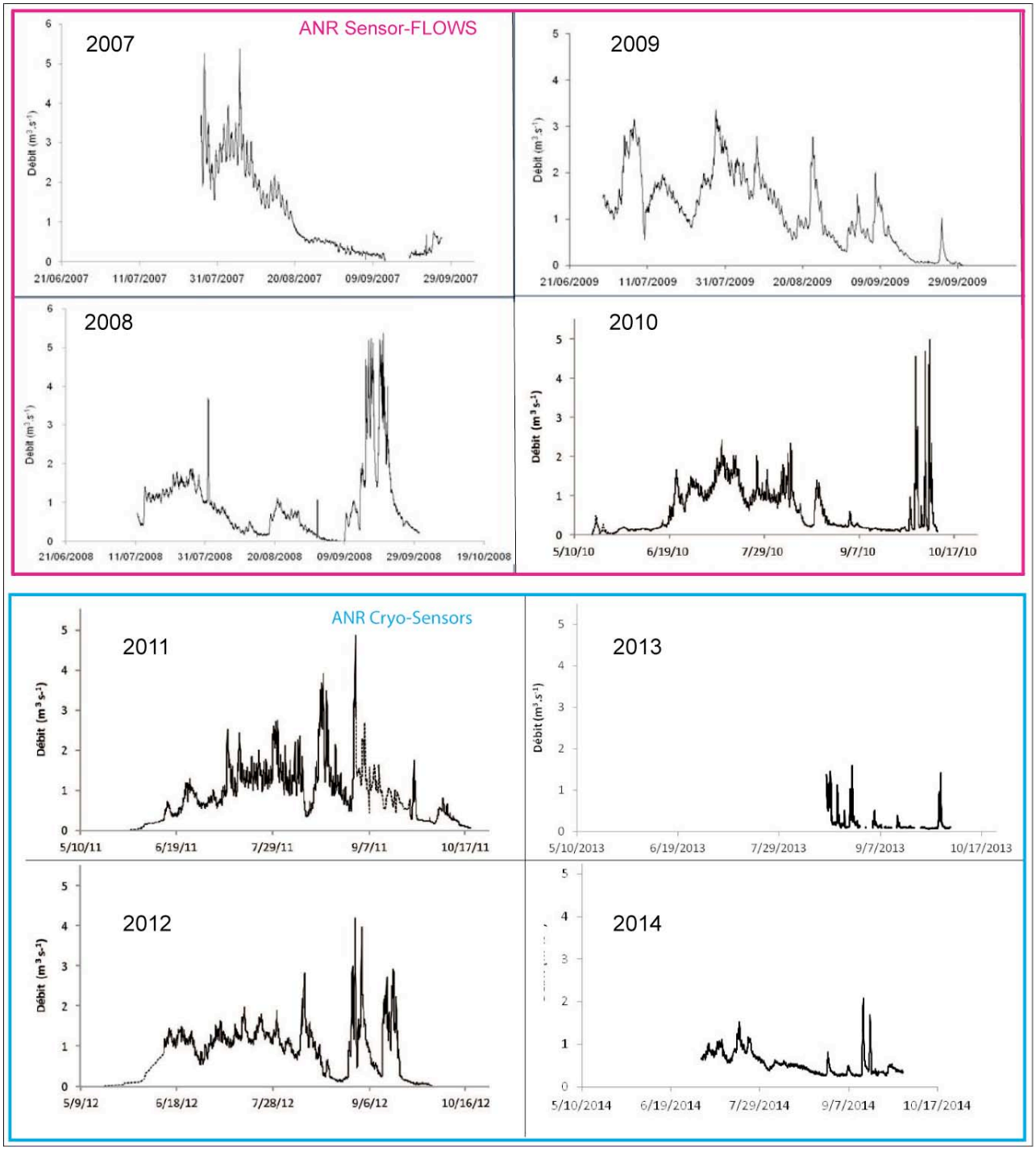


Figure 20 – Suivi du débit de la Goule durant les étés 2007 à 2014. Les hydrogrammes diffèrent fortement d'une année à l'autre car liés à la variabilité des paramètres climatiques : la température de l'air contrôle la fonte et la pluie contribue directement et rapidement aux écoulements, spécialement en fin de saison lorsque le sol est déjà gelé. 2013 et 2014 seront complétés par l'analyse des clichés de la station photo de la Goule.

Les chroniques de débits à l'exutoire de la Goule peuvent être divisées en trois périodes d'écoulement : (1) la période de mise en eau du système qui présente des débits globalement inférieurs à 0,5 $m^3.s^{-1}$ et constitue entre 1 à 5 % des lames d'eau totales annuelles ; (2) la période du cœur de saison de fonte avec des débits majoritairement supérieurs à 0,5 $m^3.s^{-1}$, produisant 70 à 90 % des flux d'eau annuels ; (3) la période d'étiage

qui présente des débits qui redeviennent inférieurs à 0,5 $m^3.s^{-1}$, à l'exception d'événements thermiques ou pluviométriques de fin de saison, et qui contribue à la lame d'eau totale annuelle à hauteur de 10 à 30 %.

L'étude de la dynamique des écoulements de surface confirme le lien étroit existant entre débit à l'exutoire et les paramètres climatiques. La température de l'air est le paramètre qui contrôle la composante principale à l'écoulement : la fonte. En moyenne (hors année 2014 qui est une année froide), l'eau de fonte constitue en effet 79 % des flux d'eau sortant (moyenne sur 3 ans), soit 54 % de fonte de neige et de glace sur le glacier, 18 % de neige sur les versants et 7 % de neige dans la zone proglaciaire (Fig. 21). Les hauteurs de précipitations efficaces estivales (précipitation corrigée des effets d'altitude – évaporation) sont responsables de 18 % des écoulements. L'alimentation par les eaux sous-glaciaires représenterait 3 % de la lame d'eau totale annuelle écoulée. Dans le bilan en eau du bassin, il n'est pas possible de statuer sur une contribution potentielle de la fonte du pergélisol et/ou du stockage/vidange de la nappe libre au vu (1) des incertitudes élevées sur la quantification des composantes de l'écoulement et de la lame d'eau écoulée elle-même (2) des mesures piézométriques et thermiques réalisées indiquant que la nappe est d'avantage un réservoir de transit de l'eau que de stockage. Quoi qu'il en soit, la fonte du pergélisol, si existante, doit être réduite étant donné que le bilan hydrologique peut s'expliquer avec les 5 paramètres utilisés : hauteurs de précipitations estivales (- évaporation), fonte sur le glacier (neige et glace), fonte nivale des versants et de la zone proglaciaire et décharge sous-glaciaire.

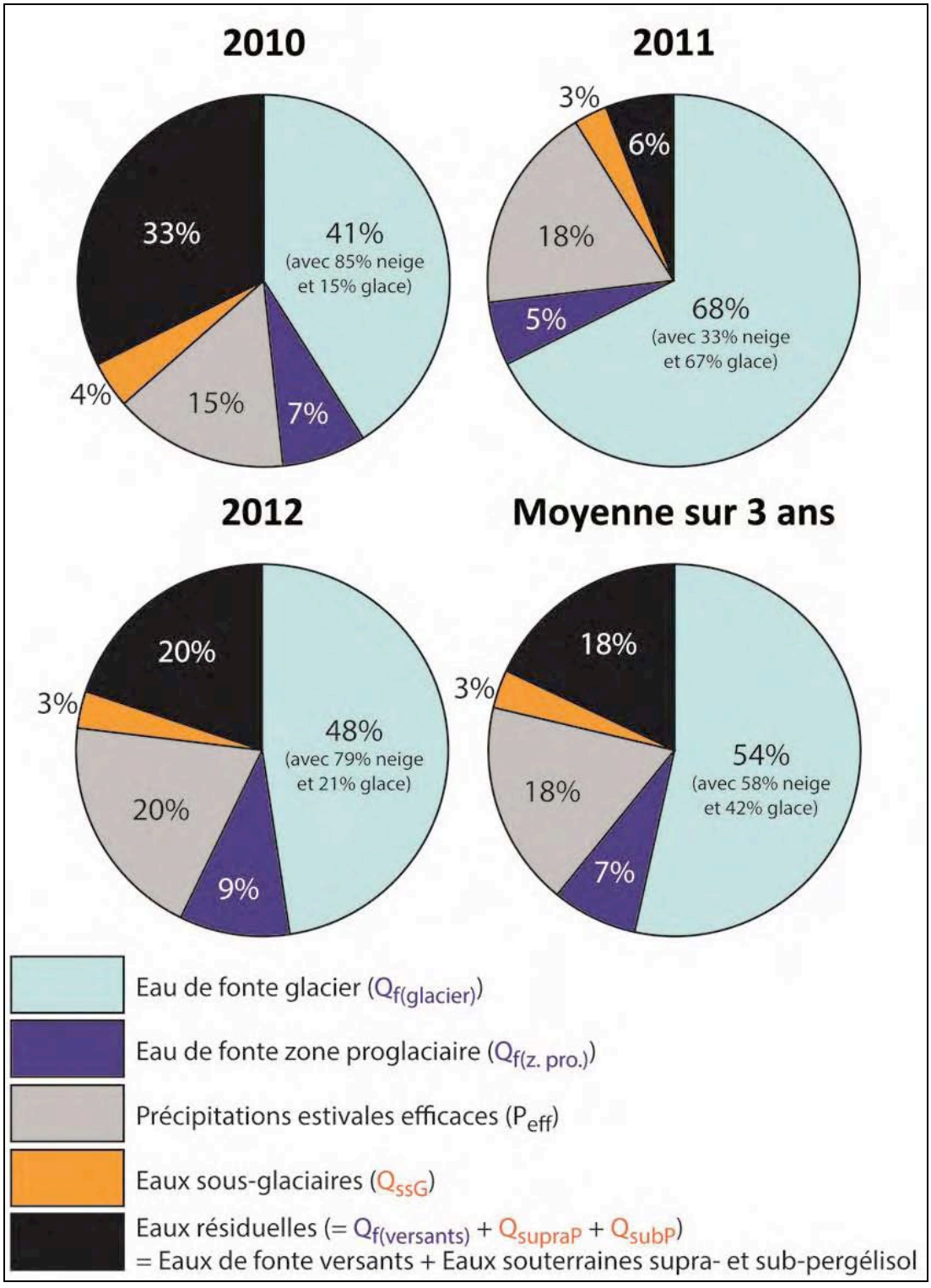


Figure 22 – Bilans hydrologiques du sous-bassin versant de la Goule pour les saisons hydrologiques 2010, 2011 et 2012 et bilan hydrologique moyen sur trois ans avec les parts respectives (%) à l'écoulement des différentes composantes du système hydrologique ($Q_{f(glacier)}$, lame de fonte en provenance du glacier, $Q_{f(z.\ pro.)}$, lame de fonte en provenance de la zone proglaciaire, $Q_{f(versants)}$, lame de fonte en provenance des versants, P_{eff}, précipitations efficaces estivales, Q_{ssG}, lame d'eau sous-glaciaire, Q_{supraP}, lame d'eau souterraine supra-pergélisol, Q_{subP}, lame d'eau souterraine sub-pergélisol). D'après Quenet [65].

La fonte de la neige et de la glace du glacier n'explique pas à elle seule l'intégralité des débits du cours d'eau enregistrés à l'exutoire du sous-bassin versant glaciaire, mais y contribue toutefois fortement. En effet, la comparaison interannuelle des paramètres climatiques avec les débits (Fig. 22) montre que la température moyenne de l'air sur le glacier pendant l'été présente une meilleure relation avec la lame d'eau écoulée que les hauteurs de précipitation d'été.

Année	Q (mm a^{-1})	T moy glacier (°C)	P eff (mm)
2008	806	-	247
2009	763	0,26	178
2010	771	0,30	116
2011	1077	0,80	193
2012	774	0,45	191
2014	478	-0,06	196

En 2013 : suite à la perte des sondes de mesures, nous n'avons pas de données de débits mesurés sur une grande partie de l'été 2013.

Figure 22 – Données annuelles de débits à l'exutoire (la Goule), température moyenne sur le glacier et hauteurs de précipitations efficaces durant la période du 10 mai au 27 octobre (période d'activité hydrologique).

A partir de ces données, une relation entre débit annuel à l'exutoire du bassin versant (Q) avec les paramètres climatiques T (température moyenne sur le glacier) et P (précipitations efficaces = les précipitations sur le bassin versant moins l'évaporation) a pu être établie :

$$Q\ (m^3\ a^{-1}) = 668{,}4\ T\ (°C)\ -0{,}70\ P\ (mm) + 660{,}4\ (r = 0{,}98\ ;\ n = 5)$$

En matière de géochimie, le couplage des teneurs en SO_4^{2-} et en ^{18}O s'est avéré être de bons traceurs en vue de comprendre les mélanges d'eaux aux exutoires. Les eaux de l'exutoire de la Goule résultent d'un mélange entre 4 pôles d'eau dont les parts respectives varient au cours de la saison hydrologique : les précipitations estivales, les eaux de fonte, les eaux sous-glaciaires et les eaux souterraines.
- (1) Les eaux de début de saison hydrologique lors de la période de mise en eau du système seraient constituées d'un mélange entre les pôles des précipitations estivales, des eaux de fonte et des eaux sous-glaciaires en étant d'avantage proche de celui des eaux de fonte. L'absence du pôle eaux souterraines aux écoulements s'explique par le fait que la couche active n'est pas encore dégelée à cette époque de l'été et donc que le réservoir des eaux souterraines n'est pas encore actif.

- (2) Les eaux appartenant à la période hydrologique du cœur de la saison de fonte répondent à un mélange entre eau de fonte et précipitations estivales. Or, la part des eaux de fonte étant largement majoritaire au cours de cette période, il est peu probable que la signature des eaux de pluie soit détectable ;

- (3) les eaux appartenant aux périodes d'étiage de fin de saison ont des signatures cohérentes avec un mélange entre les 4 pôles. L'impact des eaux sous-glaciaires et souterraines est visible du fait de la réduction de la lame de fonte.

Cette décomposition des eaux de l'exutoire de la Goule constitue donc un argument supplémentaire pour conclure sur le fait que les eaux souterraines et les eaux sous-glaciaires ont un impact sur les flux d'eau et de solutés à l'exutoire du sous-bassin versant glaciaire de la Goule. L'impact du réservoir d'eaux souterraines n'est toutefois vraiment observable qu'à la fin de la période d'écoulement tandis que le réservoir des eaux sous-glaciaires semble impacter visiblement la signature des eaux de la Goule au début et à la fin de la saison hydrologique. Au cours du cœur de la saison de fonte, les signaux isotopiques et géochimiques des pôles eaux souterraines et eaux sous-glaciaires sont masqués par celui du pôle majoritaire à l'écoulement qui n'est autre que les eaux de fonte.

