

Réduire l'incertitude de la perméabilité dans les réservoirs carbonatés par une approche combinée de modélisation statistique et numérique : leçons du Bassin Parisien

Collignon Marine¹, Klemetsdal Øystein², Catinat Maxime¹, Bethune Gillian¹, Ungemach Pierre¹, Antics Miklos¹, Brigaud Benjamin³

1 Geoflow, 2 SINTEF Digital, 3 Université Paris-Saclay, GEOPS

Contexte et objectif

La région Ile-de-France possède la plus grande densité de réseaux de chauffage urbain alimentés par la géothermie en Europe. Avec 54 installations de géothermie profonde en service et plus de 120 puits, le Dogger du Bassin Parisien est l'un des aquifères géothermiques les mieux connus au monde, avec un potentiel avéré et un taux de succès globalement élevé.

Cependant, le récent échec du puits de Grigny, GGR2 qui a présenté de faibles transmissivités met en évidence la limite des interpolations géostatistiques classiques et appelle à une meilleure évaluation des perméabilités du réservoir pour réduire le risque des futurs projets de géothermie. En effet la perméabilité est le paramètre clé qui contrôle l'écoulement, mais aussi les champs de pression et de contrainte, et détermine les débits qui peuvent être extraits du réservoir. Ce paramètre reste néanmoins très peu contraint, notamment en l'absence de données de puits ou de carottes. De plus les valeurs de perméabilité s'étendent sur plusieurs ordres de grandeur, il est crucial de quantifier l'incertitude des champs de perméabilité.

Dans cette étude, nous proposons une approche combinant modélisation inverse et directe pour réduire l'incertitude des perméabilités. Nous testons notre approche sur la base d'un modèle sandwich, classiquement utilisé dans le bassin Parisien et dans un secteur bien contraint du Val-de-Marne (Figures 1 et 2), et avons utilisé les logiciels en accès libre MRST (Matlab Reservoir Simulation Toolbox) et JutulDarcy.jl, développés par SINTEF.

