

Etude de sensibilité des performances d'un stockage thermique souterrain à faible profondeur

Diane Le Roux*, Hervé Noël, Anthony Magueresse, Adrien Fuentes, Thibaut Colinart

IRDL, UMR CNRS 6027, Univ. Bretagne Sud, Bretagne INP, ENSTA, Institut Polytechnique de Paris, Univ. Brest, Lorient, France (* auteur correspondant : diane.le-roux@univ-ubs.fr)

Résumé - Cette étude évalue un système de stockage saisonnier de chaleur à faible profondeur, utilisant des matériaux naturels (eau, sable) et un échangeur horizontal enterré, pour valoriser l'excédent solaire thermique basse température. Un modèle numérique dynamique (TRNSYS) et une analyse de sensibilité (Morris/Sobol) ont permis d'identifier les paramètres critiques, testés sur trois scénarios, combinant charge/décharge sur 3 à 6 mois, avec données météo fixes ou réelles. Les résultats montrent que l'épaisseur du sol au-dessus du stockage et l'isolation sont déterminants, tandis que la géométrie de l'échangeur de chaleur et les températures en entrée, pour les étapes de charge et de décharge, nécessitent un compromis pour optimiser les performances. A contrario, le diamètre interne des tubes n'a pas un grand impact quels que soient le scénario considéré et les autres paramètres.

Nomenclature

d_{tube}	distance entre les tubes, m	<i>Indices et exposants</i>	
D	diamètre, m	ch	charge
e	épaisseur, m	$dech$	décharge
E	énergie, kWh _{th} ou kWh _e	e	entrée
N_{tube}	nombre de tubes en serpentin, unité	int	interne
T	température, °C	$isol$	isolant
<i>Symboles grecs</i>		s	sortie
η	rendement, -	val	valorisée

1. Introduction

Dans certains secteurs agricoles (bâtiments d'élevage, serre, etc.), les besoins en chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire sont conséquents et majoritairement couverts par des énergies fossiles. Pour décarboner ce secteur, l'énergie solaire thermique a un rôle clé à jouer. Cependant, son intégration se heurte à leur intermittence, limitant leur efficacité et leur fiabilité. De plus, la surproduction estivale de chaleur solaire est souvent dissipée, représentant une perte énergétique significative.

Pour atténuer ces limites et améliorer l'efficacité des systèmes solaires thermiques, les solutions de stockage thermique permettent de capter les excédents de chaleur et de déphaser l'offre et la demande, de quelques heures à plusieurs mois [1][2]. Les stockages thermiques actuels reposent majoritairement sur des réservoirs d'eau, en raison de leurs propriétés thermophysiques avantageuses et de leur faible coût [3]. Cependant, à grande échelle, ces systèmes nécessitent des volumes importants, augmentant l'emprise au sol et les coûts. Une alternative innovante consiste à stocker cet excédent dans un volume souterrain isolé via un échangeur de chaleur (HUTES : *Horizontal Underground Thermal Energy Storage*) pour une restitution ultérieure en automne ou en hiver [4]. En positionnant ce stockage thermique sous le champ solaire, l'emprise au sol reste limitée. Néanmoins, ses performances sont impactées par la conception et les paramètres de fonctionnement du HUTES et par la nature des transferts thermiques dans le sol.

Pour aider au dimensionnement optimal du HUTES, cette étude s'attache à proposer un modèle de HUTES développé sous TRNSYS et à faire une analyse de sensibilité des paramètres de conception et opérationnels selon différents scénarios de fonctionnement.

2. Méthodologie

2.1. Modélisation sous TRNSYS du HUTES

Un banc expérimental, récemment installé dans une ferme agricole en Mayenne, sert d'inspiration au cas d'étude. La Figure 1 présente une vue de côté (plan X-Z) et une coupe verticale (plan Y-Z) du HUTES. Les caractéristiques principales de ce HUTES sont :

- **Géométrie de l'échangeur de chaleur** : 1 tube linéaire sur 1 couche horizontale,
- **Isolation** : faces supérieure/latérales/inférieure en paille
- **Matériaux** : sable (matériau de stockage), tubes multicouches et eau (fluide caloporteur), dont les propriétés thermophysiques sont listées dans le Tableau 1.

