
Mandant :

Service des Ponts et Chaussées
Département du développement
territorial et de l'environnement
Monsieur Nicolas Merlotti
Rue J.-L. Pourtalès 13
2000 Neuchâtel

Auteur du rapport :

Masai Conseils SA
Rue Frédéric Soguel 4
2053 Cernier
SSG/EC/swe M-2169

Date :

Cernier, le 16 novembre 2023

POSTULAT QUANT À LA RÉCUPÉRATION DE CHALEUR DANS LES TUNNELS DU CANTON DE NEUCHÂTEL

Et si nous valorisons la chaleur des tunnels du canton ?

NOTE TECHNIQUE À LA SUITE DU POSTULAT 22.172

Distribution :

- Service des Ponts et Chaussées, Neuchâtel
- Masai Conseils SA, Cernier

Quantité :

- 1 exemplaire papier + pdf
- 1 pdf

I. CONFIDENTIALITE

La présente étude est réservée à l'usage du mandataire et des personnes ou institutions concernées par le projet.

Les choix et propositions techniques originaux contenus dans le présent dossier ne seront pas communiqués à des entreprises concurrentes et restent la propriété intellectuelle de ses auteurs.

II. REMERCIEMENTS

Masai Conseils SA remercie son mandant, le Service des ponts et chaussées et en particulier l'ingénieur cantonal Monsieur Nicolas Merlotti pour sa confiance.

Comme le démontre la présente note technique, la réponse au postulat 22.172 n'était pas triviale. Il a été nécessaire d'effectuer un important travail de recherche et de croisement des données ainsi que d'établissement d'hypothèses crédibles afin de permettre des conclusions quantifiées et réutilisables pour aller plus loin dans la démarche.

Dans ce travail inédit, le soutien des collaborateurs du Service des ponts et chaussées a été précieux notamment celui de Monsieur Pascal Hirt pour les informations techniques relatives au tunnel des Arêtes.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Objet.....	1
1.1.	Contexte et généralités	1
1.2.	Question posée par le postulat.....	2
1.3.	Projet TransRUN.....	2
2.	Grandeurs pertinentes pour l'évaluation du potentiel thermique des tunnels	3
2.1.	Conditions climatiques	3
2.2.	Conditions géologiques et hydrogéologiques	3
2.3.	Demande thermique.....	4
3.	Activation thermique des tunnels projetés	6
3.1.	Principe.....	6
3.2.	Hypothèses de calcul	6
3.3.	Calculs	6
3.4.	Discussion	7
3.5.	Illustration des méthodes de valorisation thermique lors de la construction d'un tunnel.....	8
4.	Activation thermique des tunnels existants.....	10
4.1.	Principe.....	10
4.2.	Hypothèses de calcul	10
4.3.	Calculs	11
4.4.	Discussion	12
5.	Conclusion et remarques finales	12
5.1.	Protection des eaux souterraines.....	12
5.2.	Bilan énergétique, économique et environnemental.....	12
	RÉFÉRENCES	14
	TABLEAUX.....	16
	Tableau 1. Références techniques.....	16
	Tableau 2. Moyenne annuelle sur la période 2008 – 2021 des différentes régions climatiques du canton de Neuchâtel, calculées sur la base des valeurs mesurées et mises à disposition par le SENE (NE).	18
	Tableau 3. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel	19
	Tableau 4. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue des énergies fossiles	20

Tableau 5. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue de du bois-énergie...	21
Tableau 6. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain.....	22
Tableau 7. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte.	24
Tableau 8. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue des énergies fossiles	25
Tableau 9. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue de du bois-énergie...	26
Tableau 10. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 avec la production de chaleur issue des énergies fossiles	27
Tableau 11. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des nouveaux tunnels – prévus dans le plan NeMo2030 – avec la production de chaleur issue de du bois-énergie	28
Tableau 12. Tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel	29
Tableau 13. Tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain (i.e. hors tunnels construits en tranchée ouverte)	30
Tableau 14. Tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte	34
ANNEXES	36
Annexe 1. Plan Neuchâtel Mobilité 2030	36
Annexe 2. Neuchat’unnel	38

1. Objet

1.1. Contexte et généralités

Le postulat 22.172¹ – « Et si nous valorisons la chaleur des tunnels du canton ? » – pose la question de la valorisation thermique des tunnels neuchâtelois, projetés et existants. Afin d'y répondre, Masai Conseils SA a été sollicité pour évaluer les possibilités – et identifier les opportunités – d'activation thermique des tunnels sur le territoire du canton.