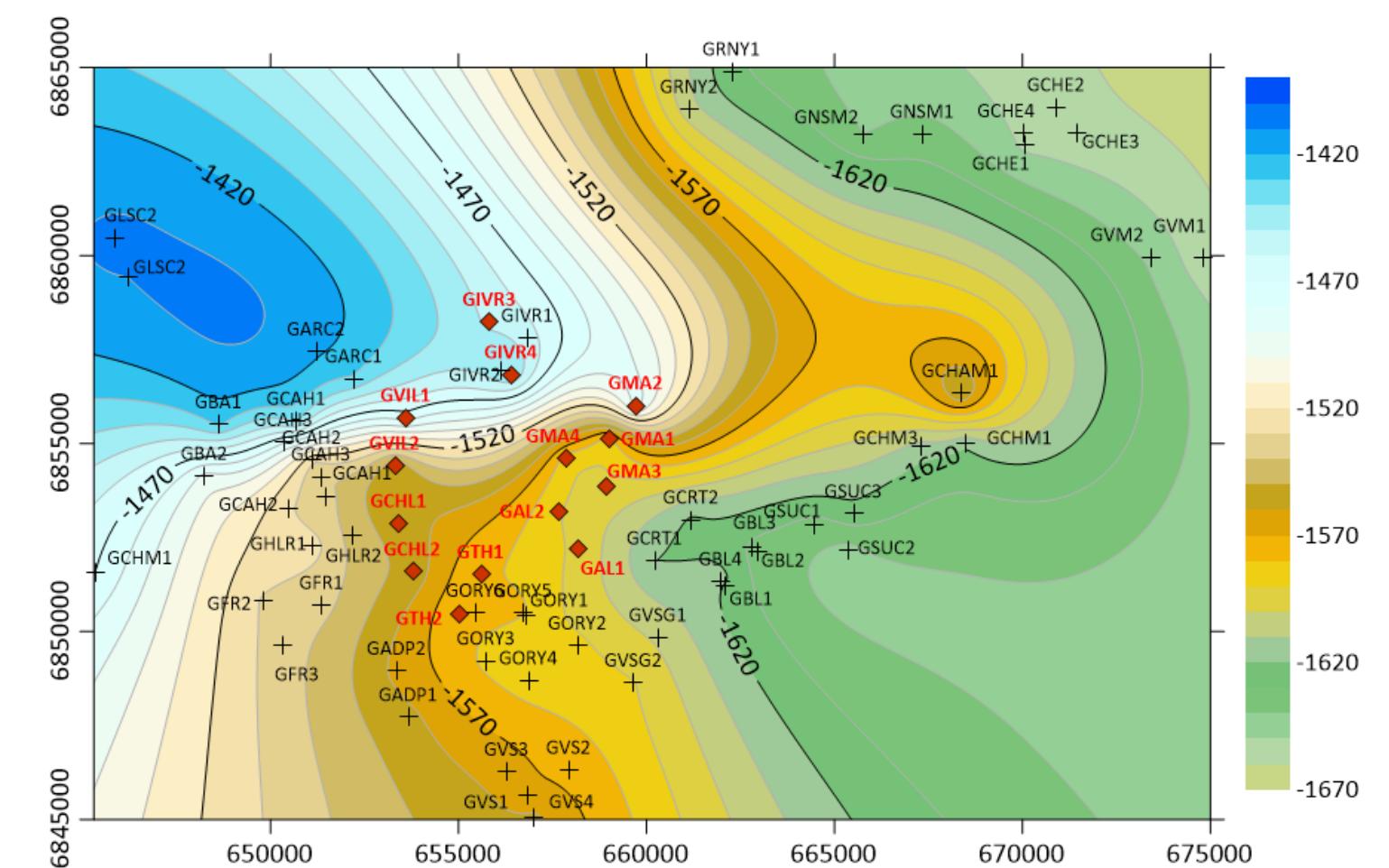


Figure 1 : Topographie du toit du réservoir. Losange rouge : puits simulés dans cette étude. Croix noires : puits environnants

