

Impacts hydromécaniques des nouvelles architectures de puits en géothermie conventionnelle

Hydromechanical impacts of novel well architectures in conventional geothermal exploitation

Théophile GUILLON^{1*}, Antoine ARMANDINE LES LANDES¹, Virginie HAMM¹, Van-Hieu TRAN¹

1 Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France

**t.guillon@brgm.fr*

RESUME : Des architectures de puits nouvelles apparaissent en géothermie profonde conventionnelle car elles permettent l'exploitation d'horizons sinon inexploitable avec des forages classiques (peu productifs et/ou en zones densément exploitées). Les débits et les étendues d'exploitation plus élevés qu'elles offrent peuvent avoir des répercussions mécaniques sur les réservoirs. L'objectif de cette étude est d'estimer ces effets. Des modèles numériques sont utilisés pour évaluer la réponse hydromécanique d'une exploitation avec des architectures nouvelles (horizontales et/ou multi-drains). Les résultats montrent que, sur une durée d'exploitation de 30 ans, les répercussions mécaniques sont assez faibles : les déformations sont inférieures au centième de pourcent et les déplacements inférieurs à 5 millimètres à plus d'un kilomètre de profondeur. Par ailleurs, les contraintes estimées sont largement éloignées de la limite de rupture, tant dans le réservoir qu'au proche-puits.

ABSTRACT: Novel well architectures are introduced in deep geothermal conventional exploitation. These architectures give access to production horizons that cannot be exploited with regular wells otherwise (less transmissive and/or in regions already highly exploited). The higher production flowrates and reached areas made possible can have mechanical impacts in the reservoir. In this study, we propose to estimate and analyze these hydromechanical effects. We use numerical simulations to estimate the reservoir hydromechanical response to geothermal production through novel architectures (horizontal and/or multi-drain). According to simulation results, mechanical impacts are low even after 30 years of exploitation: strains remain below hundredths of percents and displacements are below 5 millimeters at 1.4 kilometers depth. Besides, stresses are far from the plastic yield, both in the reservoir and in close-well vicinity.

Mots-clés: géothermie ; hydromécanique ; bassin parisien ; puits

1 INTRODUCTION

La géothermie profonde conventionnelle consiste à extraire de la chaleur provenant de 1 à 3 km de profondeur avec un puits de production et à réinjecter le fluide après en avoir extrait les calories (puits de réinjection). À ce jour, la géothermie profonde fournit environ 2,3 TWh par an en France métropolitaine (environ 5% des sources de consommation de chaleur) dont environ 2 proviennent de la seule exploitation du Bassin parisien (voir AFPD, 2025). En particulier, les calcaires du Dogger sont très exploités (environ 50 installations) car ses propriétés permettent des débits de production de l'ordre de 300-350 m³/h à une température moyenne de 70°C environ.

Afin de pouvoir étendre la zone d'exploitation (zones moins transmissibles ou transmissibles déjà densément exploitées), de nouvelles architectures de puits sont introduites et consistent à toucher davantage d'horizons perméables ou à accroître la surface

d'échange à partir d'un même forage (architecture horizontale ou multi-drains).

Les analyses de ce type d'installations sont encore aujourd'hui très orientées vers leur productivité énergétique (couplage thermohydraulique TH). Pourtant, les étendues des cônes de surpression/dépression engendrés par ces nouvelles architectures peuvent occasionner des déformations du milieu environnant (effets hydromécaniques HM voire thermohydromécaniques THM). Les études mécaniques couplées trouvées dans la littérature concernent essentiellement des applications pétrolières (Zhao et al, 2022 ; Li et al, 2023) ou de géothermie en milieu fracturé (Chen et al, 2018 ; Gudala et al, 2023).

Nous proposons d'étudier les effets mécaniques induits par l'exploitation de réservoirs géothermiques conventionnels par ces nouvelles architectures. Le papier se structure selon cinq sections : modèle numérique et cas de référence basé sur un doublet

classique (paragraphe 2 et 3), résultats du cas de référence (4), étude des impacts mécaniques des nouvelles architectures de puits (5) et impacts de paramètres hydrauliques et/ou mécaniques (6). Enfin, la conclusion reviendra sur les perspectives de ce travail.

2 MODELE NUMERIQUE

2.1 Stratégie de modélisation et code de calcul

Pour répondre à des besoins de temps de calculs réduits, une stratégie de couplage unidirectionnel est choisie : d'abord, la réponse TH dynamique du milieu à une exploitation géothermique est simulée avec le code open-source ComPASS (BRGM 2025). Ensuite, les cartes de pression obtenues sont interpolées dans le logiciel Flac3D (Itasca, 2017) qui va calculer l'équilibre quasi-statique du milieu en tenant compte de ces pressions.

Du fait du milieu relativement simple (milieu tabulaire, pas de faille/fracture), cette stratégie semble acceptable au moins pour une première étude.

Cet article se concentre sur la réponse mécanique du milieu, nous avons donc fait le choix de ne présenter que les résultats issus de Flac3D.

2.2 Lois mécaniques

L'équilibre statique est donné par la loi de conservation :

$$\text{div}(\boldsymbol{\sigma}) + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0} \quad (1)$$

où $\boldsymbol{\sigma}$ (Pa) est le tenseur de contrainte, ρ (kg/m³) la masse volumique du milieu et \mathbf{g} (m/s²) l'accélération de la gravité.