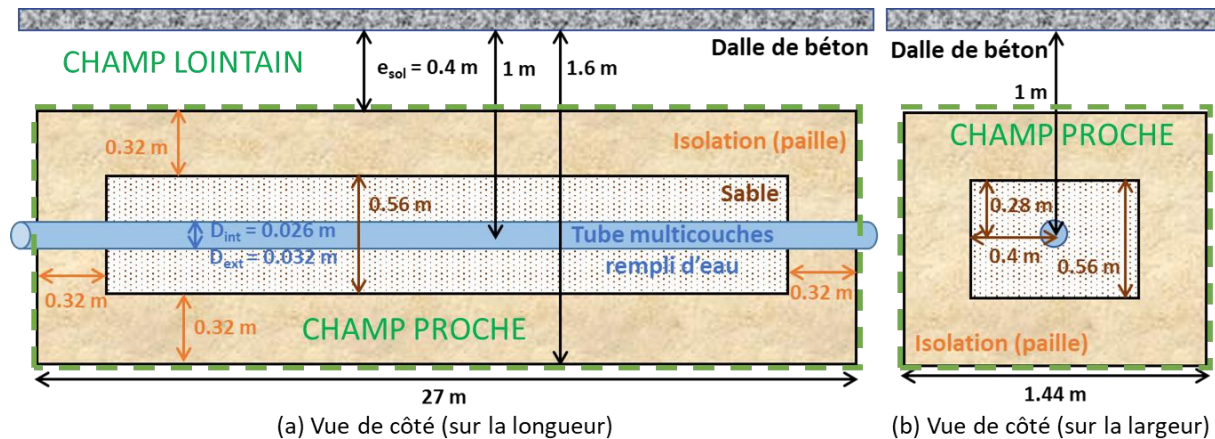


Figure 1 : Schéma simplifié de la vue de côté (plan X-Z) (a) et de la coupe verticale (plan Y-Z) (b)

	Masse volumique (kg.m^{-3})	Capacité calorifique ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Viscosité dynamique ($\text{kg.m}^{-1}.\text{h}^{-1}$)
Sable	2500	1	2,42	-
Eau	1000	4,19	0,55	3,0
Tubes multicouches	-	-	0,42	-

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des matériaux du HUTES étudié

Ce HUTES est modélisé sous TRNSYS à l'aide du Type 999. Basé sur une approche tridimensionnelle implicite par différences finies, ce Type modélise les transferts thermiques par conduction dans le sol et convection dans les tubes en considérant une structure multicouche (tuyaux et sol) aux propriétés variables en profondeur. Les hypothèses principales de ce modèle sont : sol homogène, isotrope et poreux, avec des propriétés thermophysiques constantes (indépendantes de l'humidité) ; humidité relative uniforme ; fluide caloporteur (eau) et isolant aux propriétés stables, sans changement de phase ni réaction chimique. Lors de la résolution, le modèle distingue (cf. Figure 1) :

- Champ proche : zone isolée autour des tuyaux, active thermiquement.
- Champ lointain : zone frontière à température constante, limitant les effets de bord.

Des conditions aux limites sont définies aux frontières : une condition de conduction est fixée avec une température fixe du champ lointain (10°C sur les faces latérales et données météorologiques sur la face supérieure) et une condition adiabatique est imposée sur la face inférieure (à défaut de pouvoir considérer explicitement l'isolant sur cette face). Les conditions initiales supposent une température homogène du sol et du fluide caloporteur de 10°C.