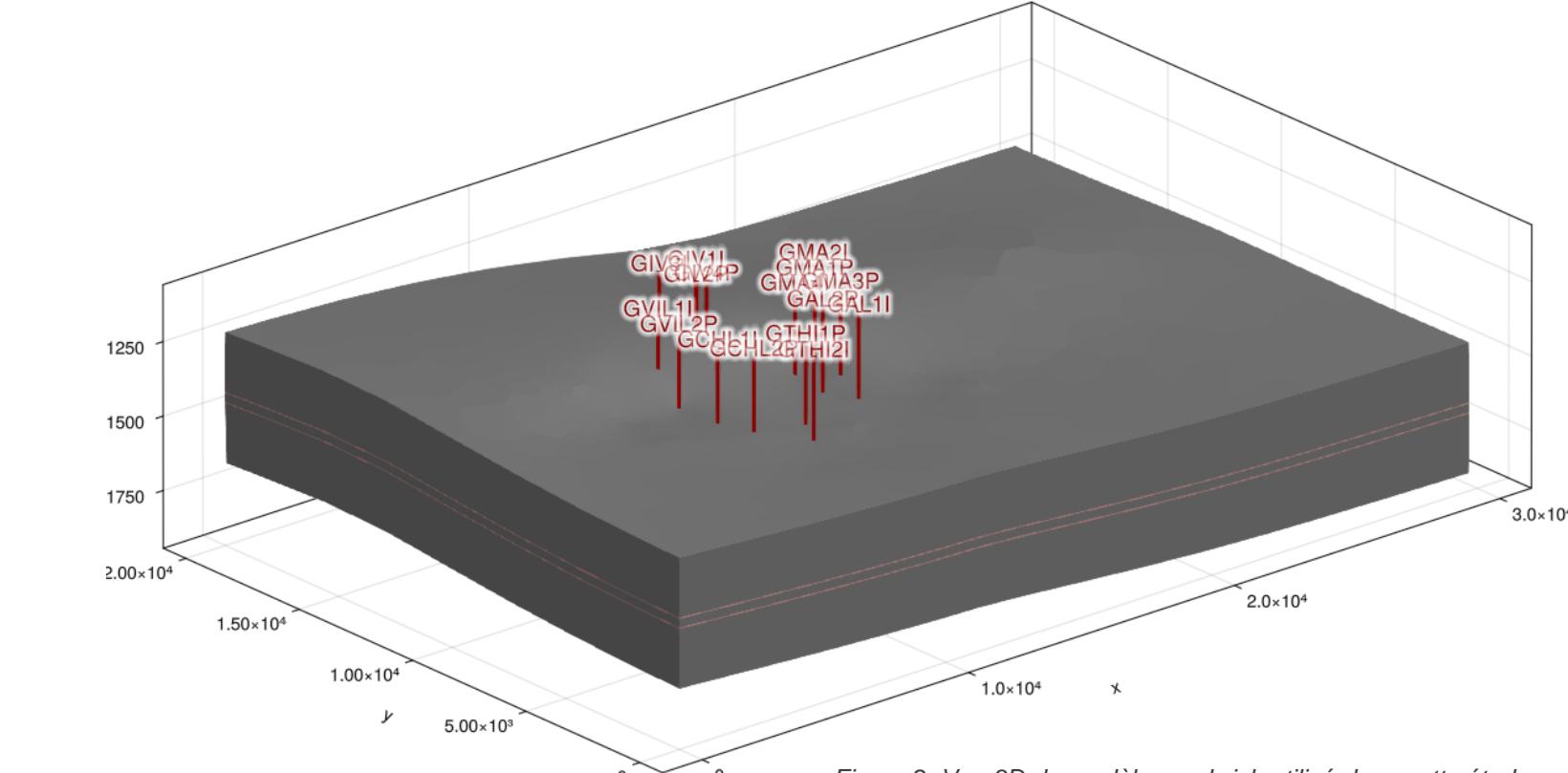


Figure 2 : Vue 3D du modèle sandwich utilisé dans cette étude

Optimisation des transmissibilités

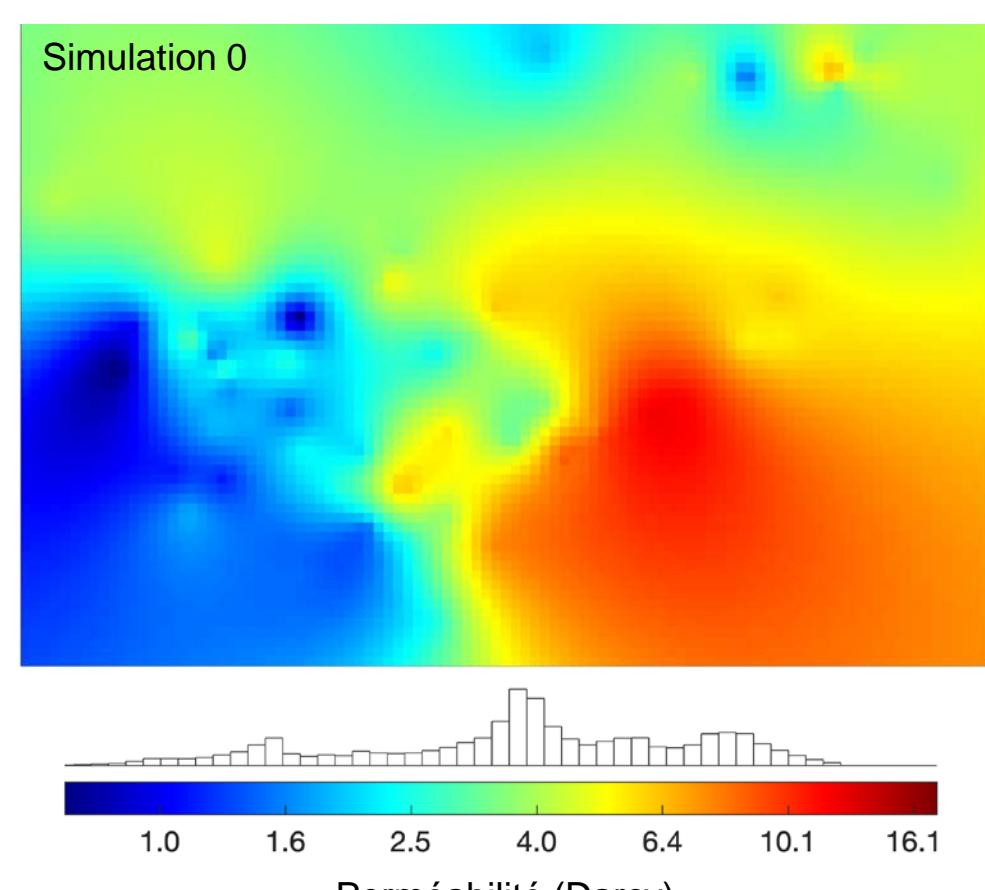


Figure 3 : carte de perméabilité du réservoir – simulation de référence

Nous avons tout d'abord défini un modèle de référence (Simulation 0 – Figure 3). Les perméabilités ont été krigées à partir des résultats des essais des puits présentés sur la Figure 1. Les conditions initiales du modèle ont été définies en considérant la température mesurée au toit du réservoir et un gradient thermique constant de 3°/100 m, ainsi qu'un gradient hydrostatique. La porosité est considérée constante à 0,15.

La production du réservoir a ensuite été simulée pendant 40 ans, entre 1983 et 2023 (Figure 4).