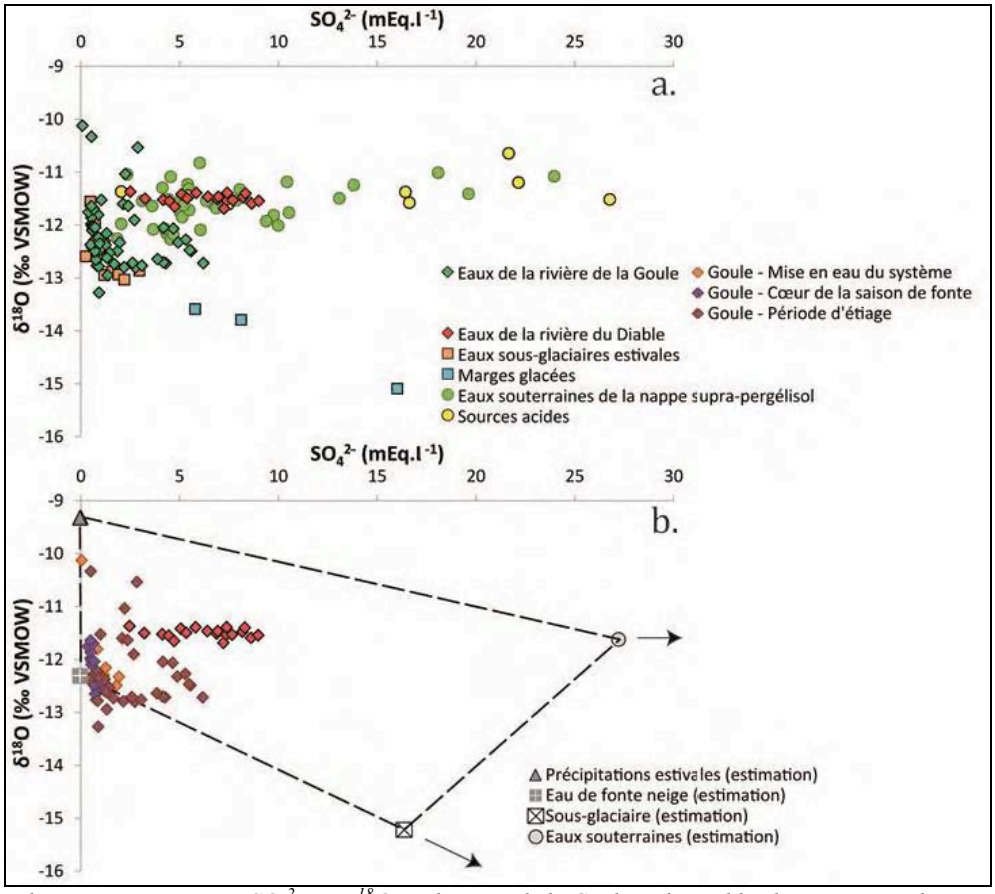


Figure 23 – Relation entre teneurs en SO_4^{2-} et en ^{18}O a. des eaux de la Goule et du Diable, des eaux sous-glaciaires et des eaux souterraines échantillonnées au cours des étés 2010, 2011 et 2012 ; b. des eaux de la Goule détaillées en fonction de leur appartenance aux différentes périodes d'écoulement (mise en eau du système, cœur de la saison de fonte et période d'étiage) et du Diable. Les signatures des eaux aux deux exutoires sont dans une zone de mélange entre les précipitations estivales, l'eau de fonte (neige), les eaux sous-glaciaires et les eaux souterraines. (d'après Quenet [65]).

3.3. Rivière Diable : exutoire secondaire drainant une partie de la zone proglaciaire

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. 24 *versus* Fig. 20). Son étude a permis de mieux comprendre le rôle de la moraine (avec trois compartiments : la neige, la nappe supra-pergélisol et le pergélisol même) dans les écoulements.

Les débits mesurés sont nettement inférieurs à ceux de l'exutoire principal du BV avec des valeurs, n'excédant généralement pas 0,05 $m^3.s^{-1}$. Même si peu de données ont été acquises durant l'été 2013, il a été important de voir que durant cet été-là, des débits dépassant 0.1 $m^3.s^{-1}$ suite à un changement de direction des cours d'eau. En dehors de l'année particulière 2013, le Diable influence peu le bilan hydrologique. Ses débits sont relativement constants et ne reflètent pas directement les variations climatiques, 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. L'écoulement observé correspond à la décharge de la nappe supra-pergélisol, rechargée lors de la fonte de la neige dans la zone proglaciaire (Fig. 24).

La comparaison des débits spécifiques du sous-bassin versant glaciaire (Goule) avec ceux du sous-bassin versant morainique (Diable) montre une forte disparité : la décharge d'eau de la zone proglaciaire, de l'ordre de 0,024 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ est trois fois plus faible que la décharge du bassin présentant une zone glaciaire (moyenne sur trois saisons à 0,077 ± 0,014 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$). La présence du glacier dans le sous-bassin de la Goule explique cette différence : le glacier est un château d'eau potentiel à l'écoulement qui se mobilise pendant la période estivale.

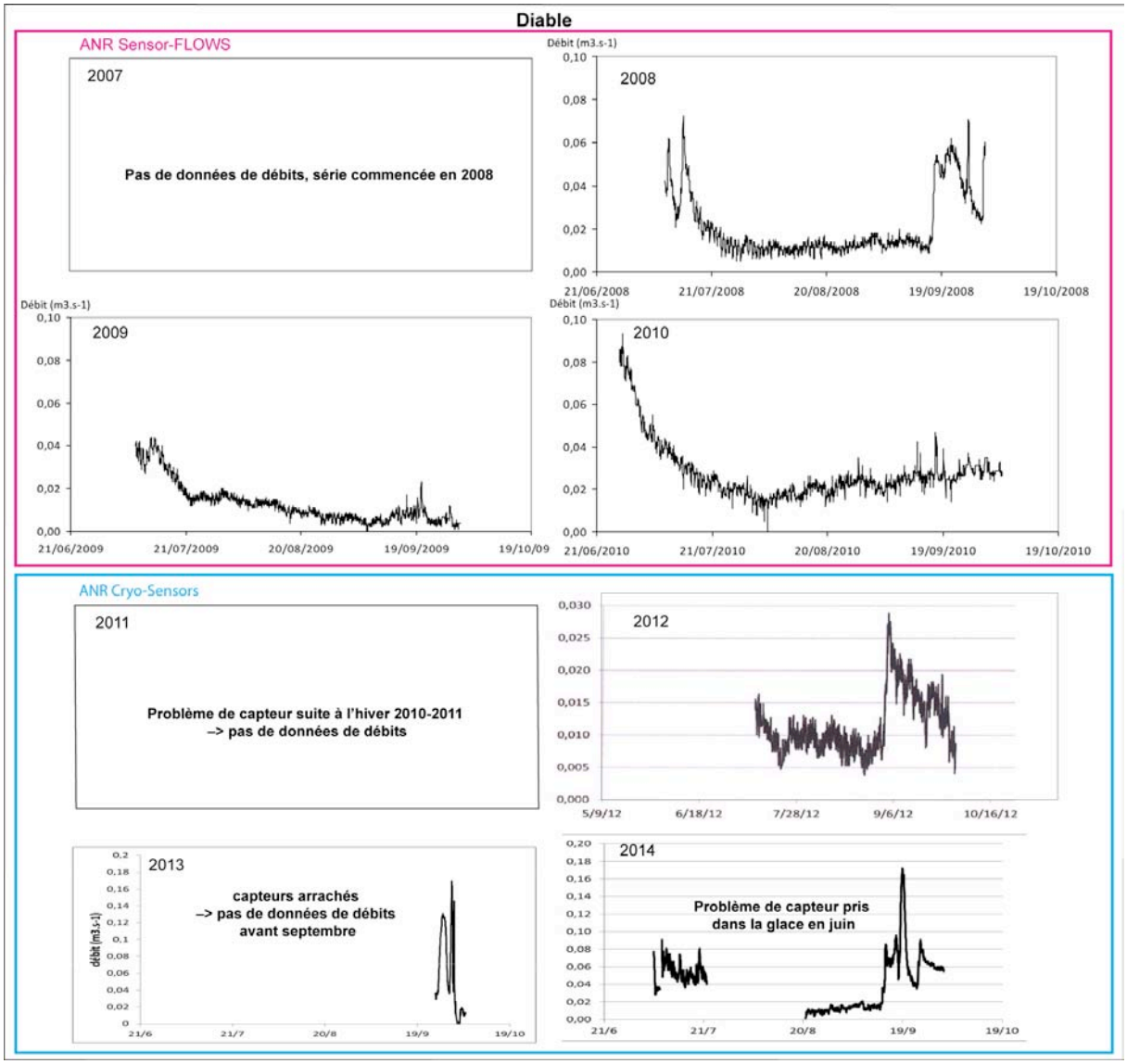


Figure 24 – Suivi du débit du Diable durant des étés 2008, 2009 et 2010 (ANR Sensor-Flows). La moindre présence sur le terrain imposée au cours de l'ANR Cryo-Sensors a entraîné beaucoup de perte de données au cours des quatre années suivantes.

4. Les mesures au GPR et la photogrammétrie

Les mesures par RADAR de sol (*Ground Penetrating RADAR* – GPR) se sont poursuivies, en particulier au cours des missions d'avril pendant lesquelles les déplacements sur le glacier sont facilitées. Une cartographie du fond rocheux selon les deux transects représentatifs des grands axes du glaciers. L'objectif de cette séquence de mesures était d'une part d'analyser la reproductibilité des mesures, et d'autre part de rechercher l'occurrence de structures sous glaciaires liées à la vidange d'un lac supraglaciaire observé par photographies par ailleurs.

Parmi les interrogations induites par les mesures des propriétés de la glace en contact avec le lit rocheux, des réflecteurs s'apparentant à la *warm ice* (ou *temperate ice* dans la référence sur laquelle nous basons notre protocole expérimental, et en particulier les coordonnées des transects parcourus) observée sous le glacier voisin Midtre Lovéenbreen pose la question de l'origine de ces réflecteurs et leur interprétation concernant la nature de l'interface glace-roche. La région de *temperate ice* définit la région pour laquelle la glace atteint la température de 0^o C, avec les implications sur la température et la lubrification de l'interface glace-roche sous cette région. En dehors de cette région, la glace (et donc le sous-sol) présentent des températures inférieures à 0^o C. L'impact et la signature de cette région de glace à 0^o C, mais surtout l'origine de sa formation, restent des questions ouvertes (pression, puisque cette glace est observée dans les régions les plus profondes du glacier, friction, puisque cette glace est observée à l'intersection de cirques et du glacier principal ?).

4.1 Analyse des données acquises dans la moraine

Une analyse de profils acquis dans la moraine en septembre 2013 – l'automne étant la seule période propice à l'identification d'une couche active dégelée et de la nappe d'eau souterraine – indique la présence d'interfaces entre 1 et 2,5 m. La première interface semble se situer à une profondeur compatible avec les mesures aux piézomètres de la profondeur de la nappe. Cette analyse a été complétée en septembre 2014 par des profils complémentaires ainsi que des mesures CMP afin d'identifier la permittivité du sol.

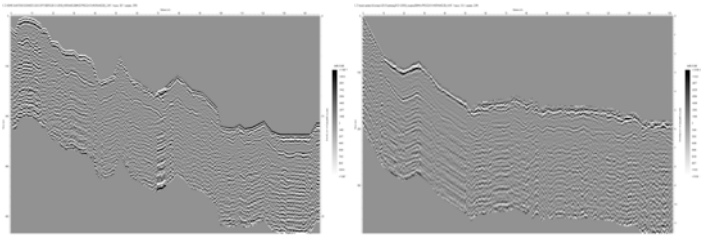


Fig. 25 – Ces RADARgrammes acquis dans la moraine, avec une tentative de correction topographique qui ne permet néanmoins pas de rendre les interfaces planes, semblent soit indiquer une précision insuffisante sur la mesure d'altitude, soit des interfaces qui suivent la topographie.

4.2 Analyse des données acquises sur le glacier

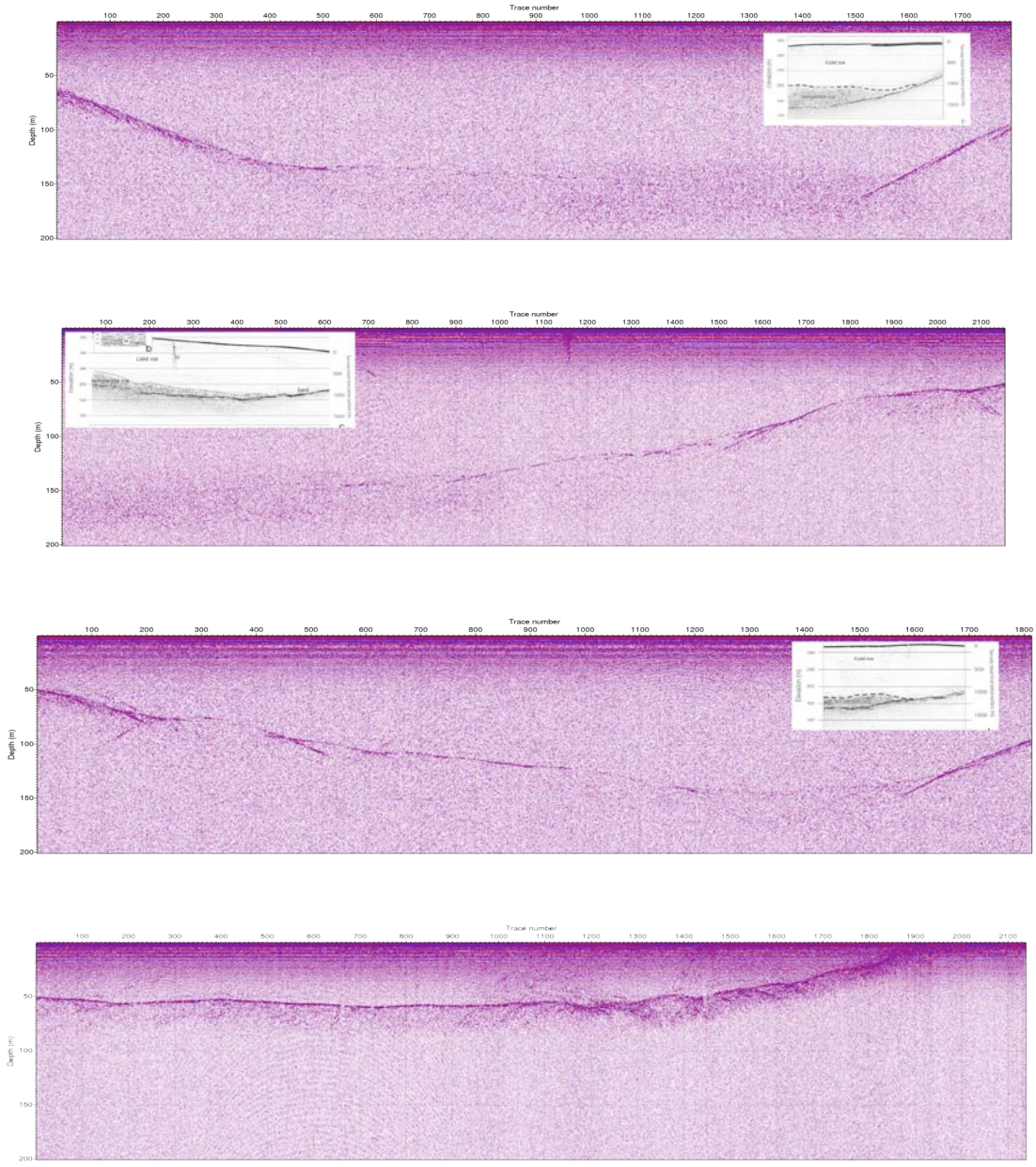


Fig. 26 – Cartographie du Midtre Lovénbreen à la recherche de signatures de la warm ice au moyen de notre matériel pour comparaison avec les figures proposées dans la littérature, fournies en insert de chaque graphique. Les trois transects du haut présentent les réflecteurs enfouis attribués à la warm ice (abscisses de 900 à 1500 m et 0 à 800 m respectivement), le transect du bas acquis lors du retour du glacier vers la moraine ne présente pas de telles structures.