Les tunnels énergétiques utilisent les géostructures –structures en contact avec le terrain – comme échangeurs thermiques. Le principe d'exploitation est similaire au principe d'exploitation usuel des autres géostructures énergétiques (SIA, 2005) ou des sondes géothermiques (SIA, 2021). La chaleur – échangée en système fermé par un fluide caloporteur – est exploitée indirectement avec une pompe à chaleur pour la production de chaud, ou directement avec un échangeur de chaleur pour la production de froid, afin de répondre aux besoins thermiques du tunnel, des infrastructures associées ou – via un réseau de distribution thermique – des bâtiments et de l'industrie (cf. figure 1).

L'énergie thermique peut aussi être stockée dans le terrain autour du tunnel afin de rattraper un décalage – journalier ou saisonnier – entre les besoins thermiques et la disponibilité de différentes ressources, telles que les rejets de chaleur fatale ou le solaire thermique par exemple.

Les spécificités des tunnels énergétiques sont le fait de certaines caractéristiques particulières – une grande longueur et une grande surface de contact par unité de longueur – qui permettent de réaliser des échanges de chaleur sur une grande surface avec le terrain extérieur et l'air intérieur. Les géostructures des tunnels énergétiques sont donc utilisées comme échangeurs géothermiques et/ou comme échangeurs aérothermiques.

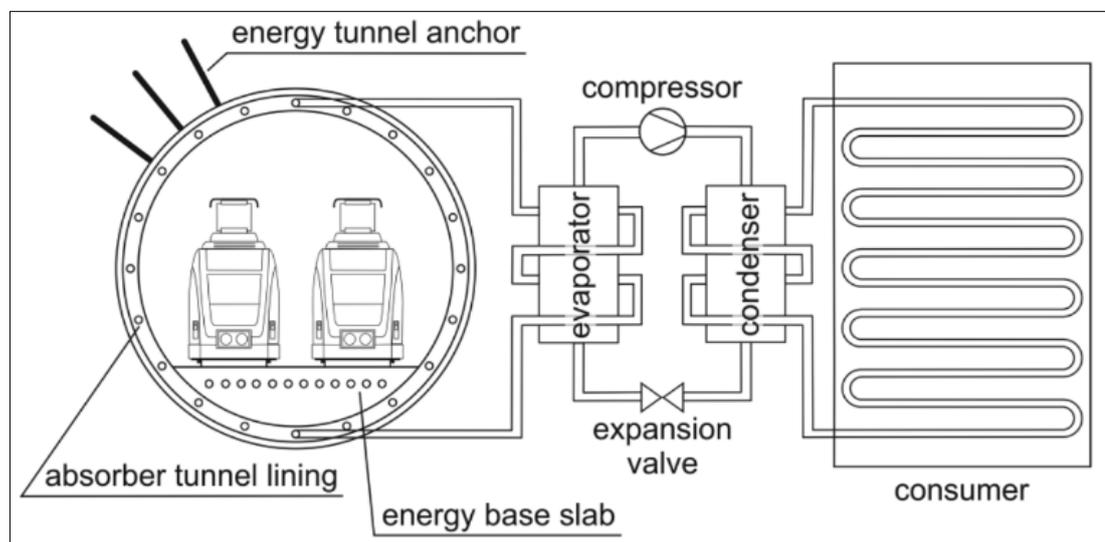


Figure 1 : Principe d'exploitation des tunnels énergétiques, avec différents exemples de géostructures – ancrages, radier et revêtement/soutènement – utilisées comme échangeurs thermiques (Stemmler, 2022).

¹<https://www.ne.ch/autorites/GC/objets/Documents/Postulats/2022/22172.pdf>

1.2. Question posée par le postulat

La question posée par le postulat est pertinente, en effet, les tunnels énergétiques sont, a priori, une solution gagnant-gagnant pour l'économie et l'environnement, qui peut jouer un rôle significatif dans le cadre des politiques énergétiques locales pour atteindre les objectifs – transition énergétique et indépendance énergétique – définis dans le canton de Neuchâtel par la LCEn¹.