Nous avons ensuite optimisé la transmissibilité du modèle (Figure 5), un proxy pour la perméabilité, de sorte à minimiser l'écart entre la température de production observée et la température simulée dans le réservoir (Figure 6).

A chaque début d'exploitation du puits, la température de production – classiquement mesurée en entrée de centrale – a été recalculée sur la température du réservoir au droit du puits pour la procédure d'optimisation. Les données de production montrent des oscillations, qui peuvent être dues à de mauvais relevés le plus souvent, nous avons utilisée une moyenne glissante sur 5 ans (pas de temps de 1 ans pour les données) pour la procédure d'optimisation.

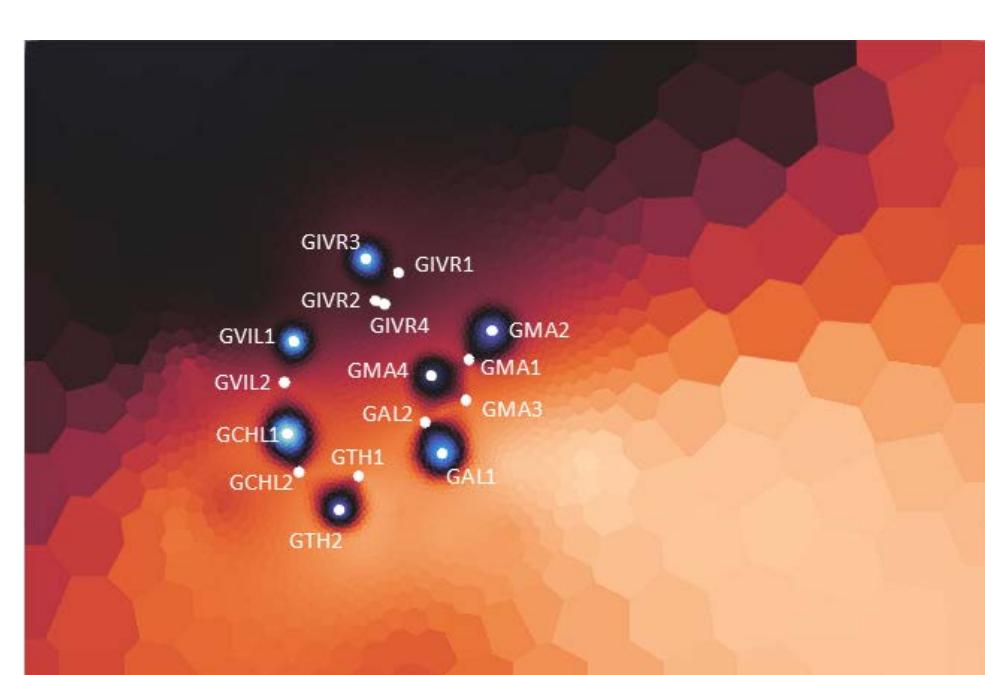


Figure 4 : carte des températures du réservoir après exploitation (1983 – 2023) – simulation de référence

$$\Theta_{ij} = (\theta_{ij}^{-1} + \theta_{ji}^{-1})^{-1}, \quad \theta_{ij} = |\Gamma_{ij}| \frac{K_i \vec{n}_{ij} \cdot \vec{c}_{ij}}{\|\vec{c}_{ij}\|^2}$$