La contrainte effective s'exprime selon la loi de Terzaghi (squelette solide incompressible) :

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma} + p\boldsymbol{\delta} \quad (2)$$

où $\boldsymbol{\sigma}'$ (Pa) est la contrainte effective, p (Pa) la pression de pore et $\boldsymbol{\delta}$ (-) le tenseur identité.

Le milieu poreux est considéré comme élastoplastique, homogène et isotrope. La part élastique est gouvernée par :

$$\boldsymbol{\sigma}' - \boldsymbol{\sigma}'_0 = 3K_o \varepsilon_V \boldsymbol{\delta} + 2G\mathbf{e} \quad (3)$$

Où $\boldsymbol{\sigma}'_0$ (Pa) est la contrainte effective initiale, K_o (Pa) et G (Pa) sont respectivement les modules d'incompressibilité drainé et de cisaillement, et ε_V (-) et \mathbf{e} (-) sont respectivement les composantes volumique et déviatorique du tenseur de déformation.

Enfin, la limite plastique est définie par la loi de Mohr-Coulomb qui, dans Flac3D, est donnée par :

$$\sigma'_3 = \frac{\sigma'_1 + 2c\sqrt{N_\phi}}{N_\phi} \quad (4)$$

où σ'_1 (Pa) et σ'_3 (Pa) sont respectivement les contraintes principales majeure et mineure (en compression négative, $\sigma'_1 \leq \sigma'_3$), c (Pa) est la cohésion et N_ϕ (-) un paramètre dépendant de l'angle de friction interne ϕ (°) : $N_\phi = (1 + \sin(\phi))/(1 - \sin(\phi))$.

3 CAS D'ETUDE : DOUBLET CLASSIQUE

3.1 Géométrie et maillage

La géométrie est inspirée de réservoirs géothermiques typiques du Dogger du Bassin parisien dont la structure « tabulaire » est établie sur la base de la flowmétrique et constitués d'alternance d'horizons imperméables et perméables (voir Figure 1A).

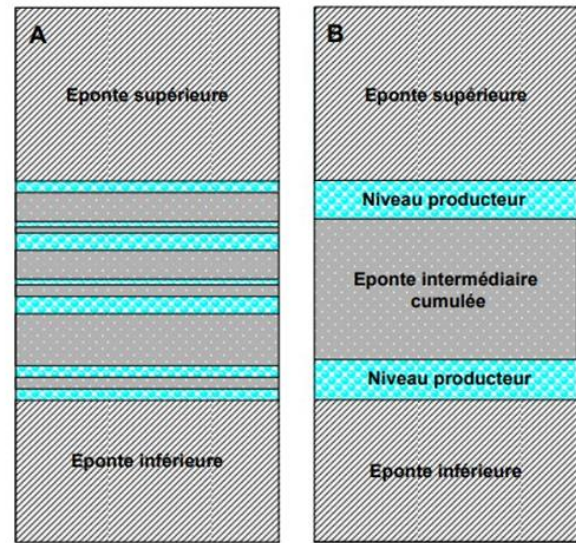


Figure 1. Modèle conceptuel du réservoir géothermique : alternance d'horizons perméables (bleu) et imperméables (gris) : A. géométrie proche-puits in situ et B. simplification à 2 couches des modélisations (d'après Hamm et al, 2010)

Pour les besoins de modélisation, la géométrie est simplifiée en réunissant les horizons perméables en deux couches seulement (voir Figure 1B).

Dans le modèle de référence, une architecture classique est prise en compte pour les puits d'injection et de production (pompage) : les puits sont forés avec une déviation en simple ou double « J » avec une inclinaison maximale par rapport à la verticale d'environ 45° au niveau du réservoir. À ce niveau, l'écartement entre les deux puits est de l'ordre de 1000 à 1500 m.

Le plan horizontal du modèle s'étend sur 5 x 5 km² centrés autour des puits. La hauteur est de 200 m, couvrant la profondeur de 1400 à 1600 m, avec une épaisseur de 7,5 m pour chaque horizon perméable et une épaisseur de 35 m pour l'épente intermédiaire soit une répartition des niveaux producteurs sur 50 m (Figure 2).

Un compromis a dû être pris pour la taille des mailles afin de limiter les temps de calcul. Le maillage est constitué de 610k hexaèdres, avec une taille de maille XYZ de 15 x 15 x 5 m³ environ. Les horizons producteurs sont raffinés verticalement, avec une taille de 1 m environ selon l'axe Z dans ces deux couches.