La mission d'avril 2013 s'est focalisée sur la comparaison des mesures acquises avec notre matériel par rapport aux données publiées sur le glacier voisin du Midtre Lovénbreen d'une part, et sur une comparaison des résultats acquis sur ce glacier avec notre propre jeu de données, en se focalisant en particulier sur une zone de réflecteurs profondément enfouis sous la glace, et identifiée dans la littérature sous la nomenclature de *warm ice*. Ces analyses sont complétée en septembre afin d'observer d'une part si la réflectivité dépend de la saison – un résultat improbable compte tenu de la profondeur des réflecteurs dans la glace – mais surtout pour localiser avec précision la position et l'extension de ces réflecteurs (Fig. 27).

Nos analyses des données acquises par GPR en vue de cartographier le fond rocheux et l'épaisseur de glace se sont heurtées à une incohérence : les versants des montagnes entourant le glacier, formé d'éboulis de roches, ne présentaient pas une épaisseur de glace nulle, comme nous aurions pu nous y attendre selon la définition visuelle de l'extension du glacier. Des investigations GPR dédiées aux contours du glacier ont confirmé que la glace continue à s'étendre sous les versants sur une distance linéaire allant jusqu'a une centaine de mètres [1, 4]. La contribution de cette glace au bilan de masse, et en particulier la connexion de la glace sous les versants au flux principal, reste une question ouverte. Aucune structure visuellement

identifiable (bédière, crevasse) ne permet de penser qu'il y a déconnexion de la glace sous les versants du glacier lui-même.

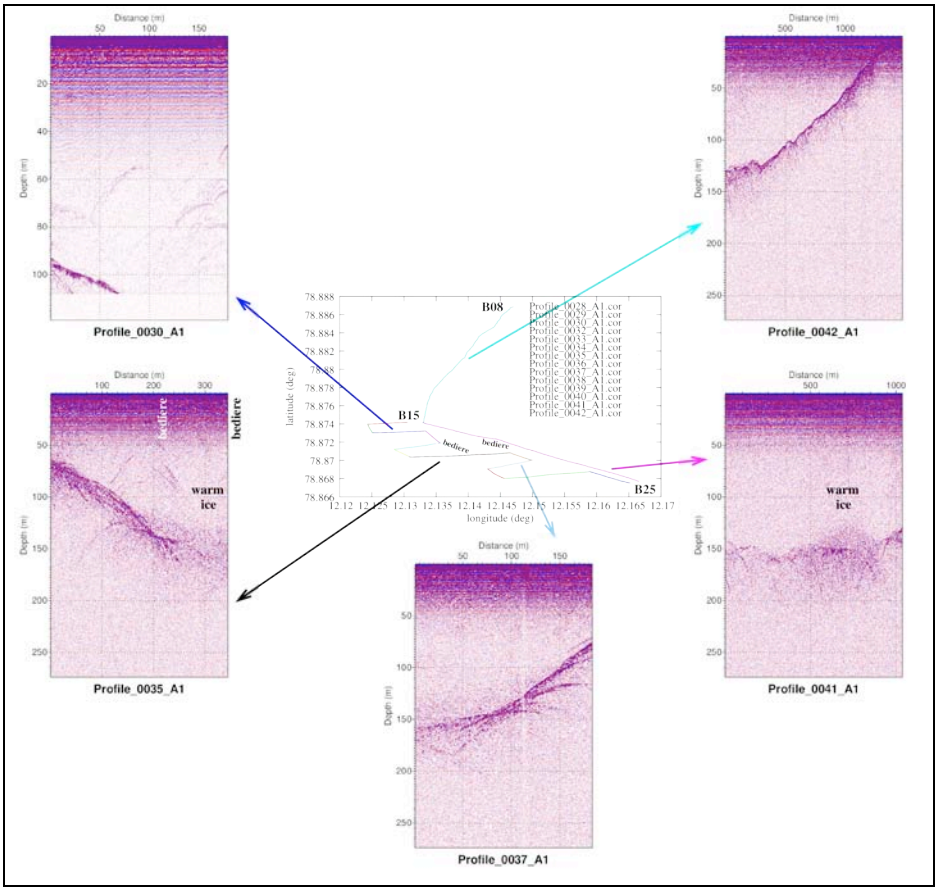


Fig. 27 – Recherche de la warm ice sur Austre Lovénbreen pour en identifier avec précision la localisation et l'extension – septembre 2013. La langue du glacier et la moraine sont situés au nord.

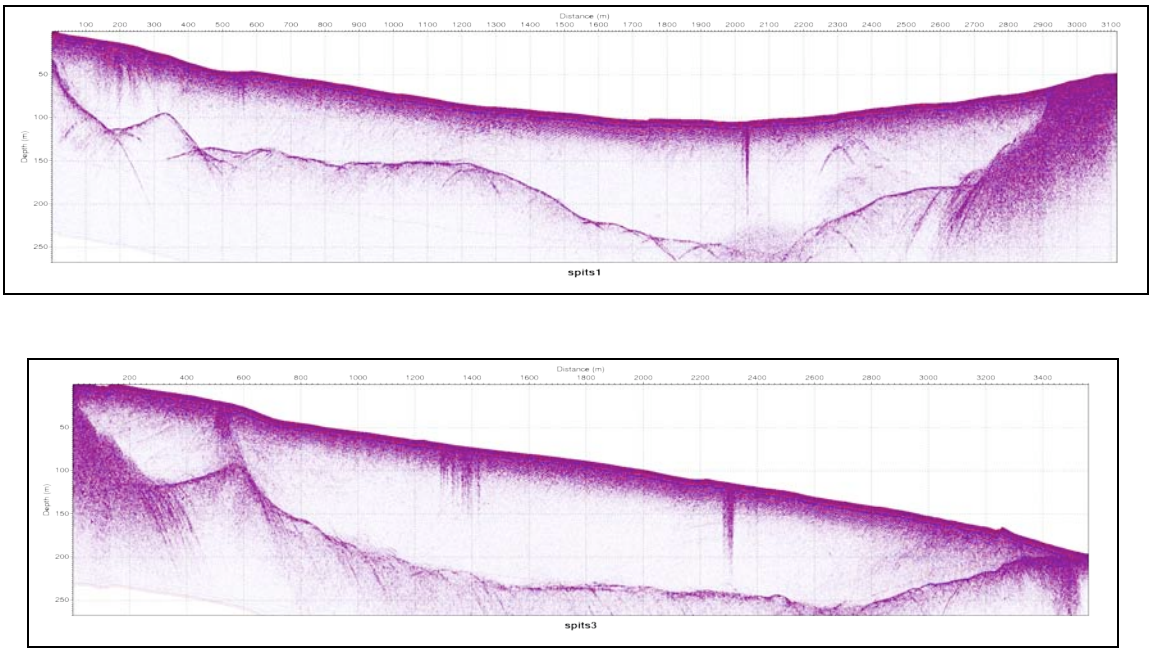


Fig.28 – Cartographie du glacier par RADAR de sol. En haut les transects est-ouest acquis respectivement en septembre 2012 au moyen d'antennes 100 MHz non-blindées, et en avril 2013 au moyen d'antennes 200 MHz non-blindées. En bas, les transects sud-nord acquis respectivement en septembre 2012 au moyen d'antennes 100 MHz non-blindées, et en avril 2013 au moyen d'antennes 200 MHz non-blindées. Dans le dernier cas, la langue du glacier et la moraine se trouvent à droite de la figure.

La comparaison entre acquisitions interannuelles ou entre saisons ne permet pas d'observer des différences significatives entre les radargrammes. Un dysfonctionnement de l'antenne 100 MHz non-blindée au cours de la campagne d'avril 2013 nous a fourni l'opportunité de découvrir que les antennes 200 MHz, dont l'onde électromagnétique subit une atténuation accrue lors de sa propagation dans un mileu comportant une composante imaginaire non-nulle, sont aptes à détecter un écho même aux profondeurs de plus de 170 m de l'interface. La perte en contraste est compensée par le gain en résolution et les deux mesures – 100 et 200 MHz – s'avèrent donc complémentaires. Les structures très similaires des RADARgrammes attestent de leur pertinence et de la reproductibilité de la mesure, qui mériterait d'être réitérée sur un intervalle de temps plus large pour permettre une différence significative de topographie suite à l'ablation de la surface du glacier.

Une recherche minutieuse d'un écoulement sous-glaciaire liquide par les mesures en septembre n'a pas permis de mettre en évidence un réflecteur puissant qui serait lié à une accumulation d'eau liquide. Diverses hypothèses sont alors proposées pour expliquer l'absence d'un tel réservoir bien que les écoulements liquides continuent à être observés dans la moraine après l'apparition de températures négatives : soit l'eau est emprisonnée sous le glacier sous forme de sédiments saturés en eau et ne présentant pas une rupture d'impédance aussi significative que celle attendue par l'interface glace-eau liquide, soit l'épaisseur de la couche d'eau liquide est significativement plus faible que la longueur d'onde électromagnétique dans la glace et n'induit pas de réflection significative par rapport à l'interface glace-roche.

Néanmoins, l'analyse sur la présence d'eau sous la glace a fortuitement porté ses fruits lors d'une étude de la topographie sous un lac supra-glaciaire présent chaque année dans un des cirques. La mesure de topographie en avril s'est heurtée à un fort réflecteur qui ne pouvait que difficilement être attribué à une poche d'air sous la glace. Un forage à la vapeur a confirmé la présence de plus d'un mètre d'eau liquide sous la glace à la sortie de l'hiver.

4.3 Ingénierie

Deux aspects d'ingénierie ont été développés en marge des activités centrales du projet Cryo-Sensors. L'activité concernant le développement de capteurs passifs interrogeables par GPR – notamment pour la mesure sous-glaciaire pendant une durée ne dépendant que de la résistance mécanique du capteur mais pas d'une autonomie de source locale d'énergie – a été poursuivi. Par ailleurs, l'acquisition d'un instrument dédié – Malå ProEx – en particulier dédié aux mesures en environnement arctique, a donné lieu à un développement logiciel spécifique afin de répondre au mieux à nos besoins. Cet outil a été mis en œuvre sur le terrain : il est mis à disposition, en complément des divers scripts de traitement et de conversion des signaux acquis, à : http://sourceforge.net/projects/proexgprcontrol/.

4.5 Photogrammétrie

4.5.1 Acquisitions périodiques sur le glacier

Les appareils photographiques déployés dans la moraine et autour du bassin du glacier ont été maintenus en état de fonctionnement. Leur maintenance nécessite parfois, si la source de dysfonctionnement ne peut être réparée sur site, un démontage de l'appareil de son trépied qui se traduit inévitablement par une décalage de la prise de vue lors de la réinstallation. Ce décalage pourrait se traduire par une remise en cause des points de référence pris au sol (GCP) acquis en 2009, mais en pratique un recalage des prises de vues est effectué pour permettre de poursuivre le traitement de correction géométrique et de projection en vue azimutale pour une analyse quantitative de la couverture neigeuse du glacier. Cette correction géométrique (Fig. 29), établie sur un jeu de photographies de référence, est alors appliqué à l'intégralité des photographies ayant subi la déformation par un script appliquant automatique la correction (outil gdalwarp appliquant les corrections générées par le module georeferencer de qgis).

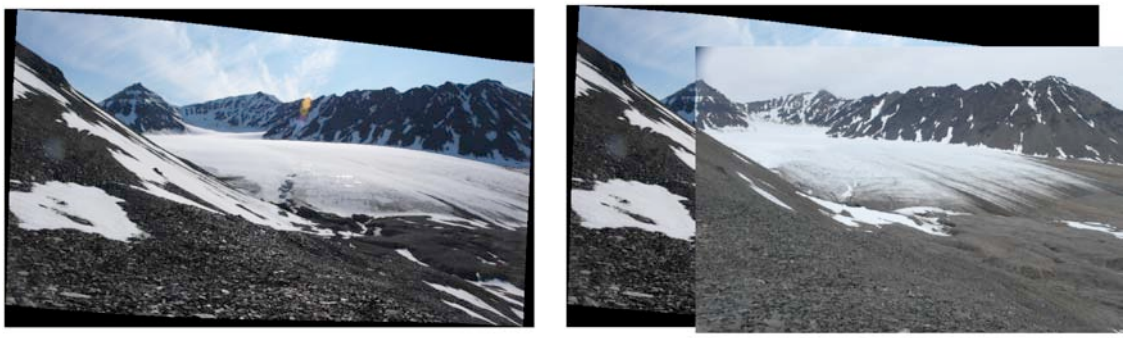


Fig. 29 – Gauche : photographie prise en septembre 2007. Droite : photographie prise du même site en septembre 2013.