L'architecture fonctionnelle du modèle de HUTES couplé à une pompe est illustrée sur la Figure 2. Le cœur du modèle (*Bloc principal* en jaune) est organisé autour de 3 éléments principaux : un fichier météo indiquant la température extérieure et le rayonnement incident sur le sol (*Meteo*), une pompe de circulation (*Pompe*), et le Type 999 (*HUTES*). Ces composants sont pilotés par une calculatrice centrale (*Variables*), qui regroupe les paramètres d'entrée dont l'influence est testée. En parallèle, un sous-système de contrôle (*Lois de contrôle*, en bleu) pilote les étapes successives de charge et de stand-by à partir des données de température et débit d'un champ solaire (*Donnees*). Ici, le fonctionnement de la pompe est déterminé par l'écart de température entre le champ solaire et la sortie du HUTES :

- ON si $T_{s, champ\ solaire} - T_{s, HUTES} > 5^{\circ}\text{C}$ et OFF au pas de temps précédent,
- ON si $T_{s, champ\ solaire} - T_{s, HUTES} > 1^{\circ}\text{C}$ et ON au pas de temps précédent,
- OFF sinon

En aval, un intégrateur, une calculatrice et une imprimante traitent et convertissent les résultats.

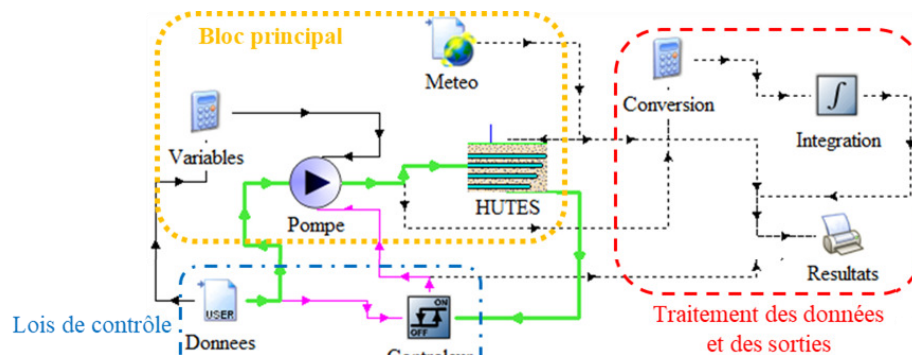


Figure 2 : Modélisation sous TRNSYS d'un HUTES (scénario 3)

Ainsi configuré, le modèle permet de calculer les températures du sol en surface et en profondeur et du fluide en sortie ainsi que l'énergie thermique transférée entre le fluide et le sol et celle stockée dans le sol en fonction de différents paramètres d'entrée :

- Géométriques : nombre de tubes, espacement entre les tubes, profondeur, diamètre,
- Propriétés thermophysiques : sol, fluide caloporteur et isolant,
- Climatiques : température de surface, rayonnement solaire,
- Opératoires : température et débit du fluide caloporteur, durée des étapes de charge/décharge.

2.2. Scénarios de simulation

Trois scénarios sont définis dans le Tableau 2 pour évaluer la robustesse du modèle et explorer différentes conditions de fonctionnement. Cette architecture permet une intégration avec Python pour automatiser les études de sensibilité et tester divers scénarios.

Scénario	Description	Données utilisées	Objectifs
1	Charge (8-17h) sur 3 mois avec conditions fixes en température et débit (400 kg.h ⁻¹)	Paramètres fixés et charge uniquement à long terme	Cas de référence pour valider le comportement thermique en conditions contrôlées
2	Charge (8-17h) / décharge (17-8h) sur 6 mois avec conditions fixes en température et débit (400 kg.h ⁻¹)	Paramètres fixés et charge / décharge tous les jours	
3	Charge sur 6 mois avec conditions expérimentales mesurées (profils dynamiques température et débit)	Données terrain (champ solaire actif) & Fichier météo horaire pour les conditions climatiques	Évaluation de l'impact des variations climatiques et opératoires

Tableau 2 : Caractéristiques des scénarios de simulation étudiés

2.3. Études de sensibilité

Une analyse de sensibilité est menée pour identifier les paramètres les plus influents sur les performances énergétiques du HUTES. Ces paramètres incluent :

- Diamètre interne des tubes de l'échangeur de chaleur (D_{int}),
- Nombre de tubes sur un même niveau (N_{tube})
- Distance entre les centres des tubes sur un même niveau (d_{tube}),
- Épaisseur de l'isolant (e_{isol}), et type d'isolant (nom_{isol}),
- Épaisseur du sol au-dessus du haut du HUTES (e_{sol}),
- Températures en entrée du HUTES durant la charge ($T_{e,ch}$) et la décharge ($T_{e,dech}$).