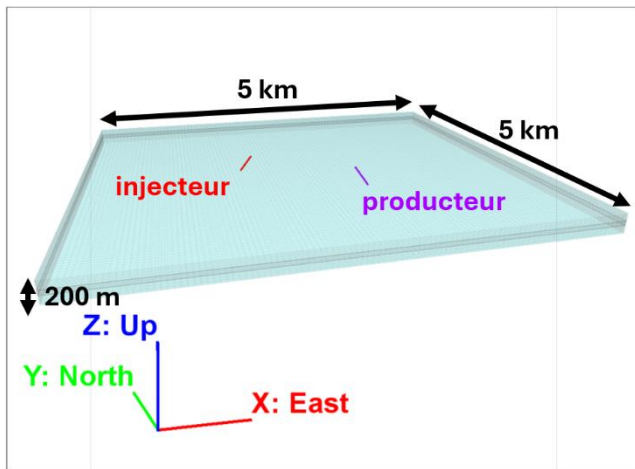


Figure 2. Géométrie du modèle de référence constituée de 5 couches horizontales et de deux puits inclinés

3.2 Conditions aux limites et initiales

Les bords du modèle sont soumis à un état de contrainte représentatif des conditions tectoniques *in situ* : régime de contrainte décrochant avec une contrainte verticale S_V égale au poids des terres, une contrainte horizontale majeure S_H orientée N150° de magnitude égale à S_V et une contrainte horizontale mineure S_h de magnitude égale à 80% de celle de S_V (Veloso et al, 2021). Afin de bloquer un déplacement global du modèle, les bords ouest, nord et du bas sont soumis à un déplacement normal bloqué plutôt qu'à l'état de contrainte tectonique.

L'état initial résulte de l'équilibre entre la gravité, les conditions aux limites données ci-dessus et la pression initiale (gradient hydrostatique, en accord avec le modèle hydrodynamique).

3.3 Paramètres mécaniques

Les paramètres élastiques sont estimés à partir de mesures de vitesses V_p/V_s dans le Bassin parisien (Bush et Crampin, 1991). Les paramètres plastiques ne sont toutefois pas disponibles, et des valeurs

empiriques sont considérées (Bemer et al, 2004 ainsi que Esterhuizen et al, 2013).

Les propriétés ont été homogénéisées sur tout le modèle et sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Propriétés mécaniques du modèle

ρ (kg/m ³)	K_o (Pa)	G (Pa)	c (Pa)	ϕ (°)
2600	17,7e9	9,6e9	10e6	30

4 RESULTATS

4.1 Déformation

Au bout de 30 ans d'injection, les déformations volumiques ε_V sont très faibles – de l'ordre de 10^{-5} . Ceci est dû à la variation de pression faible par rapport à l'état de contrainte environnant (Δp final entre 0 et 10% de l'état de contrainte effective initial).

Dans un milieu poreux avec grains incompressibles (tel que dans notre modèle), toute la déformation est reprise par l'espace poral et ε_V correspond donc à la variation de porosité. Ici, la variation attendue est très faible et laisse penser que l'impact de la mécanique sur les propriétés hydrodynamiques serait négligeable.

4.2 Déplacement

Les déplacements peuvent être responsables de désordres en surface. En cohérence avec les déformations très faibles, les déplacements verticaux au toit du modèle (profondeur de 1400 m) sont également faibles : entre -3.5 mm autour du producteur et 2 mm autour de l'injecteur (respectivement subsidence et soulèvement), voir la Figure 3. Des effets en surface sont donc peu probables.

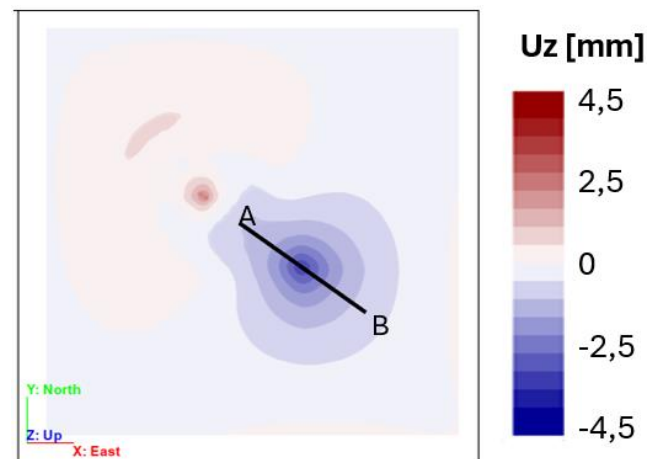


Figure 3. Déplacement vertical au toit du modèle (prof. 1400m) après 30 ans d'injection. L'injecteur est en rouge au NO et le producteur en violet au SE

À noter que la cause de l'asymétrie des déplacements verticaux (subsidence > soulèvement)

est double. L'asymétrie dépression/surpression est déjà observée dans les calculs hydrodynamiques et est amplifiée par l'effet mécanique de la gravité : à différentiel de pression égal, la roche pourra plus facilement s'écraser que se dilater du fait du poids des terres du dessus agissant vers le bas.

4.3 État de contrainte

D'après les calculs, le milieu n'atteint jamais la limite de plasticité (Figure 4). Des mailles correspondant au proche-puits (distance aux puits inférieure à 100 m) sont mises en avant sur la figure. Une limite de Mohr-Coulomb correspondant à un cas extrême (cohésion nulle) est ajoutée pour illustrer à quel point le milieu est loin de la rupture par cisaillement.

