

Influences du pergélisol sur les écoulements souterrains et leurs échanges avec une rivière : étude numérique et expérimentale

Thèse réalisée par : **Agnès Rivière**

Sous la direction de : **Julio Gonçalves et Anne Jost**

Au laboratoire **Sisyphé** de l'Université Pierre et Marie Curie.

Soutenance le :

24 Septembre à 10h

Salle de Conférence de l'UFR TEB, 2^e étage, Tour 46-56,
Université Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75005 Paris.

Devant le jury composé de :

- M. René Therrien, Professeur à l'Université Laval, *Rapporteur*
- M. Michel Vauclin, Directeur de Recherche au CNRS, *Rapporteur*
- M. Julio Gonçalves, Professeur à l'Université d'Aix-Marseille III, *Co-directeur*
- Mme Anne Jost, Maître de Conférences à l'Université Pierre et Marie Curie, *Co-directrice*
- M. Ghislain De Marsily, Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, *Examineur*
- M. Yves Coquet, Professeur à AgroPariTech, *Examineur*
- M. Gerhard Krinner, Directeur de Recherche au CNRS, *Examineur*
- Mme Marianne Font-Ertlen, Maître de Conférences à l'Université de Caen, *Invitée*

Résumé

Le pergélisol désigne un substratum dont la température est inférieure au point de gel pendant une période d'au moins deux ans. Les limites du pergélisol fluctuent au gré des variations climatiques, en particulier à l'échelle du cycle glaciaire-interglaciaire. La présence, actuelle ou passée, du pergélisol restreint par sa perméabilité très faible l'écoulement des eaux souterraines. Il délimite deux types d'aquifère : en surface, l'aquifère supra-pergélisol présent saisonnièrement et l'aquifère sub-pergélisol sous-jacent au pergélisol, maintenu grâce au flux géothermique. Lors de sa mise en place, l'expansion volumique de l'eau gelée implique la pressurisation de l'aquifère sub-pergélisol et le soulèvement de la surface du sol. Pendant les périodes interglaciaires, les températures de surface plus élevées permettent la réactivation pérenne de l'aquifère supra-pergélisol et la dépressurisation de l'aquifère sub-permafrost. Les interactions entre les deux aquifères (supra-pergélisol et sub-pergélisol) sont permises par la présence d'ouvertures dans le pergélisol (taliks). Les interactions entre les écoulements de surface et souterrains réapparaissent. La dynamique de mise en place et de retrait du pergélisol par sa présence actuelle ou passée influence ainsi les champs de pression dans les aquifères actuels.

L'étude présentée porte sur la quantification des pressions interstitielles et des échanges entre les aquifères et les eaux de surface, au cours d'une série de cycles de gel-dégel. Pour ceci, un modèle numérique et un modèle expérimental ont été développés.

La compréhension des processus intervenant pendant les phases de gel et de dégel du pergélisol a été améliorée. Le modèle physique est constitué d'un bac de sable de 2 m³ soumis à des cycles de gel et dégel au cours desquels la pression et la température dans l'aquifère à différentes profondeurs ont été mesurées ainsi que la variation de la position de la surface du sol. Ces mesures confirment la captivité de l'aquifère sub-permafrost. L'expansion volumique de la glace se traduit par une augmentation de la charge dans l'aquifère sub-permafrost d'un facteur 6 par rapport à sa valeur initiale et un soulèvement du sol de 3,5%. Le passage de l'état captif à l'état libre de l'aquifère sub-permafrost a été mesuré ainsi que le retour de la surface du sol à sa position initiale. L'expérience a été simulée numériquement. Le code numérique intègre la chaleur latente de changement de phase ainsi que les modifications des propriétés thermiques et hydrauliques du milieu dues au gel. L'augmentation de la charge a été prise en compte à l'aide d'un terme source de pression traduisant l'expansion volumique de l'eau gelée. Le soulèvement du sol a été calculé en fonction de la variation de pression interstitielle dans l'aquifère en prenant en compte l'hypothèse d'élasticité valable pour de petites déformations. Un bon accord a été obtenu entre les résultats expérimentaux et les simulations de l'évolution temporelle des températures et des charges.