4.5.2 Acquisitions périodiques dans la moraine

Trois appareils photographiques numériques à prises de vues automatiques à intervalles de temps réguliers ont été déployés dans la moraine pour le suivi de processus hydrologiques. La haute résolution spatiale permet de suivre d'une part l'origine des écoulements par l'observation de la couleur (écoulement fortement ou faiblement chargé en sédiments), et d'autre part de compléter la mesure de niveau d'eau par sondes de pression par une analyse des images et extraction de la hauteur d'eau en fonction de marqueurs sur le terrain (Fig. 30).

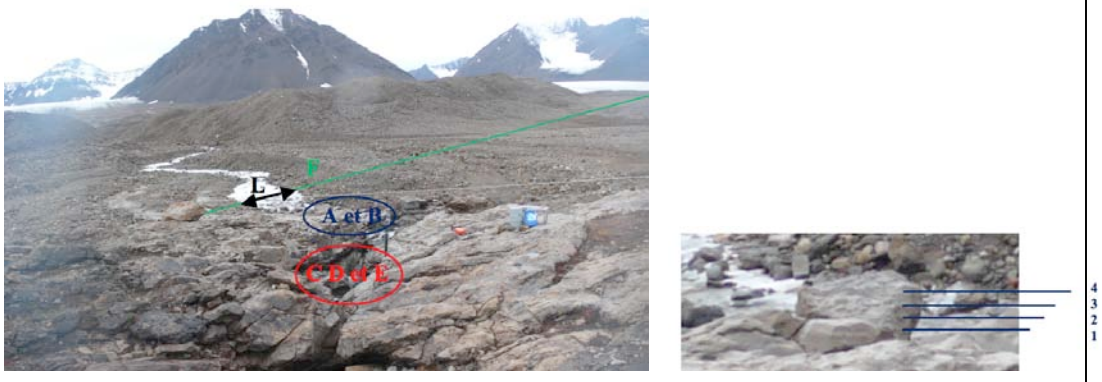


Fig. 30 – Gauche : environnement expérimental, illustrant l'exutoire qui canalise les écoulements issus de la moraine. Droite : régions d'intérêt pour remonter à une analyse quantitative des débits des écoulements liquides.

Une telle analyse a été effectuée sur la masse de données acquises devant l'exutoire principal (dit de la Goule) au cours des années 2010, 2011, 2013 et 2014. Bien qu'un re-étalonnage périodique soit nécessaire pour tenir compte de la variation de la section de l'exutoire en fonction de son ensablement et accumulation d'obstacles à l'écoulement, l'accord des données issues du traitement photogrammétrique et par mesure de sondes de pression est excellent. En particulier, la photogrammétrie complète efficacement les mesures de pression lorsque les sondes sont englacées ou ensablées (analyse quantitative), ou lorsque les écoulements liquides sont encore confinées à la surface de la neige et n'ont pas encore réussi à dégager l'exutoire (analyse qualitative), (Fig. 31).

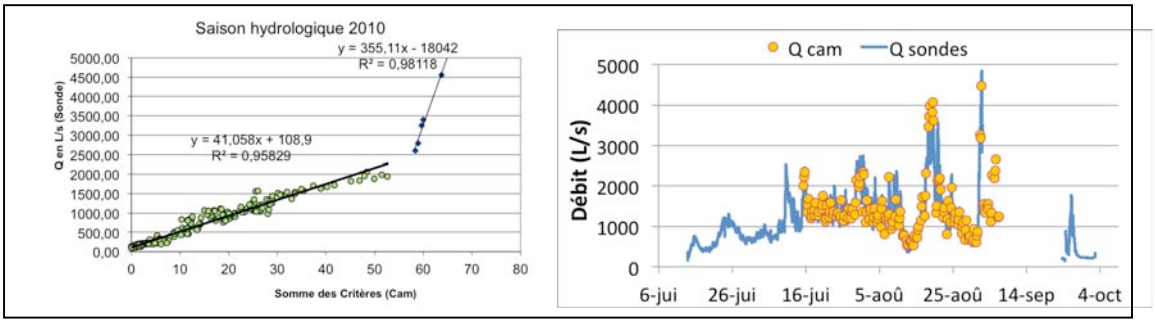


Fig. 31 – Gauche : courbe d'étalonnage reliant les critères mesurés sur les photographies numériques et les tarages. Droite : comparaison au cours du temps des débits mesurés par photogrammétrie et par sonde de pression. On notera l'extension de la courbe acquise par les sondes après le 1er Septembre grâce aux prises de vues optiques.

4.5.3 Reconstruction tri-dimensionnelles de modèles de terrain

La génération de modèles numériques de terrain pour analyser l'évolution du volume du glacier s'avère une tâche complexe et onéreuse selon les méthodes classiques (imagerie satellitaire, photographie aérienne, cartographie). L'accès à des puissances de calcul suffisantes pour considérer le traitement d'images numériques acquises par appareils photographiques de haute résolution fournit une alternative aux outils aussi complexes et coûteux que le LiDAR. Dans ce contexte, nous nous intéressons à l'utilisation de photographies numériques prises depuis le sol pour générer des modèles numériques d'élévation à intervalles de temps réduits. Cette méthode semble particulièrement appropriée pour l'environnement dynamique que forme la zone morainique proglaciaire, avec une surface peu étendue, des points de vue en altitude avec une orientation appropriée et un accès aisé.

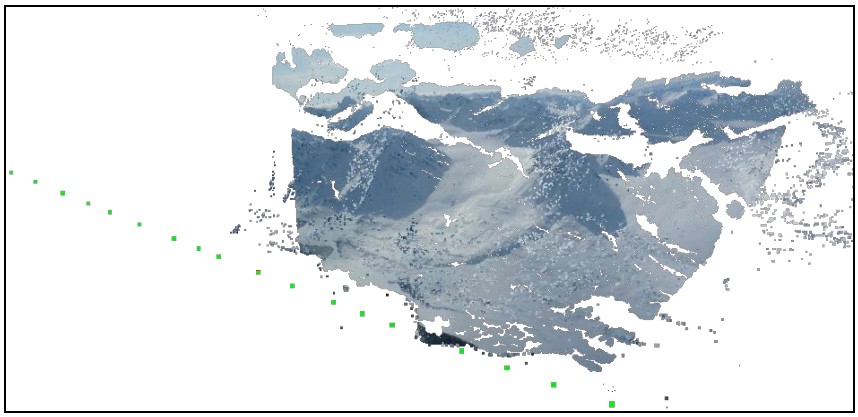


Fig. 32 – Modèle numérique d'élévation issu de prises de vues opportunistes lors du décollage de l'avion quittant Ny-Ålesund (points verts).

Notre activité en ce sens s'est pour le moment focalisée sur une prise en main des outils libres mis à disposition par l'IGN (suite de logiciels MicMac) et une comparaison avec l'outil propriétaire qu'est Agisoft PhotoScan. Par ailleurs, la mise en œuvre dans le cas peu favorable de surface enneigées (faible contraste et absence de points remarquables sur un manteau neigeux homogène) a donné lieu à une étude spécifique sur la résolution du nuage de points et une comparaison avec un nuage de point généré par LiDAR, considéré comme instrument de référence dans le domaine. Les modèles que nous avons ainsi eu l'opportunité de générer sont soit issus de photographies prises au sol (nombreuses zones d'ombres se traduisant par des régions non-définies dans le modèle d'élévation), ou lors d'un vol en avion en ligne droite qui contraint mal le modèle autour de la direction de vol. Ces modèles ne sont donc pas exploitable quantitativement en altitude, bien que leur résolution en latitude et longitude s'avère excellente et la chaîne de traitement soit ainsi validée. Une séquence de mesures spécifiques, avec prises de vues hautes résolution par drone, est envisagée pour poursuivre cette activité.

5. Etude de la couche active et du pergélisol (zone proglaciaire)

Le sous-sol du Spitsberg comporte un pergélisol (sous-sol gelé permanent sur plusieurs dizaines à centaines de mètres d'épaisseur) avec une partie supérieure, appelée couche active, qui dégèle et regèle annuellement pendant l'été. Au-delà de la dynamique thermique saisonnière du sous-sol, le réchauffement du climat dans la région étudiée conduit à une dégradation progressive du pergélisol. Cette destruction conduit à une libération d'eau, de solutés et de gaz et peut avoir un rôle sur le stockage et le déstockage d'eau vers le système hydrologique en lien avec une couche active aquifère de plus en plus épaisse. Dans le cadre du projet Cryo-Sensors, le compartiment souterrain de la zone proglaciaire a ainsi fait l'objet d'investigations in-situ ainsi que d'une modélisation numérique (collaboration avec le LSCE mise en place au cours du projet), afin d'évaluer le rôle de la dégradation du pergélisol, des eaux souterraines et plus généralement du sous-sol dans l'hydrologie du bassin versant.

Les investigations de terrain ont été conduites dans la zone proglaciaire du glacier Austre Lovénbreen. Pour étudier les dynamiques de la couche active, du pergélisol et de la nappe supra-pergélisol ainsi que la géométrie de ces réservoirs, des mesures thermiques et hydrogéologiques ont été réalisées sur 5 sites équipés en cours de projet. Ainsi, durant les printemps 2012 et 2013, des opérations de foration (Fig. 33) ont été conduites afin d'équiper des profils verticaux en sondes thermiques et des piézomètres (de 2,5 à 4 m de profondeur selon les sites ; Figure 2). En raison de conditions climatiques difficiles en 2012 (présence d'une épaisse couche de glace vive à la surface du sol), le programme de foration n'a pas pu être achevé et a donc été reporté au printemps suivant.

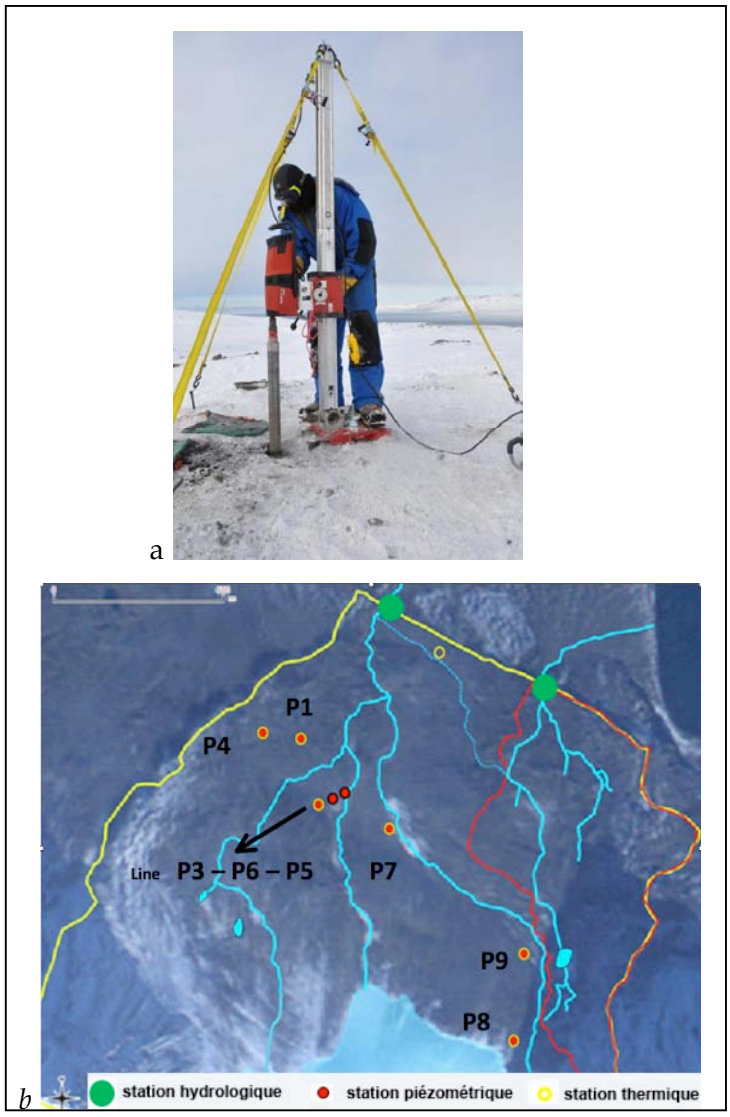


Figure 33 – (a) Forages réalisés en 2012 et 2013 pour l'implantation de piézomètres et de profils de sondes thermiques dans la couche active et le pergélisol (b) position des stations thermiques et des piézomètres dans la zone proglaciaire du glacier Austre Lovénbreen.

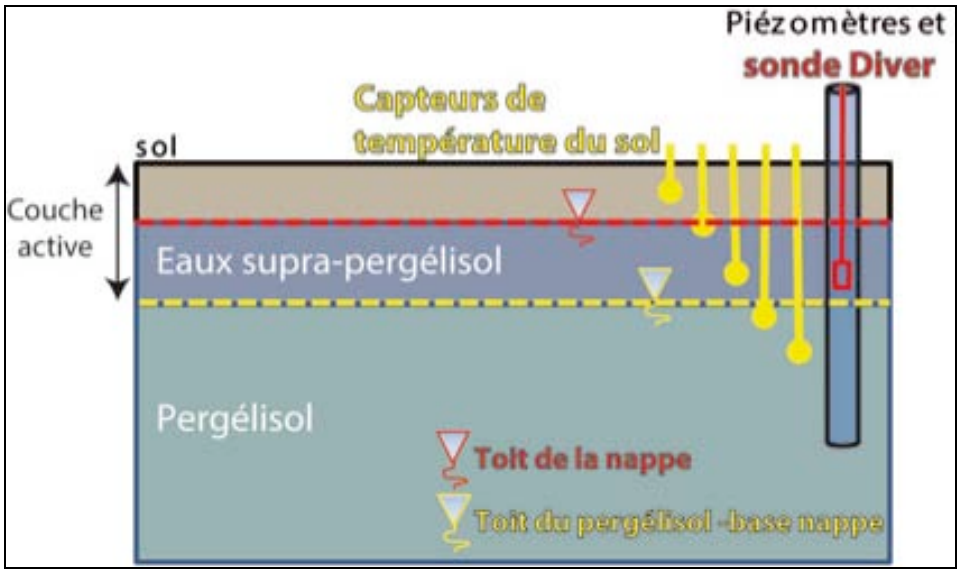


Figure 34 – Coupe de la couche active dans la zone proglaciaire. Pendant l'été, une nappe phréatique (eaux supra-pergélisol) se met en place au-dessus du pergélisol dans la couche active dont l'épaisseur est d'environ 2,5 m de profondeur dans la zone étudiée. Plusieurs profils verticaux de sondes T (-0,2 à -3,6 m de profondeur ; en jaune sur la figure) ont été mis en place entre 2010 et 2013. La dynamique des eaux souterraines est contrôlée par des sondes de TD (en rouge dans la figure) dans les piézomètres (diamètre de 1 pouce).