En fonction des contingences, il doit être possible, avec un (sur-)coût d'investissement relativement limité, d'améliorer l'efficacité énergétique du tunnel avec l'optimisation de la ventilation, de protéger des infrastructures associées – comme les routes et rampes d'accès – contre le gel (Islam, 2006), et d'échanger de la chaleur avec un réseau de distribution thermique (Brandl, 2006 ; Adam, 2009), en générant un revenu supplémentaire et une compensation écologique durant l'exploitation du tunnel énergétique.

Le potentiel de valorisation thermique des tunnels neuchâtelois, projetés et existants, n'a pas été calculé dans les travaux précédents. L'exemple du projet TransRUN illustre parfaitement qu'une estimation qualitative est insuffisante et qu'une estimation quantitative est nécessaire. La question du postulat 22.172 sur la valorisation thermique des tunnels neuchâtelois est donc, compte tenu des nouveaux tunnels prévus dans le plan NeMo2030², tout à fait d'actualité.

Un calcul préliminaire est joint en annexe A. Le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels prévus dans le plan NeMo2030 y est estimé dans son ensemble, et mis en perspective dans le contexte énergétique du canton de Neuchâtel. Ce calcul préliminaire – en ordre de grandeur – permet de préciser les enjeux et les limites de la valorisation thermique des tunnels neuchâtelois.

Une liste des tunnels, projetés ou existants, dans le canton de Neuchâtel est jointe en annexe 1. Il est à noter que dans la suite de ce travail, les tunnels de moins de 300 ml n'ont pas été inclus dans le périmètre d'étude.

1.3. Projet TransRUN

Une étude sur les possibilités d'activation thermique des tunnels dans le canton de Neuchâtel a été réalisée par les groupes de travail PGN (CREGE, 2008) et PDGN (CREGE, 2010). Ces travaux recommandaient d'étudier de façon systématique le potentiel thermique des tunnels en projet, et de réaliser des mesures thermiques lors des investigations en forage. Ces travaux ont cependant aussi estimé en première approche que seul le tunnel du projet TransRUN pouvait disposer d'un potentiel thermique exploitable à l'échelle des infrastructures associées au tunnel.

Une étude de cas a été réalisée sur le tunnel du projet TransRUN – après son abandon – pour en évaluer le potentiel thermique dans différentes conditions d'exploitation par un groupe de travail académique (Dornberger, 2022). Le calcul dans des conditions d'exploitation conservatives – avec un débit d'air minimal – indique que l'extraction de chaleur sur l'intégralité du tunnel aurait pu répondre à la demande thermique de 2'200 ménages environ. En prenant en compte un coefficient de performance moyen de 4, l'extraction de chaleur sur 1/3 à 2/3 du tracé aurait pu répondre à la demande thermique de 950 à 1'950 ménages. Le projet TransRUN disposait donc bien d'un potentiel thermique exploitable à l'échelle d'un réseau de distribution thermique.

¹https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/energie/Documents/LCEn_2021.pdf

²<http://www.nemobilite2030.ch/>

2. Grandeurs pertinentes pour l'évaluation du potentiel thermique des tunnels

Le potentiel de valorisation thermique des tunnels, existants ou projetés, doit être d'une part quantifié – *Combien ?* – par les conditions climatiques ainsi que les conditions géologiques et hydrogéologiques, qui sont des paramètres critiques, et d'autre part qualifié – *Comment ?* – par la demande thermique, qui est un élément nécessaire puisque l'objectif est bien de répondre à un besoin.

2.1. Conditions climatiques

Le canton Neuchâtel peut être découpé en plusieurs régions climatiques (cf. figure 2), en fonction des moyennes annuelles, sur la période 2008 – 2021 de la température de l'air, des degrés-jours cumulés et de la température superficielle du sol qui ont été calculées (cf. tableau 2) sur la base de valeurs mesurées mises à disposition par le SENE (NE)¹.

Il est à noter que les régions climatiques ne correspondent pas aux régions statistiques du canton de Neuchâtel.