Les intervalles des paramètres sont détaillés dans le Tableau 3. Pour limiter les pertes de charge, les diamètres internes les plus grands des tubes multicouches existants sont retenus. Les isolants étudiés sont : bois (0,15 W.m⁻¹.K⁻¹), polystyrène expansé (0,029 W.m⁻¹.K⁻¹), polystyrène extrudé (0,033 W.m⁻¹.K⁻¹), polystyrène (0,047 W.m⁻¹.K⁻¹), polyuréthane (0,025 W.m⁻¹.K⁻¹), polyuréthane haute densité (0,022 W.m⁻¹.K⁻¹), paille (0,048 W.m⁻¹.K⁻¹), caoutchouc/coton/plastique (0,034 W.m⁻¹.K⁻¹) et Normalen® (0,04 W.m⁻¹.K⁻¹) [4].

Scénarios	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2, 3	1, 2	1, 2
Variable	D_{int} (m)	N_{tube}	d_{tube} (m)	e_{isol} (m)	nom_{isol}	e_{sol} (m)	$T_{e,ch}$ (°C)	$T_{e,dech}$ (°C)
Intervalle	0,02 et 0,026	1 à 5	0,15 à 1,5	0,01 à 0,35	9 isolants	0,1 à 0,4	30 à 100	5 à 25

Tableau 3 : Intervalles considérés des paramètres pour l'étude de sensibilité

Deux méthodes distinctes et complémentaires, issues de la librairie SALib de Python, ont été employées pour réaliser cette étude paramétrique :

- **Méthode de Morris** : Criblage rapide, peu coûteux en calculs, pour identifier les paramètres influents (de manière linéaire ou non-linéaire) et éliminer ceux ayant un impact négligeable sur les performances du HUTES.
- **Méthode de Sobol** : Analyse quantitative des variances pour évaluer les effets non linéaires et les interactions entre paramètres.

Ces analyses ont été automatisées via des scripts Python, générant environ 1000 simulations par scénario (15 cas de figure * 1000 simulations), avec une exploration aléatoire de l'espace des paramètres. Le critère d'évaluation repose sur l'énergie valorisée E_{val} par le système sur la durée totale du scénario (3 ou 6 mois), définie par :

$$E_{val} = E_{dech} - E_{pompe} \cdot \eta_{pompe} \quad (1)$$

Avec η_{pompe} le rendement de la pompe (90 %), E_{dech} l'énergie (kWh_{th}) restituée par le HUTES et E_{pompe} l'énergie électrique (kWh_e) consommée par la pompe pour la circulation du fluide sur toute la durée du scénario (charge uniquement, ou charge et décharge).

3. Résultats

3.1. Simulation journalière pour le scénario 2 : charge / décharge

Les résultats présentés dans cette section sont valables dans le cas du scénario 2 et pour les dimensions actuelles du HUTES installé en Mayenne (cf. Figure 1). La géométrie du stockage consiste en 1 tube linéaire de 0,026 m de diamètre, de la paille de 0,32 m en tant qu'isolant et 0,4 m de sol au-dessus du HUTES. Les températures de charge et décharge valent respectivement 70 et 15°C.