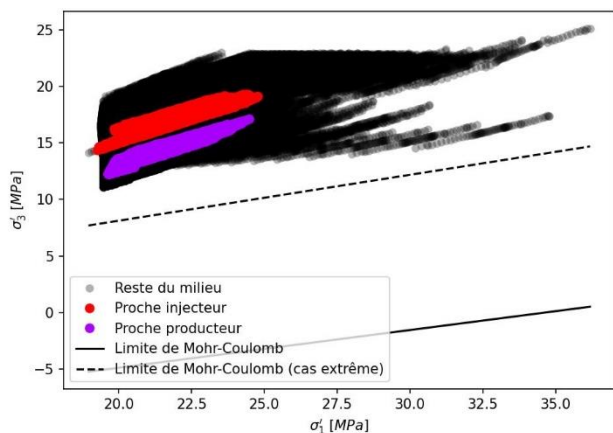


Figure 4. Etat de contrainte dans le milieu après 30 ans. La zone au-dessus de la limite de Mohr-Coulomb est la zone d'élasticité (convention de compression positive). Le trait pointillé correspond à une limite à cohésion nulle

4.4 Cisaillement au proche-puits

Un des risques majeurs lors de l'exploitation de réservoirs est qu'un cisaillement endommage le puits et le rende inexploitable. Les résultats de contrainte ci-dessus montrent que les résultats sont loin de la rupture dans tout le réservoir, et donc y compris au proche-puits. Toutefois, il peut-être intéressant de voir où et quand se concentrent ces effets.

L'évolution du delta de déviateur de contrainte ΔJ_2 (Pa) donne un aperçu des effets de cisaillement. Cette grandeur est définie selon :

$$\Delta J_2 = \frac{1}{2} (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) : (\mathbf{s} - \mathbf{s}_0) \quad (5)$$

où \mathbf{s} (Pa) est la contrainte déviatorique et \mathbf{s}_0 (Pa) la contrainte déviatorique à l'état initial.

L'évolution du profil du ΔJ_2 dans les puits injecteur et producteur suivent les mêmes tendances, seule celle de l'injecteur est tracée (Figure 5). Les effets de

cisaillement sont très concentrés autour des horizons perméables (zones grisées) et *a priori* dus aux discordances de perméabilité/imperméabilité aux interfaces qui favorisent les écarts de pression forts de part et d'autre de ces interfaces.

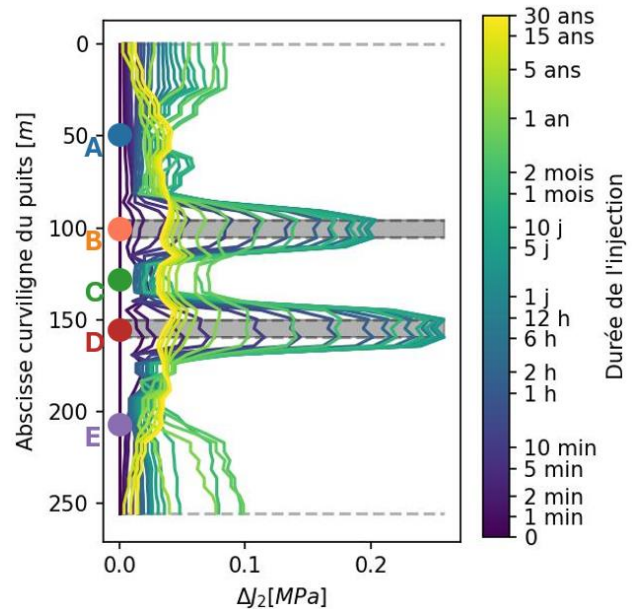


Figure 5. Evolution du déviateur de contrainte le long du puits d'injection. L'axe des ordonnées représente la position le long des puits (le 0 correspond au haut du puits). Les traits pointillés indiquent les interfaces entre les couches, et les couches perméables sont surlignées en gris

Par ailleurs, ces effets apparaissent assez rapidement (quelques jours) et mettent beaucoup de temps à se résorber (plusieurs mois), voir la Figure 6.

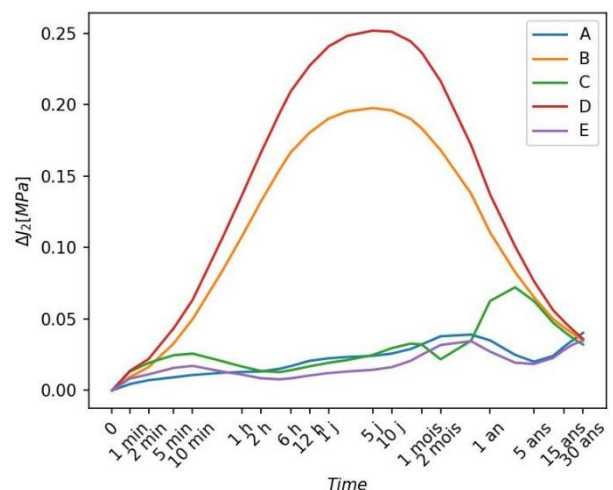


Figure 6. Evolution du déviateur de contrainte au cours du temps dans le puits d'injection (voir points A, B, C, D et E sur la Figure 5)

5 NOUVELLES ARCHITECTURES DE PUITES

5.1 Architecture horizontale

L'architecture horizontale consiste à d'abord suivre une trajectoire classique pour atteindre le réservoir, puis de la dévier fortement selon une direction quasi horizontale dans le réservoir (inclinaison par rapport à la verticale entre 80 et 90°), ceci afin d'obtenir un drain en contact avec l'horizon de production le plus long possible.