En parallèle, des prélèvements d'eaux souterraines – mares, sources, nappe – ont été effectués pour mesures chimiques et isotopiques afin d'établir des relations entre les différents compartiments d'eau et d'étudier l'impact de la zone proglaciaire sur la chimie des eaux à l'exutoire du bassin versant (Fig. 35).

Figure 35 – points de prélèvements d'eau.

Les données thermiques acquises dans la couche active et le toit du pergélisol couplées aux données hydrologiques ont permis de montrer que, durant l'été (mai à septembre), la couche active joue un rôle significatif dans l'hydrologie de la zone proglaciaire. La période de dégel de la couche active en surface est globalement synchrone avec la période où la température de l'air journalière est positive dans la zone proglaciaire. Pendant la période estivale, le sous-sol dégèle partiellement, ce qui favorise l'infiltration de l'eau (pluie et eau de fonte nivale) plutôt que son ruissellement. Les pics de crue sont ainsi amortis et le soutien de base assuré par la nappe augmente au cours de la première partie de l'été (mai à début août). Durant la deuxième partie de l'été (août à septembre), le soutien de base des cours d'eau par les eaux souterraines diminue avec l'approfondissement de la nappe.

Les données thermiques obtenues (Fig. 36) permettent de mettre en évidence une couche active bien plus épaisse que ce qui était connu dans la région (couche active de 2,5 m d'épaisseur alors que la littérature mentionnait une couche active de l'ordre du mètre). Cela est à mettre en relation avec le réchauffement du climat depuis la fin du Petit Age des Glaces (1850). L'épaisseur de la couche active dans la région aurait ainsi plus que doublé en 20 ans. Les données thermiques montrent aussi que le sous-sol a une température supérieure à -0.5°C jusqu'à près de 3,6 m de profondeur. Cela indique qu'entre 2,5 et 3,6 m, la température du sous-sol est déjà proche de la fusion et le pergélisol pourrait rapidement continuer à se dégrader dans les années à venir (Fig. 36; profil de droite S3). Quelle sera alors la conséquence de cette dégradation ? La nappe supra-pergélisol aura un substratum plus profond mais l'augmentation des hauteurs de précipitations (+22,2 mm/décennie) devrait conduire à une augmentation de la puissance de la nappe (environ +0,6 m/décennie pour une porosité cinématique de 4 % et +0,2 cm/décennie pour une porosité de 10 %). Il est donc plausible que la fonte du sous-sol gelé soit compensée par une augmentation de la recharge. Il est donc attendu que la nappe d'eau souterraine soit de plus en plus importante dans les années à venir. Tout dépend évidemment de la vitesse de dégradation du pergélisol. Les sondes thermiques (air, sol) et piézométriques en place dans la zone proglaciaire pourraient aider à la compréhension du processus si le dispositif est maintenu à long terme.

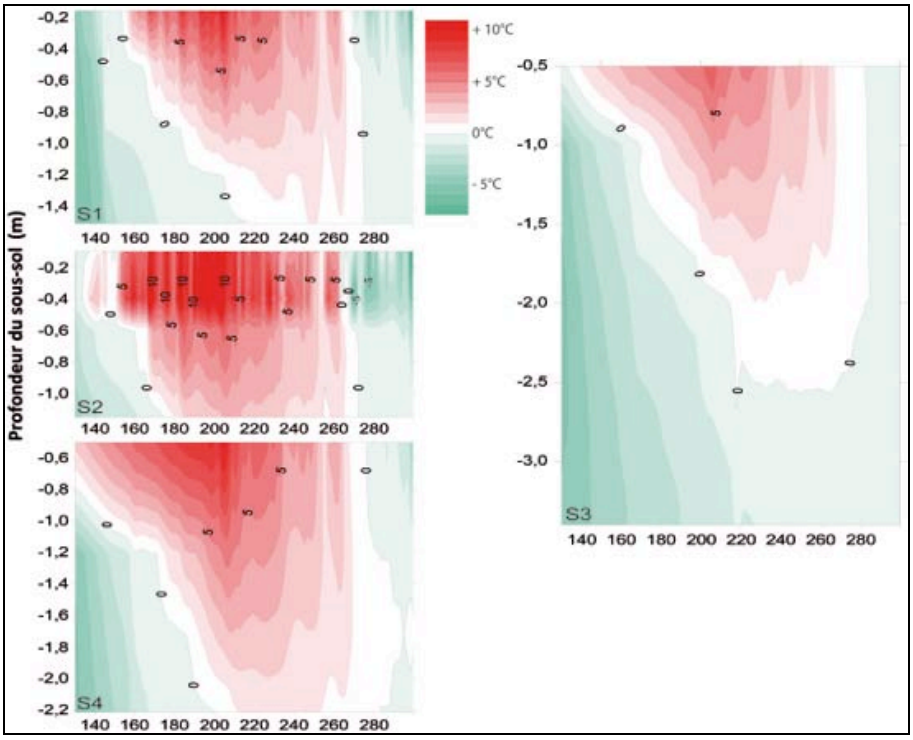


Figure 36 – Température du sous-sol en fonction du temps (en jour de l'année 2012) et de la profondeur sur 4 sites (S1 à S4).

Comme pour l'hydrologie de surface, la température de l'air et les hauteurs de précipitation semblent avoir un impact sur l'hydrologie souterraine. Aucune nappe superficielle se déplaçant avec le front de dégel de la couche active n'a été observée (Fig. 37), ce qui laisse à penser que la nappe supra-pergélisol ne s'active que lorsque la zone saturée du sous-sol est atteinte par le front de dégel (l'activation de la nappe d'eau supra-pergélisol survient tardivement dans l'été, entre mi-juillet et fin juillet). Autrement dit, la recharge initiale de la nappe supra-pergélisol d'une saison n est héritée de la nappe supra-pergélisol de la saison n-1. Il y a en effet une concordance entre la profondeur piézométrique au regel d'une saison n-1 et celle au dégel de la saison n, ce qui implique qu'aucune recharge et/ou décharge conséquente de la nappe supra-pergélisol ne survient au cours de la saison hivernale. Ces résultats ne peuvent être corroborés par une approche par bilan hydrologique, la part d'eau venant de la fonte du pergélisol n'étant pas discernable des incertitudes existantes sur les principaux termes des bilans hydrologiques. Cela laisse toutefois à penser que cette part est faible.

Les deux paramètres météorologiques, température de l'air et hauteurs de précipitations sont montrés comme déterminants dans l'activation du réservoir d'eau souterraine, puisqu'ils contrôlent la progression du front de dégel. La période d'activité de la nappe est de l'ordre d'une centaine de jours. Cette période est variable à l'échelle de la zone proglaciaire du fait très certainement de la variabilité spatiale de la profondeur de la zone saturée mais peut-être aussi de l'exposition du sous-sol aux paramètres climatiques (cuvette *vs* colline, couverture neigeuse *vs* sol à nu).

La nappe se recharge à la faveur d'événements pluvieux majeurs et consécutifs, qui, cumulés sur 2 à 8 jours, dépassent 20 mm. Cette situation se produit peu, en moyenne de 1 à 3 fois par saison d'écoulement. Le réseau de piézomètres, installés selon des distances croissantes à la rivière, montre que la nappe libre se décharge majoritairement dans la rivière. Les mares permanentes observées dans la moraine proglaciaire constituent également des zones de décharge de la nappe. L'absence de recharge importante de la nappe en dehors d'événements pluvieux majeurs soulève la question du devenir des petits événements pluvieux. Sont-ils en majorité ré-évaporés (ou évapotranspirés) dans la zone non-saturée avant d'atteindre la nappe ou contribuent-ils à la lame d'eau ruisselée ? Peu de traces de ruissellement ont été relevés sur le terrain pendant l'été (température de surface du sol positive), ce qui favoriserait l'hypothèse de l'évaporation (ou évapotranspiration). Tout à fait ponctuellement, la recharge peut aussi être associée à l'arrivée d'eau de fonte. En bordure de cours d'eau, la dynamique de la nappe, peut être associée aux variations de hauteur d'eau dans la rivière lors de crue. C'est la preuve de relations nappe-rivière ponctuellement inverses, le sens dominant des échanges allant de la nappe vers le cours d'eau.

La puissance de la nappe supra-pergélisol peut largement varier au cours de la saison hydrologique. Elle est de quelques centimètres (< 5 cm) en début et fin de saison et peut atteindre plus d'1,70 m (Fig. 37). La puissance moyenne est de l'ordre du mètre. La nappe supra-pergélisol peut donc occuper jusqu'à 70 % de l'épaisseur de la couche active. Les résultats montrent également une hétérogénéité des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère à l'échelle de la zone proglaciaire avec des porosités cinématiques entre 4 et 10 % conduisant ainsi à une estimation de la lame d'eau souterraine moyenne saisonnière comprise entre 38 et 96 mm en 2012.

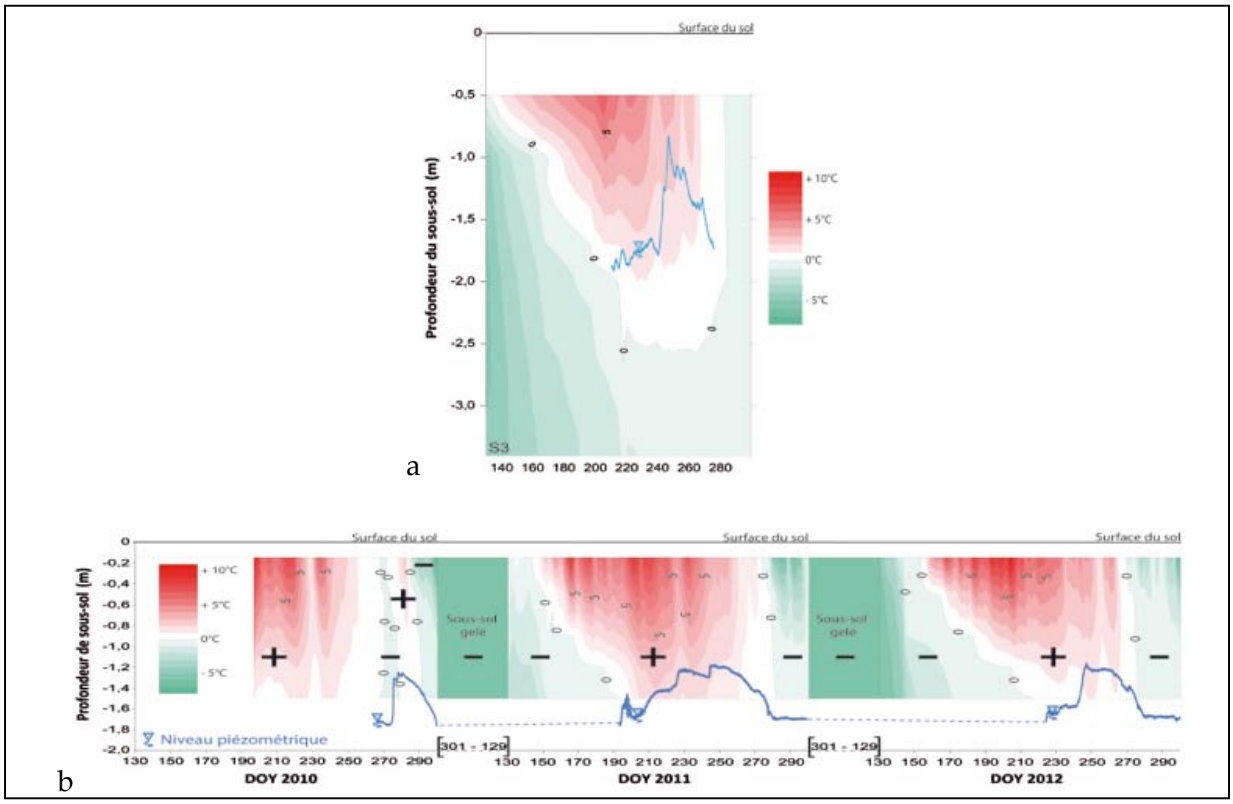


Figure 37 : (a) Profil thermique et surface piézométrique en fonction du temps (jour 2012) et de la profondeur (site S3). (b) Profils thermiques et surface piézométrique en fonction du temps (jour 2010, 2011 et 2012) et de la profondeur (site S1).

Dans le cadre de l'ANR, une modélisation thermique et hydrogéologique du bassin versant Austrelovén a été faite en collaboration avec le LSCE (Gif-sur-Yvette ; [33]). En utilisant les données thermiques et les données de SIG, une modélisation 2D a été réalisée le long de l'axe principal du système pour étudier l'évolution thermique du système glacier-lit (Fig. 38). Les résultats confirment que le glacier est polythermal avec une langue glaciaire à base froide. Son recul rapide (environ 18 m a-1) devrait conduire à un glacier froid dans les décennies à un siècle. Les simulations montrent que le développement du pergélisol précède le recul des glaciers (langue mince du glacier avec une température moyenne de l'air de -5°C à Ny-Alesund), tandis que dans la partie montagneuse, une position assez stable du glacier permet au pergélisol de se développer sur de plus longues périodes et de plus grandes profondeurs. L'étendue de sol non gelé en dessous du glacier va progressivement diminuer provoquant la disparition des écoulements sous-glaciaires pérennes probablement dans le prochain siècle. En outre, en raison des profondeurs de glace limitées au front glaciaire, la simulation du pergélisol indique qu'il se développe sous le glacier pendant le recul glaciaire. Les sorties d'eau sous-glaciaires devraient donc être limitées aux canaux de sortie existants et ne pas être distribués en continu tout au long du front glaciaire. Ces premiers résultats auraient nécessité d'autres investigations, notamment en mesurant la température du sol (sous le glacier) et celle de la glace basale des glaciers.