Les profils de température quotidiens de la coupe horizontale médiane du stockage sont présentés sur les Figure 3a (charge) et Figure 3b (décharge). Durant la charge, la température du sable proche du tube en entrée atteint 20°C. Après 6h, la chaleur se propage de plus en plus sur la longueur, avec une légère élévation de la température du sable proche de la sortie du stockage (20°C). A la fin d'une journée de charge, après 9h, la température atteint 32°C au voisinage du tube en entrée et 20°C en sortie. Le sable en contact de l'isolant s'échauffe peu en une seule journée de charge (9h) car le volume est trop important autour du tube. En décharge, la chaleur proche des tubes est rapidement extraite : après 1h, la température proche de l'entrée du fluide caloporteur atteint 28°C, puis 23°C après 6h et finalement 21°C après 9h. la température du sable proche de la sortie du fluide caloporteur reste quasiment constante (19°C) puisque ce dernier récupère la chaleur accumulée au voisinage du tube sur toute sa longueur.

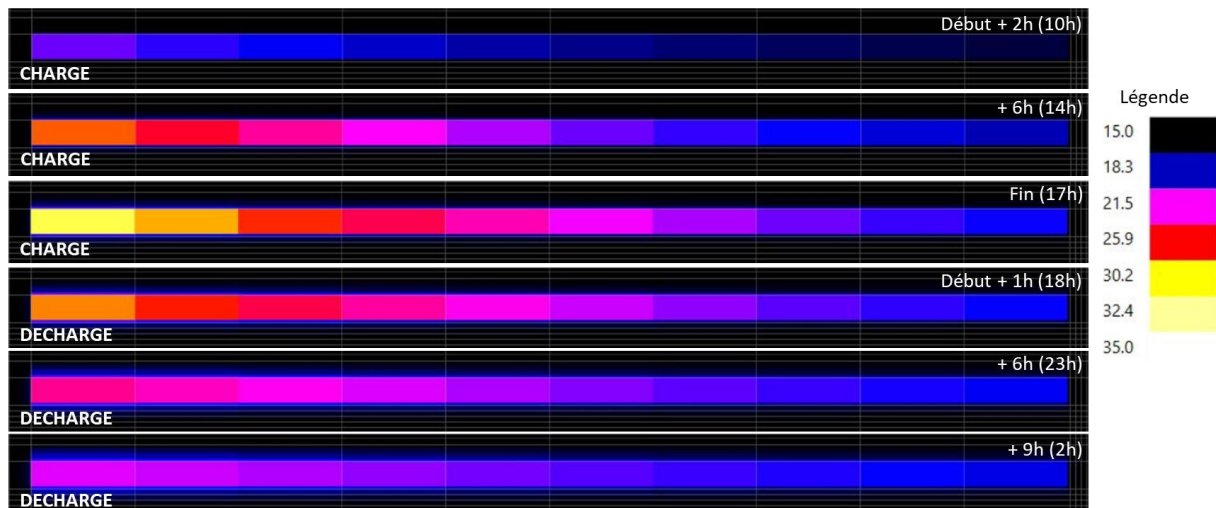


Figure 3 : Évolution de la température dans le stockage durant (a) la charge (8h – 17h) et (b) la décharge (17h – 8h) journalières

3.2. Analyse de sensibilité

L'évolution de l'énergie restituée par le système est représentée en fonction des paramètres de l'étude de sensibilité sur la Figure 4 (excepté D_{int}), pour la configuration avec 5 tubes. Les scénarios 1 à 3 sont respectivement représentés par les couleurs bleu, orange et vert. Pour le scénario 1, l'énergie évolue peu car seule la charge est étudiée. Cette même constatation est faite pour le scénario 3 où la température en entrée de stockage est fixée par le champ solaire. Quant au scénario 2, aucune tendance semble apparaître à première vue, excepté que l'énergie restituée augmente avec la température en entrée durant la charge puisque l'énergie restituée en fonction des paramètres de l'étude de sensibilité est très distribuée quels que soient les valeurs.