L'application du code numérique à l'échelle du bassin sédimentaire (360 km * 3 km) a permis de tester l'influence des paramètres hydrodynamiques et thermiques et des différents processus intervenant pendant le développement et la dégradation du pergélisol sur la pression interstitielle de l'aquifère sub-pergélisol ainsi que sur les limites du pergélisol. Ces tests montrent que le coefficient d'emmagasinement et la perméabilité du milieu sont les paramètres les plus influents. La différence de perméabilité due à la présence d'un aquitard influence le fonctionnement hydrodynamique du bassin. L'existence d'un exutoire, sa longueur ainsi que sa position par rapport à celle d'un aquitard sont déterminantes sur la présence et la répartition des surpressions dans l'aquifère sub-permafrost.

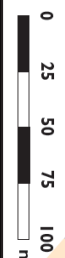
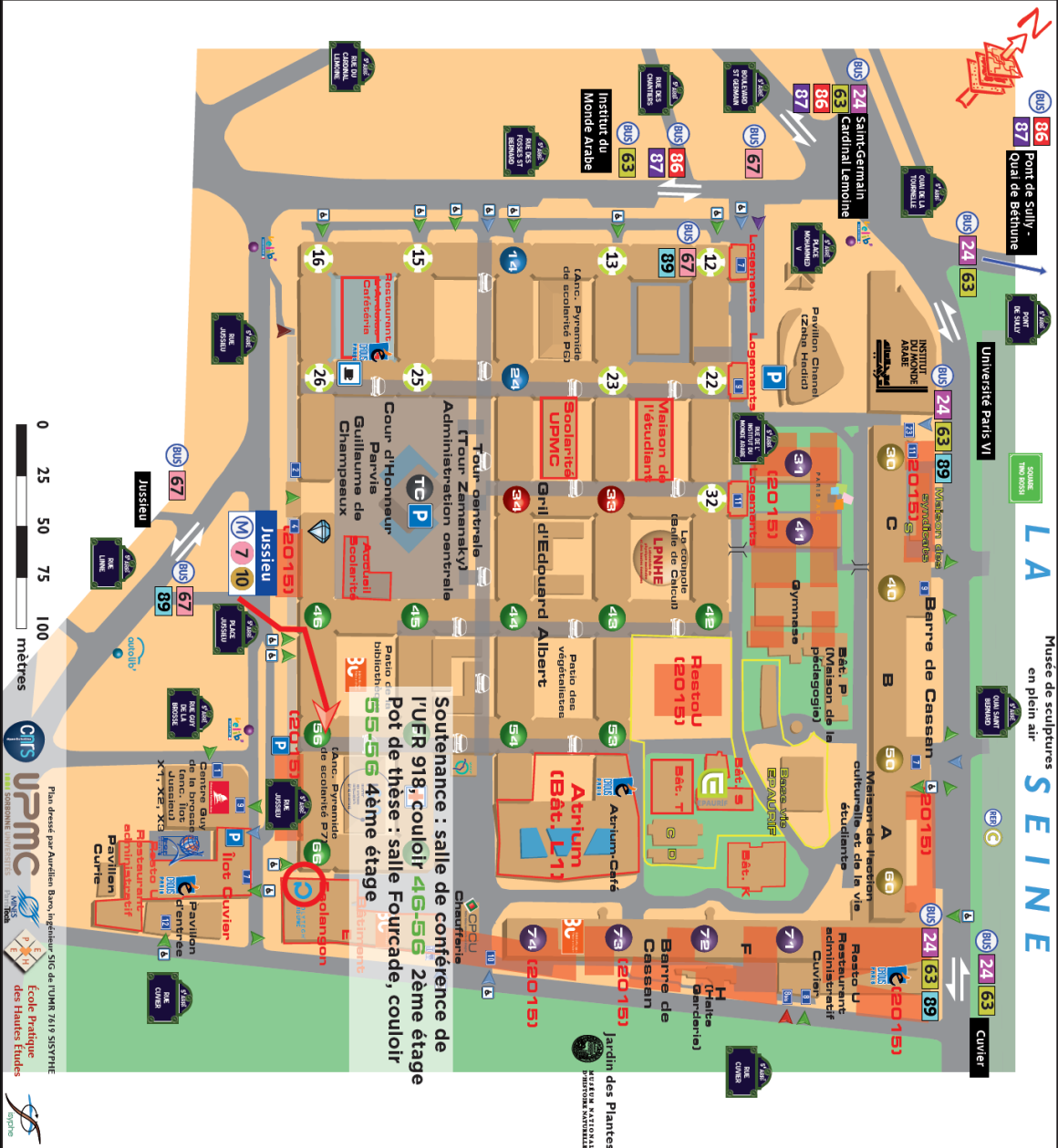
La deuxième partie de cette étude est consacrée à la réactivation des interactions nappe-rivière en phase de dégel. Afin de caractériser correctement les interactions nappe-rivière, la zone non saturée a été prise en compte dans le modèle numérique. Dans un premier temps, les processus intervenant hors période de gel ont été étudiés. La compréhension des processus de connexion et déconnexion dans un système nappe-rivière est particulièrement intéressante dans les régions semi-arides ou dans le cas d'un pompage à proximité de la rivière. Une étude numérique et expérimentale a été réalisée. Les pressions dans la zone saturée de l'aquifère et le taux d'infiltration à travers le lit de la rivière ont été mesurés afin de quantifier le flux d'eau dans le système nappe-rivière. La phase de transition intervenant entre l'état connecté et l'état déconnecté obtenu expérimentalement n'a pas été décrite jusqu'à présent. Elle est caractérisée par un taux d'infiltration maximum diminuant par la suite jusqu'à une valeur constante. Ce comportement est analysé à l'aide de simulations numériques utilisant des paramètres hydrodynamiques pertinents (ratio entre la perméabilité du lit de la rivière et l'aquifère, paramètres de la zone non saturée). L'importance de la dynamique de l'écoulement et de la variation temporelle de l'infiltration est montrée.