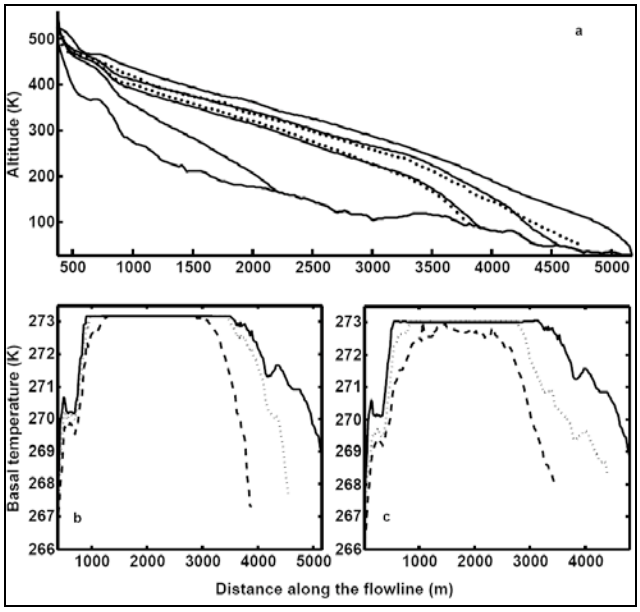


Figure 38 – Coupes du glacier modélisées de 1962 et 2009 (trait plein) par rapport aux données (en pointillés). La plus petite surface correspond une modélisation du glacier projeté en 2125. (b) et (c) température basale (en K) modélisée pour deux scénarios : 1925 état initial (trait plein), 1962 (en pointillés) et 2009 (en tirets). D'après Roux et al. [33].

Du point de vue géochimique, les eaux du bassin ont des signatures différentes selon le réservoir concerné et permettent d'établir des relations entre eaux de surface et eaux souterraines (y compris sous-glaciaires). Trois familles d'eau se distinguent :

- les eaux de rivière, différentes selon qu'il s'agit de la Goule (exutoire principal) ou du Diable (exutoire secondaire) :
    - les eaux de la Goule faiblement minéralisées et à pH basique (conductivité électrique médiane à 170 $\mu S.cm^{-1}$ et pH médian à 7,8) ;
    - les eaux du Diable, plus minéralisées que la Goule 800 $\mu S.cm^{-1}$ avec un pH médian basique à 7,8 ;
- les eaux sous-glaciaires, d'avantage minéralisées et basiques, (valeurs médianes à 865 $\mu S.cm^{-1}$ et pH 8,3) ;
- les eaux souterraines :
    - la nappe supra-pergélisol à pH neutre (valeur médiane à 7,4) et moyennement minéralisées (médiane à 733 $\mu S.cm^{-1}$) ;
    - les sources acides (valeur médiane de pH à 3,5) qui constituent l'ensemble d'eau le plus acide et le plus fortement minéralisé du système hydrologique (médiane à 1408 $\mu S.cm^{-1}$).

Les eaux du sous-bassin versant glaciaire de la Goule présentent globalement une relation inverse entre la conductivité électrique et le débit des flux à l'exutoire, ce qui montre un contrôle de la fonte sur les variations de minéralisation. Les eaux à l'exutoire du sous-bassin versant morainique (Diable) voient leur conductivité électrique augmenter au cours de la saison hydrologique à mesure que le débit diminue du fait d'une diminution des apports en eaux de fonte (disparition progressive du manteau neigeux de la zone proglaciaire). Il n'y a toutefois pas de relation inverse entre conductivité et débit observé.

La minéralisation des rivières qui alimentent la Goule augmente d'amont en aval principalement du fait d'apports d'eaux souterraines (sources) le long de leur cours indiquant un faible impact des interactions eaux-roche sur l'évolution chimique des cours d'eau (Fig. 39). Les apports des sources acides ont un impact plus important sur la minéralisation des rivières que ceux de la nappe supra-pergélisol *via* des relations nappe-rivière, ce qui est le plus visible le long du cours d'eau qui présente le plus d'apports par ces sources.

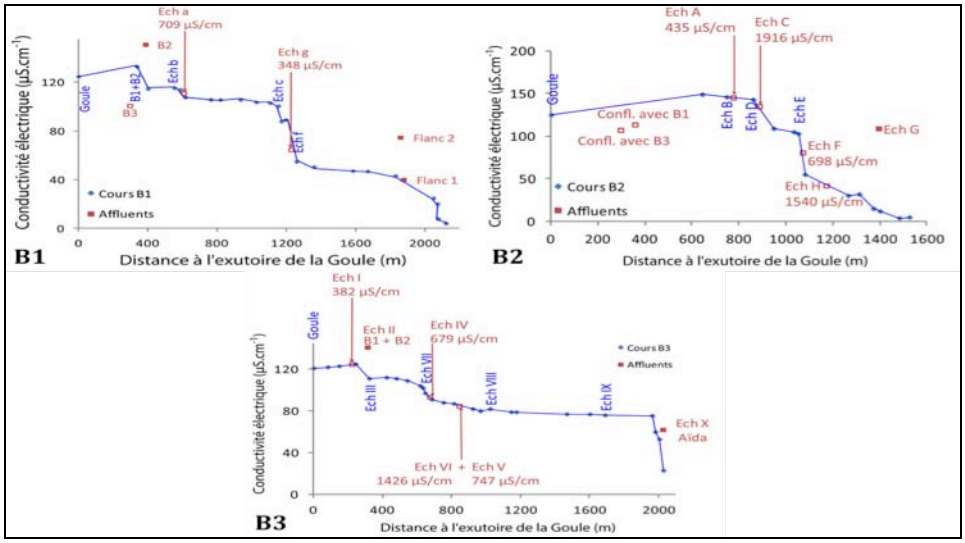


Figure 39 – Profils en long de la conductivité électrique des eaux sur les 3 affluents de la Goule (exutoire principal du BV). L'augmentation de la minéralisation se fait par pallier dans les secteurs où la rivière est en contact avec des eaux souterraines de la couche active. D'après Quenet [65].

La minéralisation des eaux du bassin versant est majoritairement constituée d'ions sulfates et calcium ainsi que, dans une mesure moindre, d'ions bicarbonates et magnésium. L'apport d'ions bicarbonates par les eaux souterraines aux eaux rivières ne se fait que par l'intermédiaire des eaux de la nappe supra-pergélisol tandis que les apports par les sources acides les rapprochent du pôle sulfaté calcique. La combinaison de différentes réactions d'altération explique la chimie des eaux : la dissolution simple de carbonates magnésiens, la dissolution de carbonates magnésiens couplée à une oxydation des sulfures (pyrite), mais aussi et surtout par l'altération des aluminosilicates qui constituent le fond minéralogique du bassin.

Aussi, les minéraux les plus réactifs du bassin versant ne sont pas seuls à l'origine de la signature chimique des eaux. Les carbonates et les sulfures peuvent être majoritairement à l'origine de la minéralisation dans les moraines récemment déglacées. Mais ces minéraux pourraient manquer dans les formations morainiques les plus anciennes, où la réaction d'oxydation de pyrite doit d'avantage avoir tendance à se coupler à l'altération des aluminosilicates présents en grand nombre. La relation qui lie globalement les cations monovalents aux cations divalents en solution dans les eaux va dans ce sens. L'excès de cations apportés par l'hydrolyse d'aluminosilicates dans la zone proglaciaire et sous-glaciaire tend à plaider en faveur d'un temps de contact long de l'eau avec son encaissant géologique.

L'approche géochimique couplée à l'approche hydrologique/hydrogéologique a permis de montrer que la zone proglaciaire (couche active) était une zone de transit où les eaux de fonte et les eaux météoriques acquièrent leur minéralisation avant d'arriver à l'exutoire *via* les relations nappe-rivières ou la confluence avec des sources. C'est cette interaction avec les eaux souterraines qui conduit les eaux de surface à être fortement minéralisées en début et en fin de saison hydrologique. Au cœur de la saison hydrologique, lorsque les débits sont les plus forts (15-30 juillet), les eaux de rivière sont diluées par les eaux de fonte et l'impact des eaux souterraines est alors peu visible chimiquement.

6. LiDAR terrestre

Le projet initial de l'ANR Cryo-Sensor prévoyait un aspect d'étude des versants à l'aide de LiDAR terrestre. Vu que nous n'avons obtenu que la moitié du budget escompté, nous avons réduit le programme et notamment celui de l'étude des versants.

Cependant, en 2012, dans le cadre de la présente ANR, des tests ont été faits en avril et en août avec la collaboration d'un chercheur autrichien (Alexander Prokop). Les premières investigations ont été prospectives et ont permis de confirmer l'intérêt de cet outil pour le suivi des versants notamment en ce qui concerne leur enneigement et donc leur contribution au bilan glaciaire et au bilan hydrologique.

Trois volets de recherche ont été envisagés. Les dynamiques neigeuses sont abordées à travers l'estimation du volume neigeux présent sur les versants. La modélisation fine des versants au maximum et au minimum neigeux annuel permettant de déduire les volumes de neige accumulée. Les dynamiques rocheuses, tout comme la neige, sont essentiellement abordées grâce au scanner laser terrestre. Cet outil permet une résolution suffisamment fine pour pouvoir quantifier les éboulements, les glissements de terrain ou la reptation des versants. Ces processus sont liés au contexte microclimatique, le permafrost étant affecté à la fois par les températures de surface et par les précipitations, notamment pluvieuses, et aux caractéristiques physiques des versants (pente, orientation, nature et fracturation des roches). Tous ces paramètres jouent un rôle à l'échelle du bassin glaciaire, puisque c'est le glacier qui finit par recevoir et charrier les roches issues de ces phénomènes.

Enfin les dynamiques de la glace des versants sont également étudiées. Les névés sont localisés et quantifiés. La distinction entre nouvelle glace de versant et ancienne glace du glacier sera établie.

Ce volet LiDAR fait désormais l'objet d'une ANR JCJC « PRISM » portée par Florian Tolle qui était aussi partie prenante de l'ANR Cryo-Sensors. Les premières études sont riches d'enseignement et ont fait l'objet de nombreuses communications qui ont été relatées dans le rapport à 12 mois de l'ANR PRISM [25, 28, 35].

Le projet PRISM est actuellement dans sa phase opérationnelle et tous les protocoles prévus à l'origine sont aujourd'hui effectifs. Deux missions de terrain ont été menées sur le terrain d'étude au Spitsberg en avril et en août 2013. Elles ont permis de valider le protocole d'acquisition de données sur le terrain. En tout 8 zones ont été identifiées comme d'intérêt pour effectuer les scans au laser terrestre. Ces zones ont été équipées de cibles réfléchissantes nécessaires au géoréférencement des données acquises. Une fois installées, les coordonnées précises de ces cibles ont été relevées avec précision à l'aide d'un GPS différentiel. 4 thermomètres automatiques ont été installés dans 4 versants d'orientation distincte. Ils enregistrent une valeur de température par heure tout au long de la saison. Le Lidar a bien fonctionné sur le terrain, y compris dans les conditions froides du mois d'avril. Les scans du mois d'avril ont permis d'obtenir des modèles de surface au maximum neigeux annuel. Ces mesures, répétées en août sur les mêmes scènes, ont permis d'obtenir cette fois les modèles de surface au minimum neigeux annuel. L'objectif des scans d'août est principalement d'obtenir un relevé morphologique précis du sol, ou en tout cas de toutes les parties non enneigées et non englacées.

Les modèles de surface générés dans le cadre du projet Prism ont permis d'identifier les nombreux changements en cours à l'échelle d'un bassin versant glaciaire arctique soumis aux changements climatiques contemporains. La fonte de la langue glaciaire est très précisément évaluée par scan laser (Fig. 40).

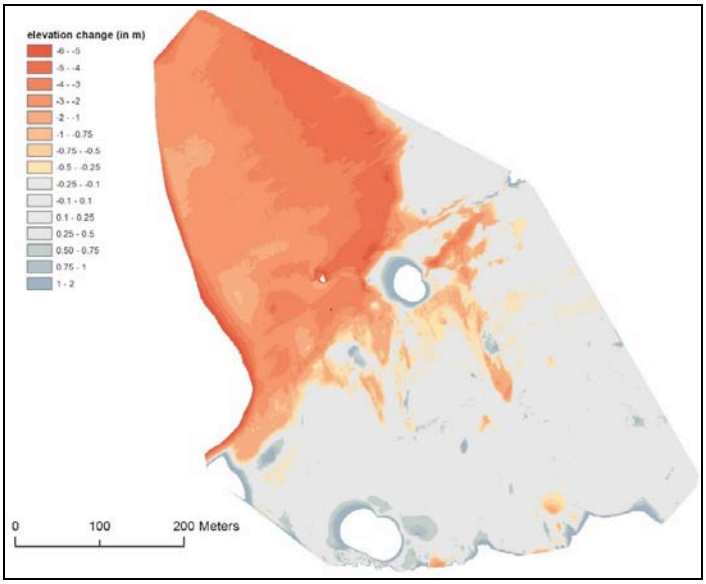


Fig.40 – Evolution du front du glacier Austre Lovénbreen (partie essentiellement en couleurs chaudes au nord-est de la carte) entre août 2013 et août 2014. La perte de glace atteint des valeurs maximales de 5 mètres entre ces deux années.

Par ailleurs, des mouvements rocheux d'ampleur ont été mis en évidence grâce aux données acquises sur le terrain (Fig. 41).

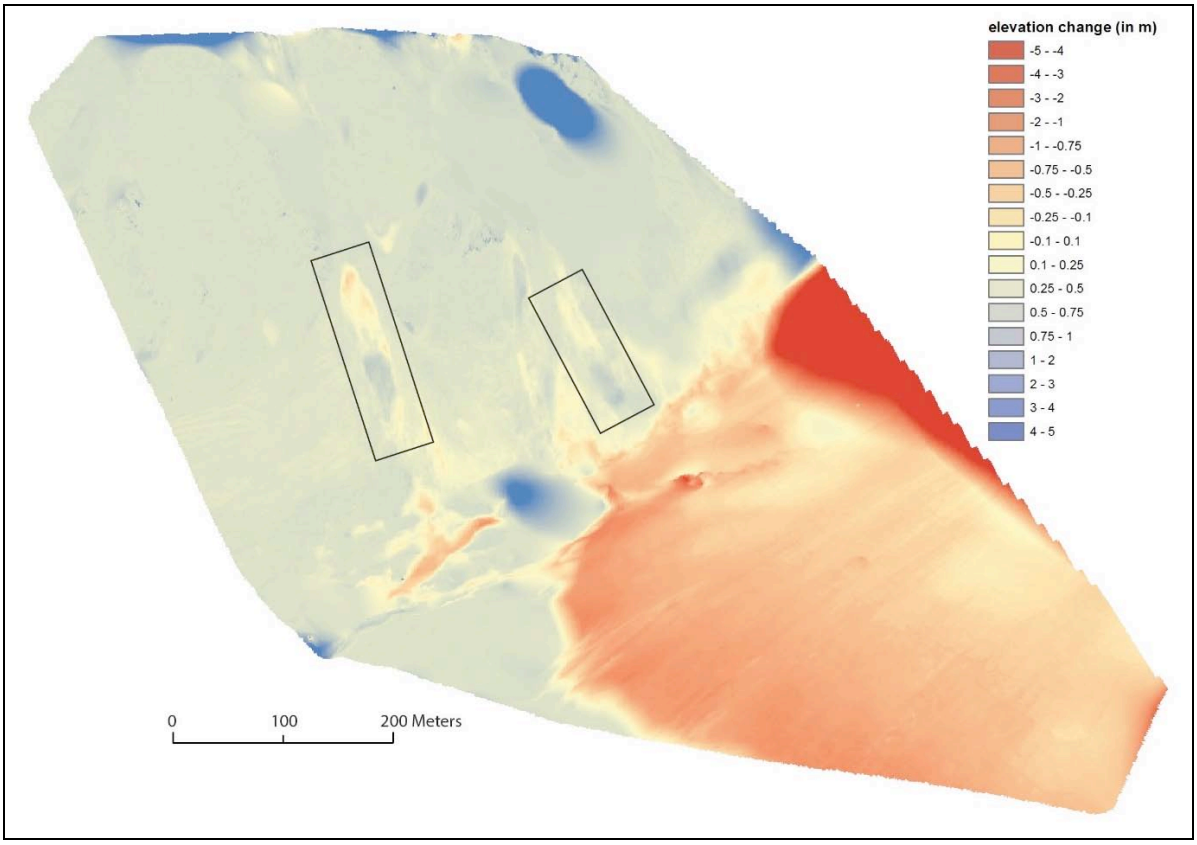


Fig. 2 : Glissements rocheux (encadrés en noir) identifiés dans un versant du bassin glaciaire étudié. Carte différentielle entre août 2013 et août 2014.