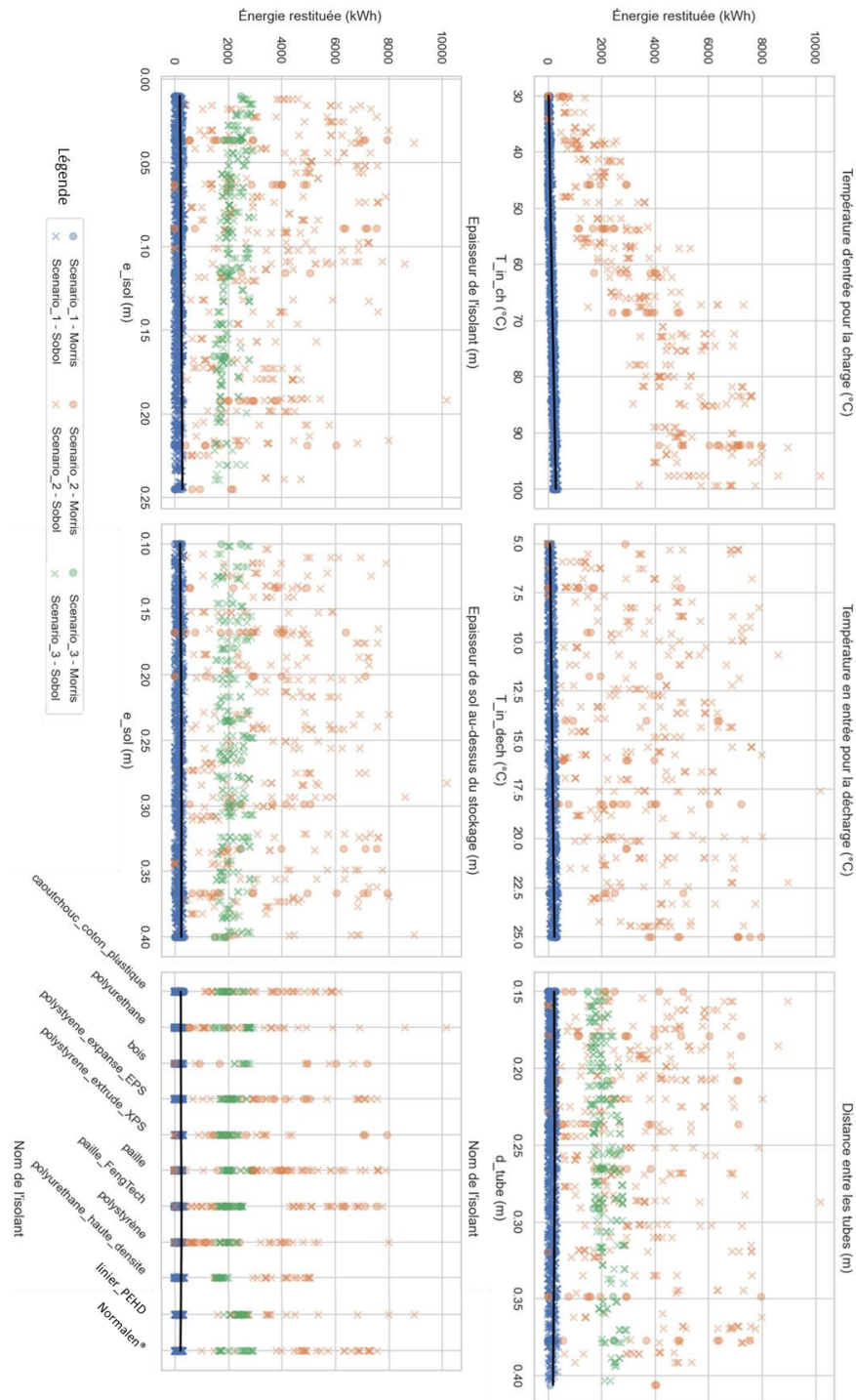


Figure 4 : Distribution du critère de sensibilité en fonction des paramètres d'entrée (cas à 5 tubes)

Quels que soient les scénarios étudiés, le diamètre interne des tubes (0,02 m ou 0,026 m) a peu d'influence sur les performances du HUTES. Selon la méthode de Morris, ce paramètre a été écarté de l'étude de sensibilité. Le diamètre le plus grand (0,026 m) est retenu pour minimiser les pertes de charge. L'influence de la distance entre les tubes est également limitée, bien que des valeurs optimales aient été identifiées en fonction du nombre de tubes (généralement au milieu de l'intervalle de recherche considéré). Les distances optimales, déterminées pour respecter les dimensions globales du HUTES (cf. Figure 1), sont respectivement de 0,7-0,8 m, 0,42 m, 0,3 m et 0,22 m pour 2, 3, 4 et 5 tubes en parallèle.