Les interactions entre les deux aquifères supra-pergélisol et sub-pergélisol avec un cours d'eau pourront être caractérisées lorsque l'intégration des deux modules du code numérique sur un bassin versant (1000 m * 120 m) donnera des résultats avec des temps de calcul raisonnables. La contribution des eaux souterraines pour alimenter une rivière sera alors estimée au cours des phases de décongélation.

PLAN DU CAMPUS UNIVERSITAIRE DE JUSSIEU

Légende

- Couleurs des rotondes**
- Bleu : Gril Albert, tours 1, 4, 24
 - Vert : Gril Albert tours 42, 43, 44, 45, 46, 53, 54, 55, 56, 65, 66
 - Rouge : Gril Albert tours 33, 34
 - Violet : préfabriqués 31 et 41
 - Barre de Cassan 71, 72, 73, 74 (Bâtiment F)
 - Jaune : Barre de Cassan 30, 40, 50, 60 (Bâtements A, B, C)
 - Gris : Tour centrale (Tour Zamanzky)
 - Nouvelle signalétique post-désamiantage Tours 12, 22, 32, 33, 34, 35, 46, 76
- Accès au campus de JUSSIEU**
- ▲ Accès véhicules seuls ou piétons + véhicules
 - ▶ Accès piétons uniquement
 - ▶ Accès piétons en projet
 - ▶ Accès véhicules ou piétons + véhicules en projet
 - ▶ Accès réservé livraisons CROUS
 - ▶ Accès réservé pompiers
 - ▶ Accès au parking souterrain de l'Institut du Monde Arabe
 - ▶ Accès aménagés accessible aux personnes à mobilité réduite
- P** Parc de stationnement
- P** Voies de desserte intérieure (VDI) situées sous le Gril Albert (niveau Saint-Bernard)
- Station Vélis
 - Station Vélo
- Equipements sociaux et culturels**
- ▶ Accès au musée de minéralogie (Prendre l'ascenseur situé à droite de l'entrée principale du campus, sous la barre 46-50 et descendre au niveau -2)
 - ▶ Maison de la santé (Barre 55-56, niveau MUSÉE)
- Bibliothèques universitaires**
- ▶ Point café - viennoiseries (niveau MUSÉE, patio 15-26)
- Bâtiments**
- ▶ Base Vie de l'EPIC (Préfabriqués réservés aux ouvriers du chantier de désamiantage)
 - ▶ Nouveaux bâtiments construits pendant les travaux de désamiantage
 - ▶ Bâtiments en projet ou en construction



Plan dessiné par Aurélien Buro, Ingénieur SIG de l'URM 7819 SISYPHE

WPMC UNIVERSITÉ DE PARIS

École Pratique des Hautes Études

INSTITUT DU MONDE ARABE

Jardin des Plantes

Plan