CONCLUSION

Nous avons dans ce rapport fait état des grands résultats du programme dont, des résultats acquis y compris lors des trois missions de 2014. 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 depuis les débuts de la première ANR a été bien au-delà de ce qui était initialement prévu, notamment sa participation active en ce qui concerne les mesures au GPR. Le soutien de la région Franche-Comté nous a permis l'acquisition d'un GPR en 2013 qui vient compléter celui dont nous disposions grâce à l'UMR IDES.
On notera, 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) et les hydrogéologues/ hydrochimistes et géophysciens (IDES) réunis sous la houlette du GDR Mutations polaires partenaire 1 et les sciences de l'ingénieur (FEMTO-ST), partenaire 2. Aucune publication n'a été faite séparément, c'est dire la collaboration réelle entre les équipes.
Deux thèses ont été soutenues. De nombreuses publications de qualité ont abouti, tandis que nous avons été présents dans de très nombreuses conférences internationales de renom.
Nous avions eu les honneurs en début d'année polaire, puisque notre programme était l'un des rares à être dirigés par des Français. Notre travail de deux fois quatre ans est salué, puisque nous avons été plusieurs fois conférenciers invités, ce qui nous a permis de présenter nos travaux dans la communauté des chercheurs polaires.

Le programme Cryo-Sensors 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 allons proposer

en prolongement du programme ANR Sensor-Flows, un programme ANR JCJC Mobidyc qui, s'il est retenu d'abord, accepté ensuite, permettra de continuer le suivi du bassin du Lovén Est.

C.3 REUNIONS DU CONSORTIUM (SI APPLICABLE)

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
janvier 11	Besançon	IDES (1) et ThéMA (1) Femto-ST (2)	Préparation programme missions 2012 et règlement conflit IPE
Janvier 11	Paris	IDES (1) et ThéMA (1) Femto-ST (2)	Communication à la conférence « mondes polaires » et séance de travail
Avril 11	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
Juillet 11	Besançon	ThéMA (1), IDES (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation missions septembre, rédaction article et rédaction dossier IËV
sept 11	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
Novembre 11	Orsay	IDES (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation campagne GPR
Décembre 11	Besançon	IDES (1) + ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	A l'occasion de la soutenance de thèse d'Eric Bernard, rencontre pour exploitation données des caméras automatiques et publications communes aux 2 partenaires
Janvier 12	Besancon	IDES (1) ThéMA (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation missions 2012 et règlement conflit IPEV
Janvier et fevrier 12	Paris	IDES (1) ThéMA (1) et	Plusieurs réunion pour tenter de régler le conflit avec l'IPEV, notamment avec la direction de INSHS CNRS
Avril 12	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
Juin 2012	Besançon	ThéMA (1), IDES (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation mission d 'été 2012
Juillet 2012	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
nov 2012	Orsay	IDES (1) ThéMA (1) et	Préparation conférence invité des journees arctiques de Brest
Fevrier 2013	Besancon	IDES (1) ThéMA (1) SET (1) et FEMTO-ST (2)	Préparation mission 2013 et contribution au chantier arctique
Avril 2013	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
Juin 2013	Paris	ThéMA (1), IDES (1) et FEMTO-ST (2)	A l'occasion du Chantier Arctique, réunion de préparattion des mision et plan de publcation
sept 2013	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
avril 2014	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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

Date	Lieu	Partenaires présents	Thème de la réunion
			communications et publications
Juillet 2014	Besancon	ThéMA (1), IDES (1) et FEMTO-ST (2)	Rédaction article et préparation mission automne
Sept 2014	Spitsberg	ThéMA (1), IDES (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
Dec 2014	Orsay	ThéMA (1), IDES (1) et FEMTO-ST (2)	A l'occasion soutenance de These Mélanie Quenet, correction article et preparation rapport final ANR

A noter de plus que les missions au Spitsberg sont l'occasion de réunir les partenaires pour plusieurs jours 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, notamment pour l'exploitation des données.
Au sein des partenaires 1 les membres des deux UMR concernées (ThéMA, IDES) se rencontrent très souvent aussi ; les congrès en commun sont également l'occasion de nous retrouver pour travailler ensemble.
Toutes nos communications sont communes aux deux partenaires (donc aux 3 UMR), ce qui suppose de nombreux échanges également.

C.4 COMMENTAIRES LIBRES

Commentaire du coordinateur

Dans le rapport à 6 mois et à 1 an de la présente ANR, j'avais interpellé la direction de l'ANR afin d'obtenir son soutien dans le conflit nous opposant à l'Institut polaire qui, rappelons le, a pris la décision arbitraire de nous interdire d'utiliser la base française. Je n'ai eu aucun écho de la direction de l'ANR, ce qui est regrettable et nous a fait perdre de précieuses données de l'année la plus remarquable sur le plan climatique.
Nous en avons appelé à la direction du CNRS qui s'est impliquée l'année suivante et a obtenu que nous puissions faire notre travail sur place dans les conditions normales d'hébergement et de sécurité.
Je dois dire que ce conflit insupportable a sans doute précipité mon départ à la retraite qui fut effectif au 1er juillet 2013.
J'ai demandé et obtenu l'éméritat ce qui me permettra de contribuer à valoriser les résultats engrangés pendant ces deux ANR que j'ai portées.
J'ai manqué à mes devoirs faute d'information en ce qui concerne les rapports intermédiaires, qui par le passé, nous étaient nommément demandés par mail. On voudra bien me pardonner ce manque. Quand j'ai été sollicitée par madame Benoît en mai 2014 pour le rapport à 30 mois qui était dû pour mai 2013, j'ai jugé plus pertinent de ne rendre que le rapport final, ce qui a été accepté.
Je rends ici, à titre personnel, hommage à l'ANR qui a permis que nous menions ces programmes pendant 8 ans. Mes jeunes collègues sont engagés pour poursuivre ce travail qui n'a d'interêt que sur le long terme. Une première ANR JCJC a été acceptée en 2012. J'espère que celle proposée en octobre 2014 (Mobidyc, porteur Eric BERNARD) le sera aussi pour poursuivre le travail que nous avons mené depuis 2006 avec le soutien de l'ANR.

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 monopartenaires, 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).*
Toutes nos publications ont impliqués les deux partenaires.

		Publications multipartenaires	Publications monopartenaires
International	**Revues à comité de lecture**	9	
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		
	Communications (conférence)	31 dont 3 invités + poster	
France	**Revues à comité de lecture**		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage	3	2 thèses
	Communications (conférence)	7	
Actions de diffusion	**Articles vulgarisation**		
	Conférences vulgarisation		
	Autres		

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 Blan1806 : Cryo-Sensors

Liste complète des communications et des publications

depuis le début du programme (novembre 2010 - novembre 2014)

International

• *revues à comité de lecture*

[1] BERNARD E., FRIEDT J.-M., SAINTENOY A., TOLLE F., GRISELIN M., and MARLIN C., 2014 : Where does a glacier end ? GPR measurements to identify the limits between the slopes and the real glacier area. Application to the Austre Lovénbreen, Spitsbergen {79°N). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 27 :100{108, 2014.

[2] FRIEDT JM., SAINTENOY A., CHRETIEN S., BARON T., LEBRASSEUR E., LAROCHE T., BALLANDRAS S. And GRISELIN M., 2013 : High-overtone bulk acoustic resonator as passive ground penetrating RADAR cooperative targets, *Journal of Applied Physics* 113, 134904 (2013); http: / /dx.doi.org/10.1063/1.4798474 (12 pages)

[3] BERNARD E., FRIEDT JM., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D. et MARLIN Ch., 2013 : Seasonal snow and ice dynamics monitoring using ground based high resolution photography (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N), à *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013-75, pp. 92-100.

[4] SAINTENOY A., FRIEDT J.-M., BOOTH A.D., TOLLE F., BERNARD E., LAFFLY D., MARLIN Ch. and GRISELIN M., 2013 : Deriving ice thickness, glacier volume and bedrock morphology of the Austre Lovénbreen (Svalbard) using GPR, *Near Surface Geophysics, 2013,* **11**, n°2, 253-261, Doi: 10.3997/1873-0604.2012040

[5] TOLLE F., GRISELIN M., COLLIGNON B., 2013 : « Introduction : Polar Worlds International Conference 2011 », *Polar Record*, volume 49, issue 03, pp 209-209.

[6] FRIEDT JM., LAFFLY D.,., BERNARD E.,TOLLE F., GRISELIN M., MARLIN Ch., 2012 : « Limits of using Digital Elevation Models to evaluate glacier mass balance: application to the Austre Lovenbreen (Spitsbergen, 79°N) », *Polar Record* 48 (244): 2–10 (2012).

[7] LAFFLY D., BERNARD E., FRIEDT JM., MARTIN G., MARLIN Ch., GRISELIN M., 2012 : « Snow cover monitoring using FORMOSAT satellite imaging and in situ sensing oblique view ground-based pictures », Polar Record, *Polar Record* 48 (244): 11–16 (2012).

[8] FRIEDT JM., RETORNAZ T., ALZUAGA S., BARON T., LAROCHE T., BALLANDRAS S., GRISELIN M., SIMONNET JP., 2011 : Surface Acoustic Wave Devices as Passive Buried Sensors, *Journal of Applied Physics,* 109, 3 (2011) 034905

[9] 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). *La Houille Blanche*, No. 5 , novembre 2011, pp. 20-28

– *Retour de corrections, sous presse*

[10] MARLIN C. , TOLLE F., GRISELIN M., BERNARD E., SAINTENOY A., QUENET M., DELANGLE E., FRIEDT JM. à paraître 2015 : Area, volume and freshwater flux inferred from the change in geometry of a high-Arctic glacier since the 60s (Austre Lovénbreen, Svalbard). Accepté, retour de corrections à *Geografiska Annaler, series A physical geography.*

– *Soumis*

[11] QUENET M., MARLIN C., , GRISELIN M., TOLLE F., FRIEDT J.M., BERNARD E., SAINTENOY A., NORET A, MONVOISIN G. : soumis 2014. Estimate of groundwater contribution to the water balance of a deglaciating catchment (Austre Lovénbreen watershed on the western coast of Spitsbergen, Svalbard). 58p. Soumis à *Hydrological processes.* Avril 2014.

• *conférences invitées*

[12] GRISELIN M., MARLIN C., BERNARD E., TOLLE F., SAINTENOY A., QUENET M., DELANGLE E., FRIEDT J.M., 2012 : Contribution of Arctic glaciers to fresh water discharge in the ocean: Observation of the Austre Lovén glacier, Svalbard, 79°N, Arctic Days 2012, *International Symposium of research efforts coordination on Arctic marine ecosystems*, Plouzané, France, 14-16/11/2012.

[13] GRISELIN M., TOLLE F., MARLIN C., FRIEDT J.M., BERNARD E., DELANGLE E., 2011 : Hydro-glaciology research on the Austre Lovénbreen 2011-2014, *Svalbard Science Forum : Ny-Ålesund glaciology – future opportunities and constraints'*, Tromsø - Sommarøy 30 May - 1 June 2011.

[14] MARLIN C., QUENET M., GRISELIN M., DELANGLE E., BERNARD E., FRIEDT J.M., SAINTENOY A., ROUX N., GRENIER Ch., TOLLE F., 2012 : Hydro(geo)logical and geochemical data to investigate groundwater in a glaciated catchment of western Spitsbergen (Autrelovenbreen, Ny Alesund area) *HYDRO-PERM workshop,* Longyearbyen 24-26 October 2012.

• *communications (conférence)*

[15] BERNARD E., FRIEDT J.M., PROKOP A., TOLLE F., GRISELIN M., 2014 : Assessment of photogrammetry Structure-from-Motion compared to terrestrial LiDAR scanning for generating Digital Elevation Models – Example in a polar basin, Spitsbergen 79°N, *13th International Circumpolar Remote Sensing Symposium* (September 8-12 2014, Reykjavik, Iceland)

[16] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.-M., MARLIN C., GRISELIN M., 2014: High density monitoring to better understand dynamics of a small Arctic glacier basin: six years of measurements on the Austre Lovén glacier, Svalbard 79°N. *International Arctic Science Committee workshop on the dynamics and mass budget of Arctic glaciers,* Ottawa, Canada, February 3-5 2014.

[17] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT J.-M., MARLIN C., GRISELIN M., 2014: A comparison of in situ and remote techniques to detect changes in an Arctic glacier basin: from ablation stakes to photogrammetry. *International Glaciological Society Nordic branch meeting 2014,* Dyrholaey, Iceland, October 30 – November 1st 2014.

[18] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT J.-M., GRISELIN M., 2014: Repeat terrestrial laser scanning surveys to describe and quantify slope dynamics in an Arctic glacier basin (Austre Lovénbreen, Svalbard 79°N). *13th International Circumpolar Remote Sensing Symposium,* Reykjavik, Iceland, September 8-12 2014.

[19] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « A polar hydrosystem facing climate changes: Austre Lovén glacier observatory monitored since 2006 – Spitsberg (79°N) », *Gateway to the Arctic, international workshop,* 18 & 20 novembre 2013, Brest, France.