Seuls deux sites existent actuellement dans le Bassin parisien avec cette configuration (Cachan, foré en 2017/2018 et Grigny-Viry, foré en 2022/2023) mais d'autres de ce type sont en cours de développement (Chatenay-Malabry...). L'architecture permet d'avoir des drains de 800 à 1000 m de long sur des hauteurs inférieures à 100 m. Le retour d'expérience du site de Cachan montre un fonctionnement stable du doublet, avec des débits de production montant à plus de 400 m³/h en période hivernale pour une température de production stable autour de 60 °C et une température d'injection autour de 45 °C.

Pour plus de détails, voir Hamm et al, 2024.

5.2 Architecture multi-drains

L'architecture multi-drains consiste à forer un puits selon une trajectoire classique puis de le ramifier en plusieurs drains au niveau du réservoir. Cette architecture permet d'avoir plusieurs points d'injection/pompage à partir d'un seul forage principal.

Un seul site existe à ce jour dans le Bassin parisien et se situe à Vélizy-Villacoublay mais d'autres sont en cours de développement (Le Chesnay-Rocquencourt, Meudon...). Chaque puits est subdivisé en 3 drains au niveau du réservoir, un central qui suit la trajectoire principale sur 100 m et deux latéraux qui reprennent chacun une trajectoire en « U » sur 600 m de longueur et 100 m de hauteur environ. Le retour d'expérience montre une exploitation stable, avec un débit en saison hivernale de 350 m³/h, une température de production autour de 60 °C et une température de réinjection de 35 °C.

Pour plus de détails, voir Hamm et al, 2024.

5.3 Modèles

Partant des mêmes positions en haut du modèle, les trajectoires des puits sont adaptées pour suivre les architectures testées.

Pour l'architecture horizontale, les trajectoires des puits sont déviées afin de traverser les deux horizons perméables horizontalement. Les trajectoires sont

déviées vers le Nord pour le puits injecteur et vers l'Est pour le producteur (Figure 7). Les longueurs des drains horizontaux sont de 400 m.

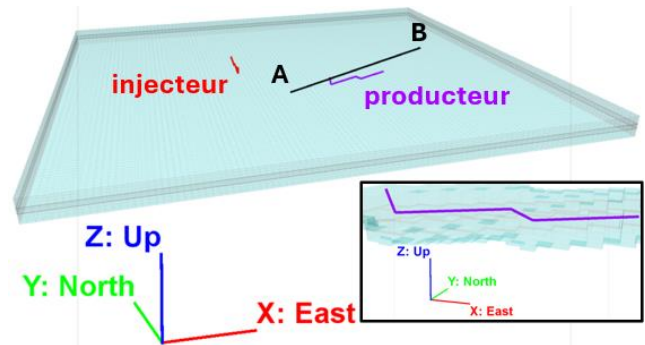


Figure 7. Géométrie du modèle avec puits horizontaux. Les drains horizontaux traversent les deux couches perméables. L'encart donne une vue rapprochée des puits producteur

Pour l'architecture multi-drains, chaque puits est constitué d'un drain central incliné ainsi que de deux drains latéraux en « U » (*i.e.*, qui remontent). Les trajectoires sont déviées vers le Nord-Ouest pour le puits injecteur et vers le Sud-Est pour le producteur (Figure 8). Les longueurs des drains horizontaux sont de 400 m.

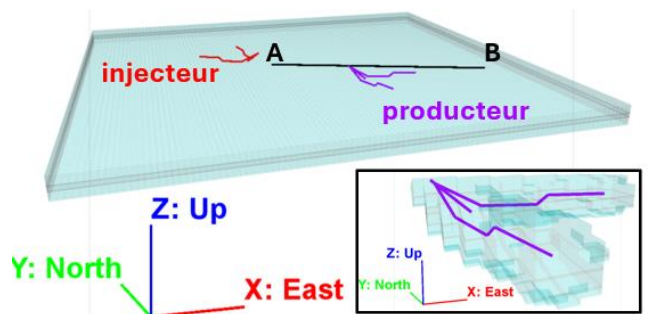


Figure 8. Géométrie du modèle multi-drains. Les drains horizontaux traversent les deux couches perméables. L'encart donne une vue rapprochée des puits producteur

Hormis les architectures des puits et les pressions correspondantes issues des calculs hydrodynamiques, les modèles restent identiques en tout point à celui de référence (géométrie, maillage, conditions aux limites et initiales ainsi que paramètres).

5.4 Résultats : déplacements

Les drains des architectures nouvelles étant davantage étendus que pour le doublet classique, les surpressions et dépressions sont moins concentrées spatialement. En conséquence, les déformations sont encore plus réduites pour ces architectures (2 à 3,5 10⁻⁵ contre 4,5 10⁻⁵ pour le doublet classique).