En modélisation des réservoirs, la discréttisation de l'équation de Darcy est le plus souvent réalisé par un schéma d'approximation de flux à deux points, qui décrit le flux entre deux cellules voisines i et j et leur différence de pression, $v_{ij} = -\Theta_{ij}(\rho_i - \rho_j)$. La constante de proportionnalité Θ_{ij} est appelée la transmissibilité. Elle dépend des propriétés géométriques de la grille et du tenseur de perméabilité et peut être calculée une fois pour toute une fois la grille et les propriétés pétrophysiques définies.

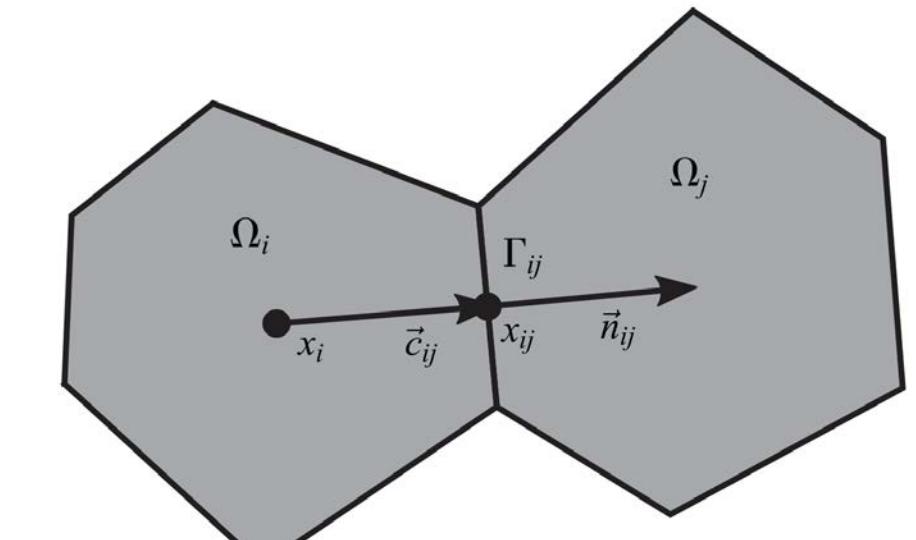


Figure 5 : Définition de la transmissibilité dans un schéma d'approximation de flux à deux points.