[20] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « How short warm events disrupt snowcover dynamics: Example of a polar basin – Spitsberg, 79°N », *International Snow Science Workshop (ISSW),* 7-11 octobre, Grenoble, France, pp. 1226-1231.

[21] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « Five years of mass balance observation at very accurate spatial-temporal scale - Example of Austre Lovénbreen, Spitsbergen, 79°N ». *IASC, International Workshop,* 26-28 février, Obergurgl, Autriche.

[22] FRIEDT JM., SAINTENOY A., CHRETIEN S., BARON T., LEBRASSEUR E., LAROCHE T., BALLANDRAS S., GRISELIN M., 2013 : High-overtone Bulk Acoustic Resonator as passive sensor acting a buried cooperative target interrogated by Ground Penetrating RADAR, *Joint UFFC, EFTF, and PFM Symposium.* July 22-25, 2013, Prague, Czech Republic

[23] QUENET M., MARLIN C., GRISELIN M., NORET A., MONVOISIN G., Le GAL LA SALLE C., VERDOUX P., FRIEDT JM, SAINTENOY A., TOLLE F., 2013 : Hydro(geo)logical and geochemical approach to investigate the impact of active layer groundwater on runoff in the Austrelovenbreen watershed (Western Spitsbergen – 79°N) - *EGU General Assembly - Session CR1.2 Permafrost Open Session,* 7-12 avril 2013, Vienne, Autriche.

[24] QUENET M., MARLIN C., GRISELIN M., NORET A., MONVOISIN G., LE GAL LA SALLE C., VERDOUX P., FRIEDT J.-M., TOLLE F., 2013. Determination of groundwater impact on runoff by hydro(geo)logical and isotopic approach in the glaciated Austrelovén watershed (Spitsbergen). *GéoMontréal 2013.* Montréal, Canada.

[25] TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « Understanding links between snow cover and mass balance using a dense monitoring network in a small Arctic glacier basin (Austre Lovénbreen, Svalbard 79°N) ». *IASC, International Workshop,* 26-28 février, Obergurgl, Autriche.

[26] TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « High time and space resolution analysis of Austre Lovén glacier seasonal and interannual dynamics (Svalbard - 79°N) ». *Arctic Science Summit Week* (ASSW), 13-19 avril, Krakow, Pologne.

[27] TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT J.M., SAINTENOY A., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « The Austre Lovénbreen basin: asmall valley glacier observatory monitored since 2006 ». *NySMAC 11th seminar*, 9-11 octobre, Rome, Italie.

[28] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « A terrestrial laser scanning survey to derive snow volume and water equivalent on the slopes of Austre Lovén glacier basin (Svalbard – 79°N) ». *European Geosciences Union (EGU) General Assembly*, 7-12 avril 2013, Vienne, Autriche.

[29] BERNARD E., FRIEDT JM., SAINTENOY A., TOLLE F., GRISELIN M., 2012 : « Where does a glacier end? GPR measurements to identify the limits between the slopes and the real glacier area (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N)», *12th International Circumpolar Remote Sensing Symposium,* May 13-18, 2012, Levi, Finland.

[30] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2012 : « Response of a small arctic hydrosystem facing climate changes - Example of Austre Lovén glacier – Spitsberg (79°N) », *Gateway to the Arctic, international workshop,* 17 & 19 octobre 2012, Bremerhaven, Allemagne.

[31] MARLIN C., DELANGLE E., GRISELIN M., QUENET M., TOLLE F., BERNARD E., SAINTENOY A., FRIEDT JM., 2012 : Hydrogeochemical approach to understanding the glacier-permafrost subglacial-system interactions in a glaciated catchment of Western Spitsbergen. *10th International Conference on Permafrost,* June 25-29, 2012 in Russia, in Salekhard, Yamal-nenets Autonomous District, Russia. Article de 4 pages

[32] ROUX N., GRENIER Ch., MARLIN C., DELANGLE E., SAINTENOY A., FRIEDT J.M., GRISELIN M., 2012 : Thermo- Mechanical Modeling of a Glacier-Permafrost System in Spitsbergen, Implications for Subglacial Hydrology. *TICOP conférence,* Russia. (reviewed paper): 359-359

[33] ROUX N., GRENIER C., DELANGLE E. MARLIN C., GRISELIN M., SAINTENOY A., FRIEDT JM., 2012 : Thermo-Hydro-Mechanical modeling of a glacier-permafrost system in Spitsbergen – implications on the subglacial water transfer times, *10th International Conference on Permafrost,* June 25-29, 2012, Salekhard, Yamal-nenets Autonomous District, Russia.

[34] SAINTENOY A., FRIEDT J.M., TOLLE F., BERNARD E., MARLIN C. and GRISELIN M., 2012 : GPR investigation of the arctic glacier Austre Lovénbreen, Svalbard, A. Saintenoy conférencier invité du Workshop GPR and Applications Near Surface Geoscience 2012 – *The 18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics of the Near Surface Geoscience Division of EAGE,* Paris, 3 au 5 septembre 2012

[35] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT JM., GRISELIN M., 2012 : « Monitoring the snow cover on the slopes of a polar glacier using terrestrial laser scanning (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N)», *12th International Circumpolar Remote Sensing Symposium,* May 13-18, 2012, Levi, Finland.

[36] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., LAFFLY D., MARLIN C., 2011 : 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, *Actes des IXe Rencontres de ThéoQuant,* 2009, Besançon, France, 11 p.

[37] SAINTENOY A., FRIEDT J.M., TOLLE F., BERNARD E., LAFFLY D., MARLIN C., GRISELIN M., 2011 : High density coverage investigation of the Austre LovénBreen (Svalbard) using Ground Penetrating Radar, *6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar 2011, SuperC,* Aachen, Germany, 22. – 24.06.2011

[38] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., FRIEDT JM., MARLIN C., 2011 : Using ground based high resolution photography for seasonal snow and ice dynamics (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N), *15th Alpine Glaciology Meeting*, Munich, Germany, 24-25 fév. 2011.

[39] GRISELIN M., BERNARD E., SAUTER A., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., 2011 : « Defining the snow and ice melting potential as parameters of the hydrological circulation equation of the Austre Lovénbreen (Spitsberg 79°N) through a continuous survey », *10th Ny-Alesund NysMAC* Seminar, 25-26 October 2011 Kjeller, Norway.

[40] MARLIN C., DELANGLE E., GRISELIN M., QUENET M., BERNARD E., FRIEDT JM., TOLLE F., 2011 : « Hydrological and geochemical approach to understand the glacier-permafrost subglacial-system interactions in a glaciated catchment of Western Spitsbergen", *10th Ny-Alesund NysMAC Seminar*, 25-26 October 2011 Kjeller, Norway.

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

[42] TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT JM., SAINTENOY A., MARLIN C., GRISELIN M., 2011 : « Data issues in a moving environment: remote and in situ tools to monitor glacier dynamics and their hydrological consequences in the Austre Lovénbreen basin (Spitsberg 79°N) », *10th Ny-Alesund NysMAC Seminar,* 25-26 October 2011 Kjeller, Norway.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 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.

Posters

[46] FRIEDT J.-M., BERNARD E., PROKOP A., TOLLE F., GRISELIN M., 2014: Assessment of photogrammetry Structure-from-motion compared to terrestrial LiDAR scanning for generating digital elevation models. Application to the Austre Lovénbreen polar glacier basin, Spitsbergen 79°N. *AGU Fall meeting*. San Francisco, United States, 15-19th December 2014.

[47] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT J.-M., GRISELIN M., 2014: Seasonal and interannual variations in snow cover thickness, water equivalent, and gravity-induced dynamics in a high Arctic valley glacier watershed. *AGU Fall meeting*. San Francisco, United States, 15-19th December 2014.

[48] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARLIN C., MARTIN G., SAINTENOY A., QUENET M., GRISELIN M., 2013 : « Cinq années de mesure de bilan de masse sur un petit glacier polaire (2008-2012, Austre Lovénbreen, Spitsberg) », *Chantier Arctique Français*, 3-6 juin 2013, Paris.

[49] FRIEDT J.M., BERNARD E., QUENET M., TOLLE F., MARLIN C., SAINTENOY A., GRISELIN M., 2013 : « Acquisition automatique de photographies numériques pour le suivi de petits glaciers polaires (Svalbard) », *Chantier Arctique Français,* 3-6 juin 2013, Paris.

[50] GRISELIN M., BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., SAINTENOY A., QUENET M., MARLIN C., 2013 : « L'échelle spatio-temporelle fine pour comprendre les réactions des petits glaciers polaires aux changements climatiques récents bassin de l'Austre Lovénbreen (10 km2), 79°N, Svalbard », *Chantier Arctique Français,* 3-6 juin 2013, Paris.

[51] QUENET M., MARLIN C., 2012. Impact of seasonal thawing of permafrost on geochemistry of stream water in proglacial environment (Austrelovenbreen watershed, Spitsbergen). *Journées Des Doctorants MIPEGE.* Université Paris Sud, Orsay France. Poster

[52] QUENET M., MARLIN C., 2014. Hydrological response of a deglaciating catchment to climatic inputs during three runoff seasons between 2010 and 2012 - Austre Lovénbreen watershed on the west coast of Spitsbergen, High Arctic. *Journées Des Doctorants MIPEGE.* Université Paris Sud, Orsay France. Poster

[53] SAINTENOY A., BERNARD E., FRIEDT J.M., TOLLE F., MARLIN C., QUENET M., GRISELIN M., 2013 : « Ground Penetrating Radar et GPS pour mesurer les variations en trois dimensions de l'Austre Lovénbreen (79°N, Svalbard) », *Chantier Arctique Français,* 3-6 juin 2013, Paris.

[54] TOLLE F., PROKOP A., BERNARD E., FRIEDT J.M., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : « Dynamiques de versants et implications hydrologiques, glaciologiques et géomorphologiques en milieu polaire (Austre Lovénbreen, Spitsberg) », *Chantier Arctique Français,* 3-6 juin 2013, Paris.

France

• communications (conférence)

[55] BERNARD E., TOLLE F., FRIEDT J.M., MARTIN G., MARLIN C., GRISELIN M., 2013 : Suivi des dynamiques glacio-nivologiques d'un bassin glaciaire arctique à partir d'un réseau de capteurs haute résolution. Exemple du glacier Austre Lovén – Spitsberg – 79°N. *XIe Rencontres de Théo Quant,* 20-22 février, Besançon.

[56] BERNARD E., TOLLE F., GRISELIN M., FRIEDT JM., QUENET M., MARLIN C., 2012 : « La photographie au sol pour quantifier la vidange d'un lac supra-glaciaire (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N)», *Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France,* Grenoble, 14 & 15 mars 2012.

[57] MARLIN C., QUENET M., GRISELIN M., GRENIER C., ROUX N., TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT J.M., SAINTENOY A., 2013 : Relations entre eaux souterraines, cours d'eau et pergélisol au Spitsberg occidental : exemple du bassin versant du glacier Austre Lovén (79°N, Svalbard) - *Chantier Arctique* - Collège de France - Mai 2013.

[58] QUENET M., MARLIN M., 2012. Rôle du pergélisol sur les écoulements d'eau en milieu périglaciaire. *Journée Des Doctorants IDES.* Université Paris Sud, Orsay France.

[59] QUENET M., MARLIN M., 2013. Hydro(geo)logical and geochemical approach to investigate the impact of active layer groundwater on runoff in the Austrelovenbreen watershed (Western Spitsbergen – 79°N). *Journées Des Doctorants MIPEGE.* Université Paris Sud, Orsay France.

[60] QUENET M., MARLIN M., 2013. Rôle des eaux souterraines de la couche active sur les flux d'eau en milieu périglaciaire - Bassin-versant du glacier Austrelovén (Spitsberg). *Journée Des Doctorants IDES.* Université Paris Sud, Orsay France.

[61] TOLLE F., BERNARD E., FRIEDT JM., GRISELIN M., MARLIN C., 2012 : « Estimation des lames d'eau potentielles à partir du croisement de photos in situ et de données de températures (Austre Lovénbreen, Svalbard, 79°N) », *Journées Nivologie-glaciologie de la Société Hydrotechnique de France,* Grenoble, 14 & 15 mars 2012.

• ouvrages ou chapitres d'ouvrage

– accepté

[62] BERNARD E., TOLLE F. (soumis 2014) : Évolution contemporaine des glaciers arctiques – exemple de l'Austre Lovénbreen (79°N – 1948-2007) in *L'Arctique en mutation*, Paris, CNRS éditions, sous la direction de Daniel Joly

[63] GRISELIN M., MARLIN C., BERNARD E., DELANGLE E., FRIEDT J-M., TOLLE F., (soumis 2014) : Hydroglaciologie au Spitsberg in *L'Arctique en mutation*, Paris, CNRS éditions, sous la direction de Daniel Joly

– thèses soutenues

[64] BERNARD E., 2011. *Les dynamiques spatio-temporelles d'un petit hydrosystème arctique : approche nivo-glaciologique dans un contexte de changement climatique contemporain (bassin du glacier Autre Lovén, Spitsberg, 79°N).* Université de Besançon. 398 p.

[65] QUENET M., 2014 : *Rôle des eaux souterraines dans l'hydrologie d'un bassin versant glaciaire sous condition de pergélisol continu au Spitsberg (Austre Lovénbreen, 79°N) - Approches hydrodynamiques et géochimiques.* Université Paris-Sud Orsay. 457 p.

Action de diffusion

• *Publication à diffusion restreinte, rapports, contrats*

[66] MARLIN Ch., 2014 : appel d'offre IPEV Programme GRAAL

[67] GRISELIN M., FRIEDT JM, 2014 : rapport final instrumentation région Franche-Comté

[68] MARLIN Ch., 2013 : appel d'offre IPEV Programme GRAAL

[69] GRISELIN M., FRIEDT JM, 2013 : appel offre région Franche-Comté instrumentation.

[70] MARLIN Ch., 2012 : appel d'offre IPEV Programme GRAAL

[71] GRISELIN M., 2012 : rapport final programme 304 IPEV (Hydro-Cryo-Sensors et Hydro-sensors-FLOWS) 2006-2012.

[72] GRISELIN M. 2012 : Rapport semestriel ANR Cryo-Sensor ANR Sensor-FLOWS

[73] GRISELIN M. 2011 : Rapport final ANR Sensor-FLOWS

[74] GRISELIN M. 2011 : Rapport semestriel ANR Cryo-Sensor ANR Sensor-FLOWS

[75] GRISELIN M., MARLIN Ch. et TOLLE F., 2011 : appel d'offre IPEV programme Hydro-Cryo-Sensors

[76] GRISELIN M., 2010 : appel d'offre ANR Blanc programme Cryo-Sensor

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.

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