Les déplacements verticaux au toit du modèle (profondeur de 1400 m) sont plus marqués pour le doublet classique (Figure 9). Ils sont par ailleurs

d'avantage étendus latéralement et suivent les cônes de dépression obtenus avec les calculs hydrodynamiques (non montrés ici). Ces résultats sont cohérents car, dans la configuration du modèle, les variations de pression sont quasiment le seul facteur de déformation (peu de redistribution de contraintes dues à des hétérogénéités de géométrie ou de comportement mécanique).

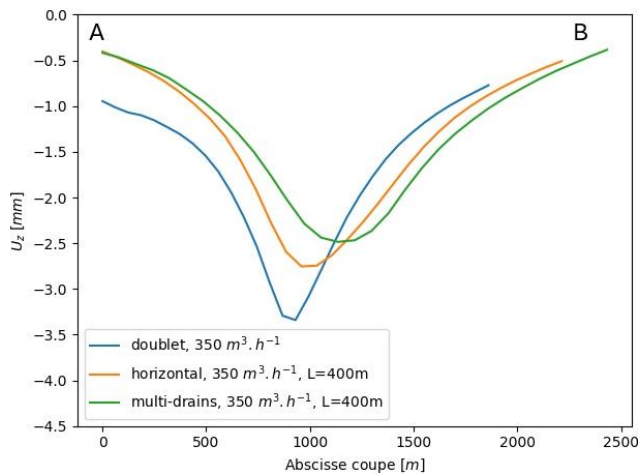


Figure 9. Subsidence autour du puits producteur pour les trois architectures modélisées et après 30 ans d'injection (voir coupes AB sur les Figure 3, Figure 7 et Figure 8)

5.5 Résultats : contraintes

L'architecture classique est celle qui affiche le plus d'effets de cisaillement bien que la différence soit faible. Cette observation peut être mise en évidence en traçant le maximum atteint par le ΔJ_2 pour les trois architectures modélisées (Figure 10 pour l'injecteur, et tendance similaire pour le producteur non montrée ici).

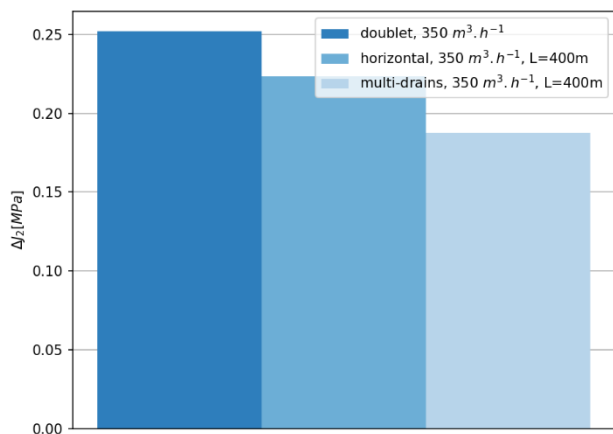


Figure 10. Comparaison du ΔJ_2 entre les architectures de puits (maximum le long du puits injecteur au cours de l'exploitation)

6 EFFETS VARIES

6.1 Conditions d'exploitation

Nous réunissons dans les conditions d'exploitation les grandeurs impactant le modèle hydrodynamique et donc indirectement le modèle mécanique (via les cartes de pression transférées du premier au second).

Trois grandeurs sont testées :

- Débit d'exploitation (450 m³/h au lieu de 350) ;
- Longueur des drains des architectures nouvelles (1000 m au lieu de 400) ;
- Perméabilité des horizons perméables (divisée par 2) ;

Pour les deux architectures nouvelles, les déformations et déplacements verticaux suivent la même tendance que les cônes de sur/dépression (cônes non-montrés dans cet article). Puisque les tendances sont très similaires, seuls les résultats des tests avec l'architecture horizontale sont présentés. Les facteurs les plus impactants sont, par ordre croissant (Figure 11 et Figure 12):

- La longueur des drains : en étendant la zone d'injection/production, les cônes sont moins concentrés autour des puits et donc les zones de déformation plus étendues ;
- Le débit : en augmentant le débit, les cônes sont davantage marqués et donc les déformations aussi ;
- La perméabilité : en réduisant la perméabilité, les sur/dépressions s'accumulent davantage dans les horizons perméables et donc les déformations aussi ;

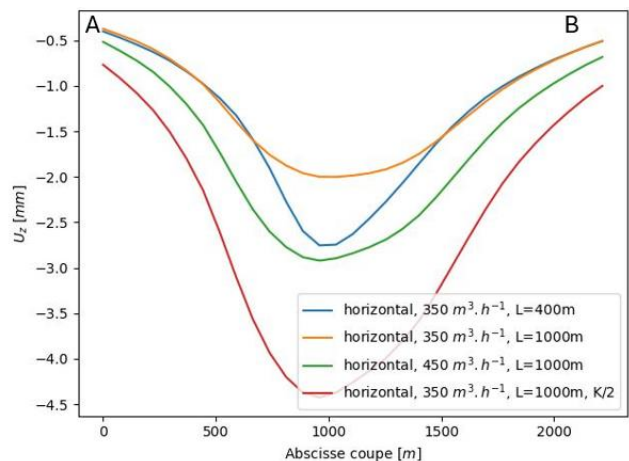


Figure 11. Subsidence autour du puits producteur pour les différentes conditions d'exploitation de l'architecture horizontale et après 30 ans d'injection (voir coupe AB sur la Figure 7)

Le maximum de déviateur de contrainte suit la même tendance (Figure 12), confirmant que dans le

cas d'étude, les sur/dépressions sont la source majeure de potentielles instabilités (contrairement à un cas où, par exemple, des hétérogénéités de paramètres et/ou de structure géologique occasionnent des redistributions locales de contrainte marquées). À noter toutefois : la réduction de perméabilité a un impact fort car elle renforce le contraste de pression entre les horizons perméables et imperméables.