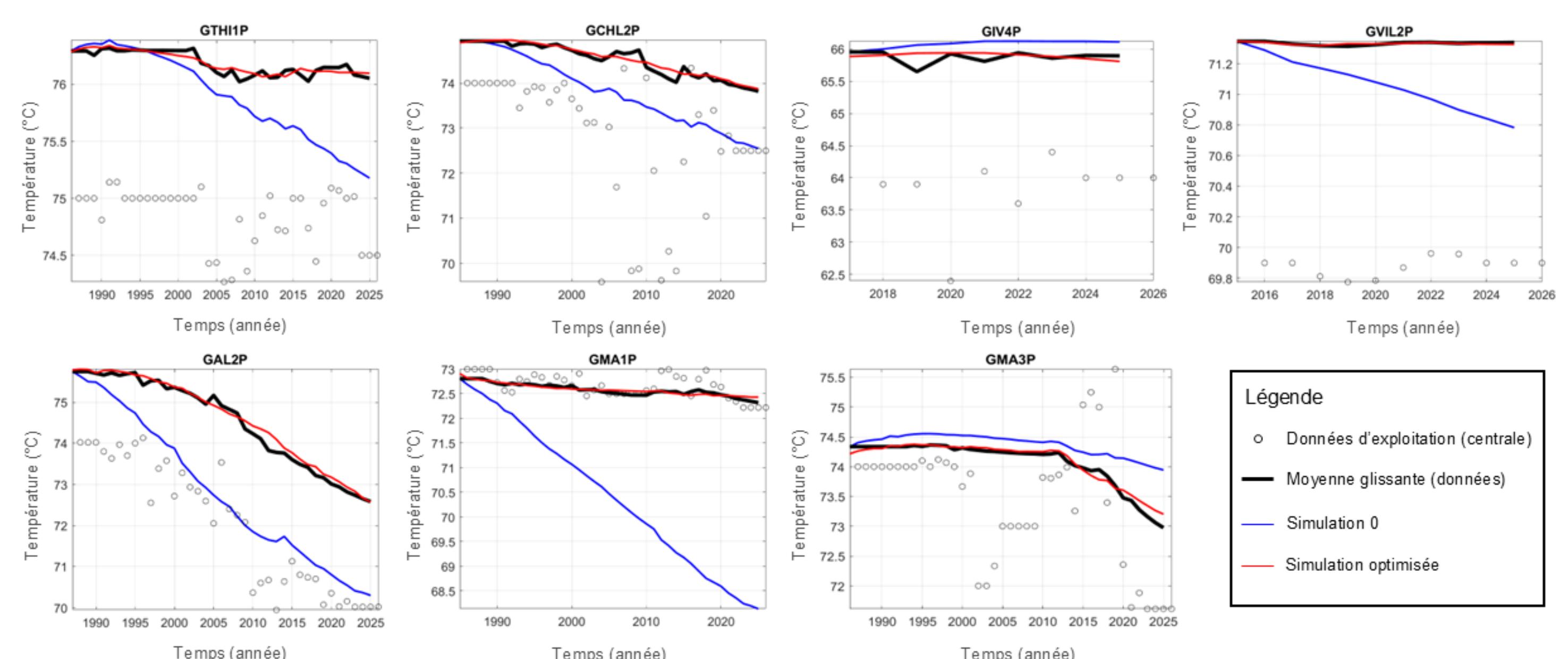


Figure 6 : Evolution des températures de production (en entrée centrale) et dans le réservoir au droit des différents puits producteur de l'étude. Ronds noirs : données d'exploitation non corrigées. Trait noir : température dans le réservoir pour une transmissibilité optimisée. Trait bleu : température dans le réservoir pour la simulation de référence (simulation 0).

Approche statistique

L'optimisation des transmissibilités permet de générer une représentation optimisée des perméabilités (non présentée ici), mais ne fournit pas d'information quant à l'incertitude des perméabilités. Nous avons donc utilisé une approche stochastique complémentaire, dans laquelle nous avons réalisées 100 réalisations aléatoires de la distribution des perméabilités en supposant une distribution gaussienne des valeurs (Figure 7).

Nous avons ensuite simulé l'exploitation pendant 40 ans (Figure 8). Les différentes simulations permettent de déterminer une enveloppe d'incertitude.