La distribution des paramètres sur les intervalles considérés (cf. Tableau 3) pour les méthodes Morris et Sobol, prouve que l'échantillonnage est uniforme pour les deux méthodes, bien que la méthode Morris génère moins de points, ce qui permet d'éliminer rapidement les paramètres peu influents. Les densités de probabilité montrent que la méthode Sobol couvre un large éventail de valeurs, confirmant une exploration complète de l'espace des paramètres. Ces résultats sont cohérents pour toutes les analyses de sensibilité réalisées.

3.2.1. Scénario 1 : Charge sur 3 mois avec conditions fixes

L'analyse de sensibilité (Morris et Sobol) a permis d'identifier 3 paramètres particulièrement influents sur les performances du HUTES : la nature de l'isolant (nom_{isol}), son épaisseur (e_{isol}) et l'épaisseur du sol sus-jacent (e_{sol}). La Figure 5 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les indices de Morris (σ et μ^*) des différents scénarios (scénario 1 (a), 2 (b) et 3 (c)). Des valeurs élevées de μ^* traduisent une forte influence, tandis que des valeurs de σ importantes indiquent des interactions potentielles. Le ratio σ/μ^* (> 1 pour tous les paramètres sauf D_{int}) confirme des interactions significatives entre les paramètres, conformément aux observations de Garcia Sanchez *et al.* [5]. Les indices de Sobol (S1 et ST) confirment ces conclusions avec un écart marqué entre S1 et ST, soulignant l'importance des effets non-linéaires et des interactions.

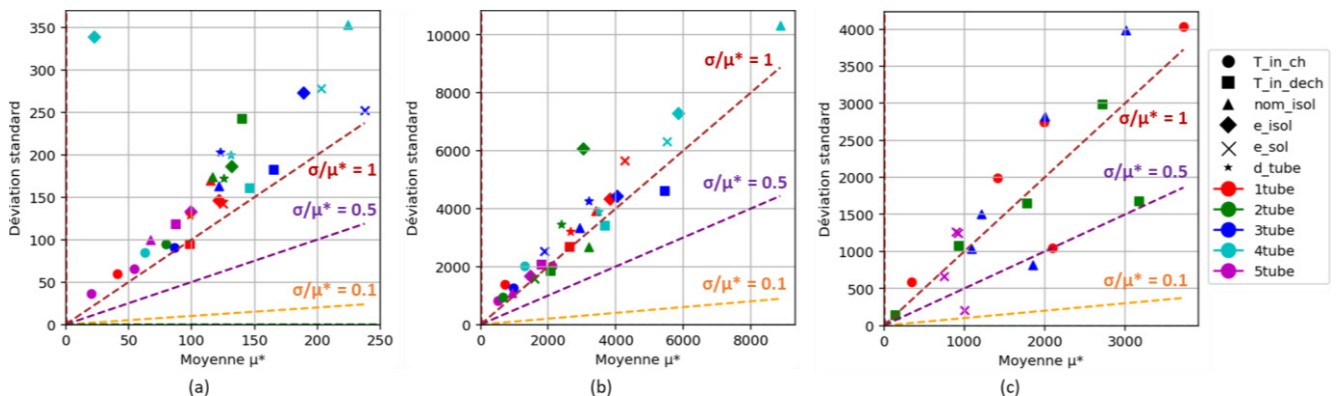


Figure 5 : Scénarios 1 (a), 2 (b) & 3 (c) – Influence des paramètres d'après les indices de Morris

3.2.2. Scénario 2 : Charge / Décharge journalières sur 6 mois avec conditions fixes

Dans ce scénario, les 3 mêmes paramètres (nom_{isol} , e_{isol} et e_{sol}) restent les plus influents. Cependant, la méthode Sobol révèle également un impact significatif des températures d'entrée durant les étapes de charge et décharge sur les performances du HUTES. Des interactions importantes entre les différents paramètres sont confirmées par des valeurs élevées des ratios σ/μ^* (> 1) (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 5b), et des grandes différences entre S1 et ST.