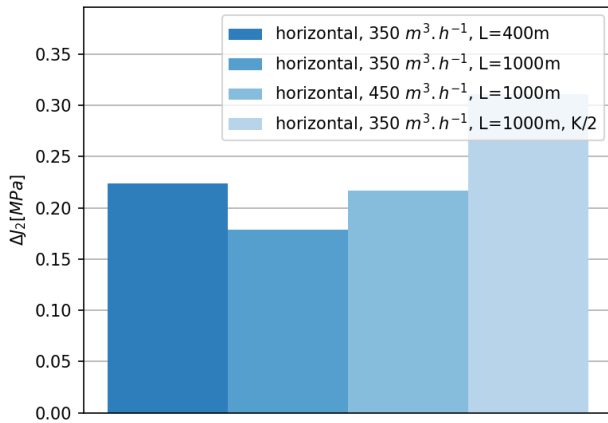


Figure 12. Comparaison du ΔJ_2 pour les différentes conditions d'exploitation de l'architecture horizontale (maximum le long du puits injecteur au cours de l'exploitation)

6.2 Propriétés mécaniques

Dans les calculs précédents, les propriétés mécaniques sont homogènes dans tout le milieu. *In situ*, les horizons correspondent à des lithologies différentes qui vont avoir des propriétés différentes. L'ajustement des valeurs est fait qualitativement considérant que :

- L'éponte intermédiaire est davantage cimentée (niveaux imperméables au niveau du Bathonien) : milieu *a priori* plus raide et cohésif ;
- Les niveaux au-dessus et en-dessous sont davantage marneux/argileux (Callovien et Bajocien) : milieu *a priori* plus tendre et ductile ;

Les paramètres pris en compte sont donnés dans le Tableau 2. Le test hétérogène n'a été fait que sur le cas de référence (doublet) car les perturbations hydrodynamiques ayant été considérées *a priori* comme les plus impactantes, les calculs de sensibilité aux paramètres mécaniques ont été limités au profit de l'étude de sensibilité aux conditions d'exploitation.

Tableau 2. Propriétés mécaniques du modèle hétérogène

Horizon	ρ (kg/m ³)	K_0 (Pa)	G (Pa)	c (Pa)	ϕ (°)
Perméable	2600	17,7e9	9,6e9	10e6	30
Imperméable (sup et inf)	2600	14,0e9	6,6e9	7e6	21
Imperméable (interm.)	2600	21,2e9	11,5e9	12e6	30

Il ressort que les propriétés élastiques sont impactantes (comparable à un débit d'exploitation fort dans le milieu homogène, voir Figure 13).

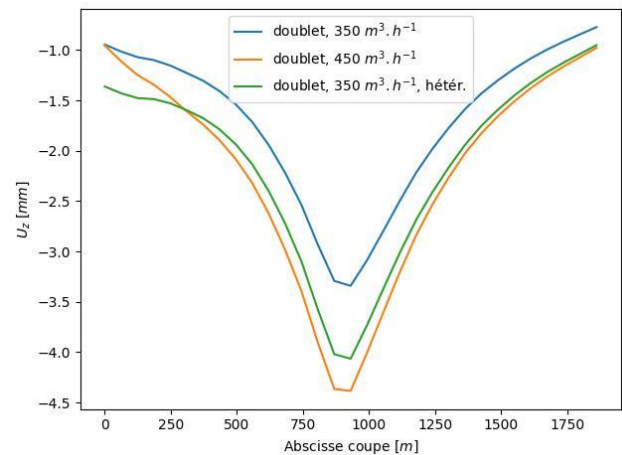


Figure 13. Subsidence autour du puits producteur du doublet classique pour les propriétés mécaniques homogènes et hétérogènes et après 30 ans d'injection (voir coupe AB sur la Figure 3). Le résultat du modèle homogène à 450 m³/h a été ajouté pour comparaison

Il semblerait que ce soit les valeurs des propriétés en elles-mêmes (milieu davantage déformable) plutôt que leur alternance qui soit le facteur d'impact (pas d'effet sur le ΔJ_2 , voir Figure 14)

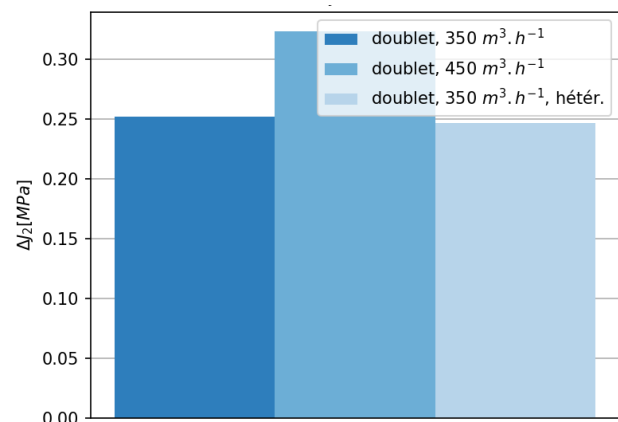


Figure 14. Comparaison du ΔJ_2 pour le modèle classique avec propriétés mécaniques homogènes et hétérogènes (maximum le long du puits injecteur au cours de

l'exploitation). Le résultat du modèle homogène à 450 m³/h a été ajouté pour comparaison