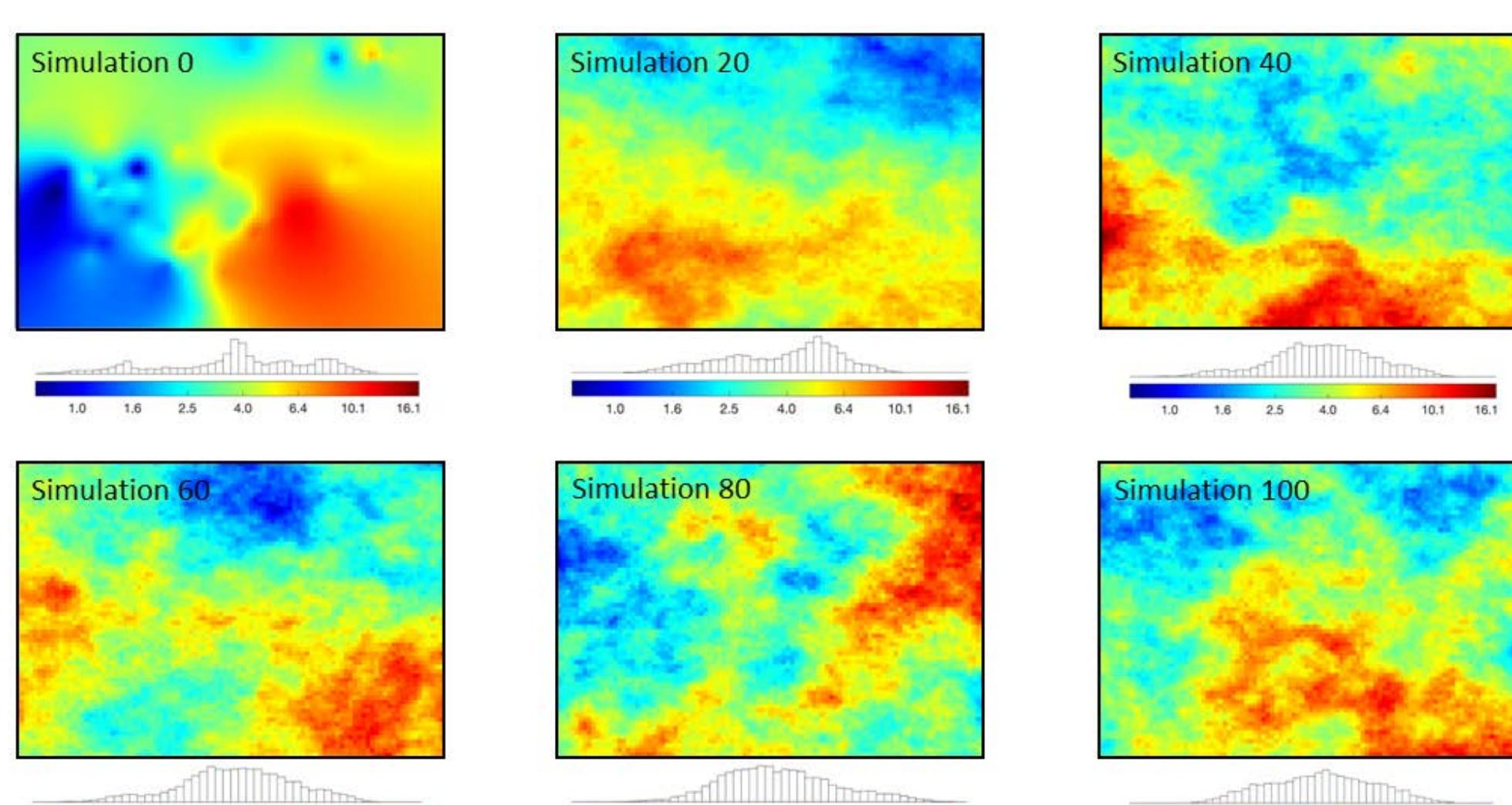


Figure 7 : Cartes des perméabilités pour quelques une des 100 simulations et perméabilité du modèle de référence (simulation 0)