3.2.3. Scénario 3 : Charge sur 6 mois avec données terrain et météo

Dans ce scénario, les températures en entrée du HUTES durant les étapes de charge et de décharge sont fixées par les données terrains issues de capteurs thermiques. Les mêmes constations sont obtenues, avec moins d'influence de la part de d_{tube} que pour les paramètres e_{sol} , e_{isol} et nom_{isol} . Néanmoins, quelques petites différences sont observées par rapport aux scénarios 1 et 2, avec des interactions un peu moins fortes entre les paramètres, puisque le ratio σ/μ^* est plus petit (cf. Figure 5c).

4. Conclusion

Un système de stockage dans le sol (HUTES : *Horizontal Underground Thermal Energy Storage*) a été modélisé sur TRNSYS. Une étude paramétrique a été menée avec la bibliothèque SALib de Python, utilisant les méthodes Morris (pour identifier les paramètres peu influents) et Sobol (pour analyser les interactions et effets non-linéaires). Trois scénarios ont été simulés, combinant des étapes de charge et/ou décharge sur 3 à 6 mois et utilisant des données météo et opératoires fixes ou réelles.

L'analyse des simulations, visant à maximiser l'énergie valorisée par le système, a permis de dégager des recommandations optimales pour la conception et l'exploitation du HUTES :

- Diamètre interne : maximisé pour minimiser les pertes de charge,
- Espacement entre les tubes : ni trop grande ni trop petite pour limiter les interactions thermiques entre les tubes (0,8, 0,4, 0,3 et 0,22 m pour 2, 3, 4 et 5 tubes),
- Épaisseur du sol au-dessus du HUTES : 0,25 à 0,3 m pour équilibrer les transferts thermiques tout en limitant les pertes vers la surface,
- Épaisseur de l'isolant : 0,18 m pour un seul tube ; 0,05 à 0,15 m pour les configurations multitubes permettant de réduire les déperditions thermiques,
- Isolants recommandés : paille, polystyrène extrudé et polyuréthane haute densité,
- Températures optimales : 90°C pour la charge ; 17-22°C pour la décharge.

Ces résultats offrent une base solide pour le dimensionnement et l'optimisation des HUTES, en conciliant performance énergétique, viabilité économique et durabilité environnementale. Une validation expérimentale sur le banc d'essai à échelle pilote permettrait de confirmer ces conclusions. Enfin, une optimisation multi-objectif sera menée.

Références

- [1] M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu, and A. Kumar, 'Assessment of energy storage technologies: A review', *Energy Convers. Manag.*, vol. 223, p. 113295, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.113295.
- [2] S. Kalogirou, 'Solar Energy Engineering: Processes and Systems: Second Edition', *Sol. Energy Eng. Process. Syst. Second Ed.*, Jan. 2009.
- [3] Z. Li, X. Ma, Y. Zhao, and H. Zheng, 'Study on the Performance of a Curved Fresnel Solar Concentrated System With Seasonal Underground Heat Storage for the Greenhouse Application', *J. Sol. Energy Eng.*, vol. 141, no. 011004, Aug. 2018, doi: 10.1115/1.4040839.
- [4] D. Le Roux, H. Noël, A. Fuentes, and T. Colinart, 'Review on horizontal underground thermal energy storage (HUTES)', *J. Energy Storage*, vol. 147, p. 119927, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.est.2025.119927.
- [5] D. Garcia Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy, and B. Bourges, 'Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods', *Energy Build.*, vol. 68, pp. 741–750, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.048.