7 CONCLUSIONS

Les calculs réalisés montrent des effets mécaniques limités de l'exploitation d'architectures nouvelles en géothermie conventionnelle : déformation de l'ordre de 10⁻⁵, déplacement vertical à 1400 m de profondeur de quelques millimètres, état de contrainte dans le réservoir à plusieurs dizaines de mégapascals de la limite de plasticité et cisaillement inférieur au mégapascal dans le long des puits.

Pour autant, une étude plus complète nécessiterait de varier davantage de facteur, en particulier ceux affectant les hétérogénéités : horizons plus alternés et/ou moins réguliers (lentilles) ainsi que paramètres mécaniques (statistique de distribution au sein de chaque horizon). Les autres paramètres à étudier seraient autant sur la physique (lois de comportement élastoplastiques, conditions aux limites, conditions initiales...) que méthodologique (méthode de couplage, interpolation des pressions...).

8 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME et le BRGM pour le financement du projet REX DEV ARCHI dans le cadre duquel ce travail a été réalisé.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFPG (2025). La géothermie en France : étude de filière 2025, Disponible à l'adresse : https://www.afpg.asso.fr/wp-content/uploads/2025/12/Etude-de-filiere-2025_Version-web.pdf, consulté le 09/01/2026
- Bemer, E., Vincké, O., Longuemare, P. (2004). Geomechanical Log Deduced from Porosity and Mineralogical Content. *Oil & Gas Science and Technology - Rev. IFP*, 59(4): 405-426. <https://doi.org/10.2516/ogst:2004028>
- BRGM, INRIA (2025). ComPASS (v4), Disponible à l'adresse : <https://gitlab.com/compass>, consulté le 09/01/2026.
- Bush, I., Crampin, S. (1991). Paris Basin VSPs: case history establishing combinations of fine-layer (or lithologic) anisotropy and crack anisotropy from modelling shear wavefields near point singularities. *Geophysical Journal International*, 107(3): 433-447. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb01405.x>
- Chen, Y., Ma, G., Wang, H., Li, T. (2018) Evaluation of geothermal development in fractured hot dry

- rock based on three dimensional unified pipe-network method. *Applied Thermal Engineering*, 136: 219-228. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.03.008>
- Esterhuizen, G.S., Bajpayee, T.S., Ellenberger, J.L., Murphy, M.M. (2013). Practical Estimation of Rock Properties for Modeling Bedded Coal Mine Strata Using the Coal Mine Roof Rating. *47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium 2013*, San Francisco, USA, pp. 1634-1647.
- Gudala, M., Govindarajan, S.K., Tariq, Z., Yan, B., Sun, S. (2023). Numerical investigations and evaluation of a puga geothermal reservoir with horizontal wells using a fully coupled thermo-hydro-geomechanical model (THM) and EDAS associated with AHP. *Geoenergy Science and Engineering*, 228, <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212035>
- Hamm, V., Castillo, C., Le Brun, M., Goyeneche, O. (2010). Mise en oeuvre de la gestion de la ressource géothermique du Dogger de la région Ile-de-France dans le cadre du dispositif d'acquisition et de stockage des données, BRGM, Orléans, France, Rep. BRGM/RP-58834-FR
- Hamm, V., Armandine Les Landes, A., Guillon, T., Tran, V-H. (2024). Développements et nouvelles architectures de puits : REX du Dogger du Bassin parisien et à l'international, BRGM, Orléans, France, Rep. BRGM/RP-73559FR
- Itasca Consulting Group, Inc. (2017). FLAC3D - Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions Three-Dimensional Distinct Element Code, Ver. 6.0., Itasca, Minneapolis, USA
- Li, P., Fan, Z., Li, M., Zhao, L., Wang, D. (2023). Long-Term Performance and Security of Gas Production for Horizontal-Well Depressurization Exploitation: Insights from a Coupled Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Model for the Shenhua Hydrate Reservoir. *Energy Fuels*, 37: 14824-14835, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02185>
- Veloso, F. M. L., Estublier, A., Bonte, D., Mathurin, F., Frey, J., Maury, J., Poumadère, M., Stephant, S. (2021). Target Area of Paris Basin Region - FR: Data Inventory, Seismic Target and GAP Analysis, Équipe projet EU H2020 PilotStrategy, France
- Zhao, X., Wang, Z., Zhao, Y., Zuo, J., Li, P., Liang, W., Wang, B., Chen, X., Lei, H., Jin, G. (2022). Coupled thermal-hydrodynamic-mechanical numerical simulation of natural gas hydrate horizontal well depressurization production: Method and application in the South China Sea. *Natural Gas Industry B*, 9(6): 548-560, <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.11.005>