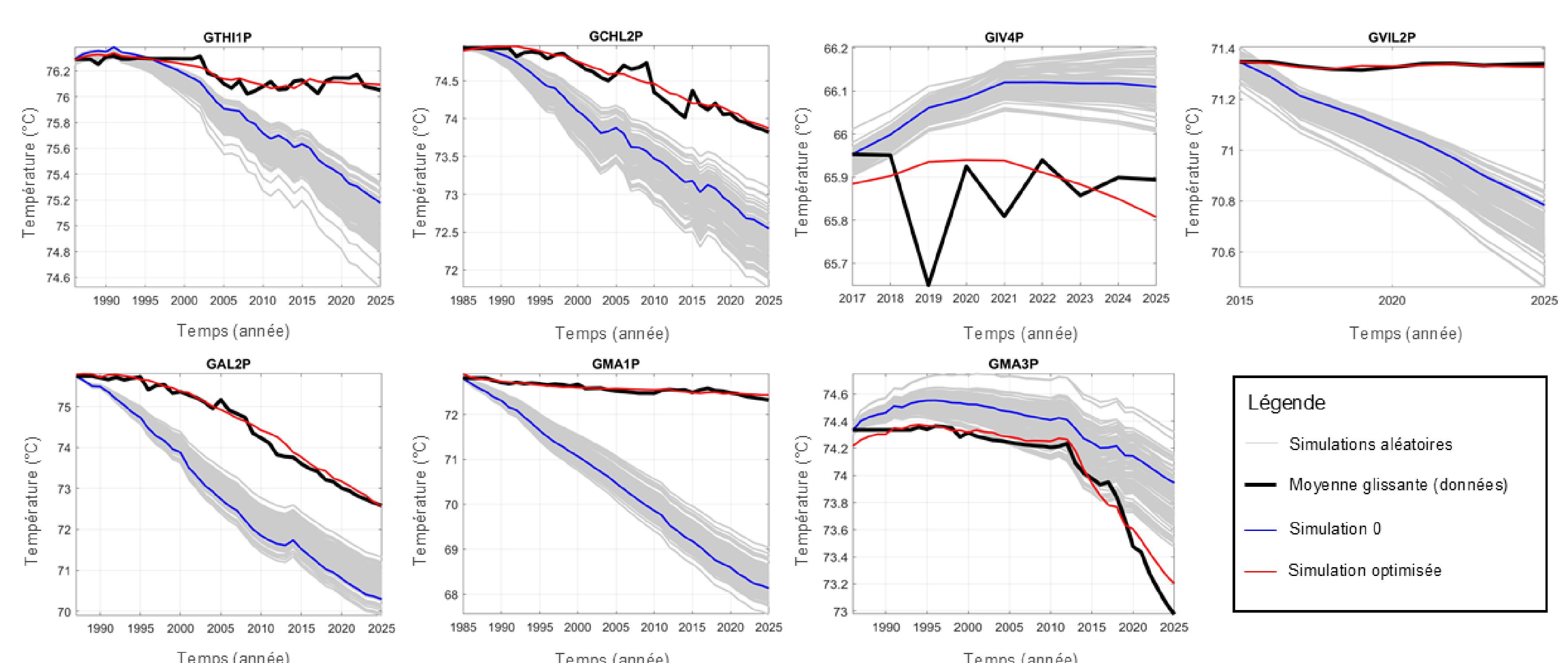


Figure 8 : Evolution des températures dans le réservoir au droit des différents puits producteur de l'étude. Trait noir : données d'exploitation moyennées et ramenées à la température du réservoir. Trait rouge : température dans le réservoir pour une transmissibilité optimisée. Trait bleu : température dans le réservoir pour la simulation de référence (simulation 0). Traits gris : température dans le réservoir pour les 100 simulations aléatoires.

Conclusions et perspectives

Nos simulations montrent que les logiciels libres MRST et JutulDarcy.jl peuvent être utilisés pour simuler rapidement des problèmes d'optimisation des réservoirs géothermiques. La simulation optimisée reproduit dans l'ensemble bien les données observées. Cependant, toutes les simulations avec des perméabilités générées aléatoirement ou celles du modèle de référence dévient globalement du modèle optimisé et des données d'exploitations.

Plusieurs pistes de recherches futures sont envisagées pour cette étude :

- Une étude approfondie des données d'exploitation
- Optimiser les perméabilités (et non la transmissibilité), ainsi que d'autres paramètres comme l'épaisseur du modèle, la conductivité thermique, la porosité, etc...
- Tester des modèles géologiques plus complexes (autres que sandwich) avec des perméabilités obtenues des diagraphies
- En dériver des relations entre les différentes échelles spatiales
- Tester cette approche sur d'autres secteurs du Dogger parisien

Références

- Collignon et al., 2021. Simulation of geothermal systems using MRST. In "Advanced Modelling with the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST)", K.-A. Lie and O. Møyner, eds., pp 491-514, Cambridge University Press.
- Berge et al. Unstructured PEBC grids conforming to lower-dimensional objects. In "Advanced Modelling with the MATLAB Reservoir Simulation Toolbox (MRST)", K.-A. Lie and O. Møyner, eds., pp 3-40, Cambridge University Press.
- Møyner 2024. JutulDarcy.jl a fully differentiable high-performance reservoir simulator based on automatic differentiation. ECMOR, vol. 1, 1-9 p.
- Klemetsdal et al., 2023. Modelling and optimization of shallow underground thermal energy storage. Geoenergy.