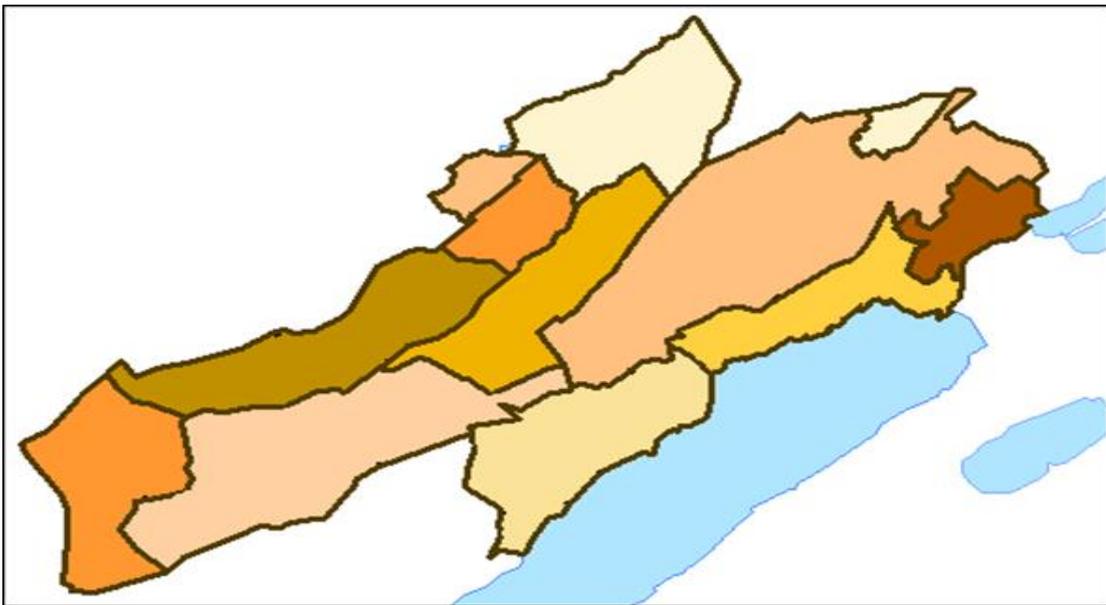


Figure 2 : Découpage des régions climatiques du canton de Neuchâtel selon SENE (NE).

2.2. Conditions géologiques et hydrogéologiques

Les conditions hydrogéologiques sont spécifiques à chaque tunnel et varient le long de leur tracé. Les informations relatives aux différents tunnels ne sont pas disponibles, à l'exception du tunnel des Arêtes.

Nous avons donc évalué les conditions hydrogéologiques, tunnel par tunnel, sur la base des cartes géologiques et hydrogéologiques de référence, et des valeurs de conductivité thermique recommandées dans la norme SIA 384/6 (SIA, 2021) ou mesurées dans le projet IGS-NE (CREGE, 2013).

¹<https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/energie/Pages/Degres-jours.aspx>

2.3. Demande thermique

La demande thermique est, dans sa grande majorité, une demande de chaleur. La demande de froid reste pour l'instant encore anecdotique dans le canton de Neuchâtel et est principalement localisée sur le littoral neuchâtelois et dans les montagnes neuchâteloises (cf. figure 3).

Les réseaux de distribution thermique sont bien répartis dans le canton de Neuchâtel. La production de chaleur se fait majoritairement au moyen du bois-énergie. Il est toutefois à noter que trois installations utilisent des rejets de chaleur fatale (CAD Vadec à la Chaux-de-Fonds, CAD Entre-deux-Lacs à Cressier et CADBAR à Milvignes), tandis que deux installations fonctionnent au gaz (CAD Recorne à la Chaux-de-Fonds et CAD Terreaux à Neuchâtel).

Dans ce contexte, les tunnels énergétiques peuvent faire fonctionner – de manière indépendante – un réseau de distribution thermique, mais peuvent aussi :

- produire de la chaleur en complément du bois-énergie, lors des périodes de maintenance, en été, ou de pointe de consommation, en hiver ;
- stocker de la chaleur fatale en été, avec une efficacité pouvant atteindre 50% à 70% (Rotta Loria, 2021), qui pourra ensuite être redistribuée en hiver.

Il est à noter que dans ces deux cas de figures, les tunnels énergétiques permettent de substituer le recours au gaz pour la production de chaleur.

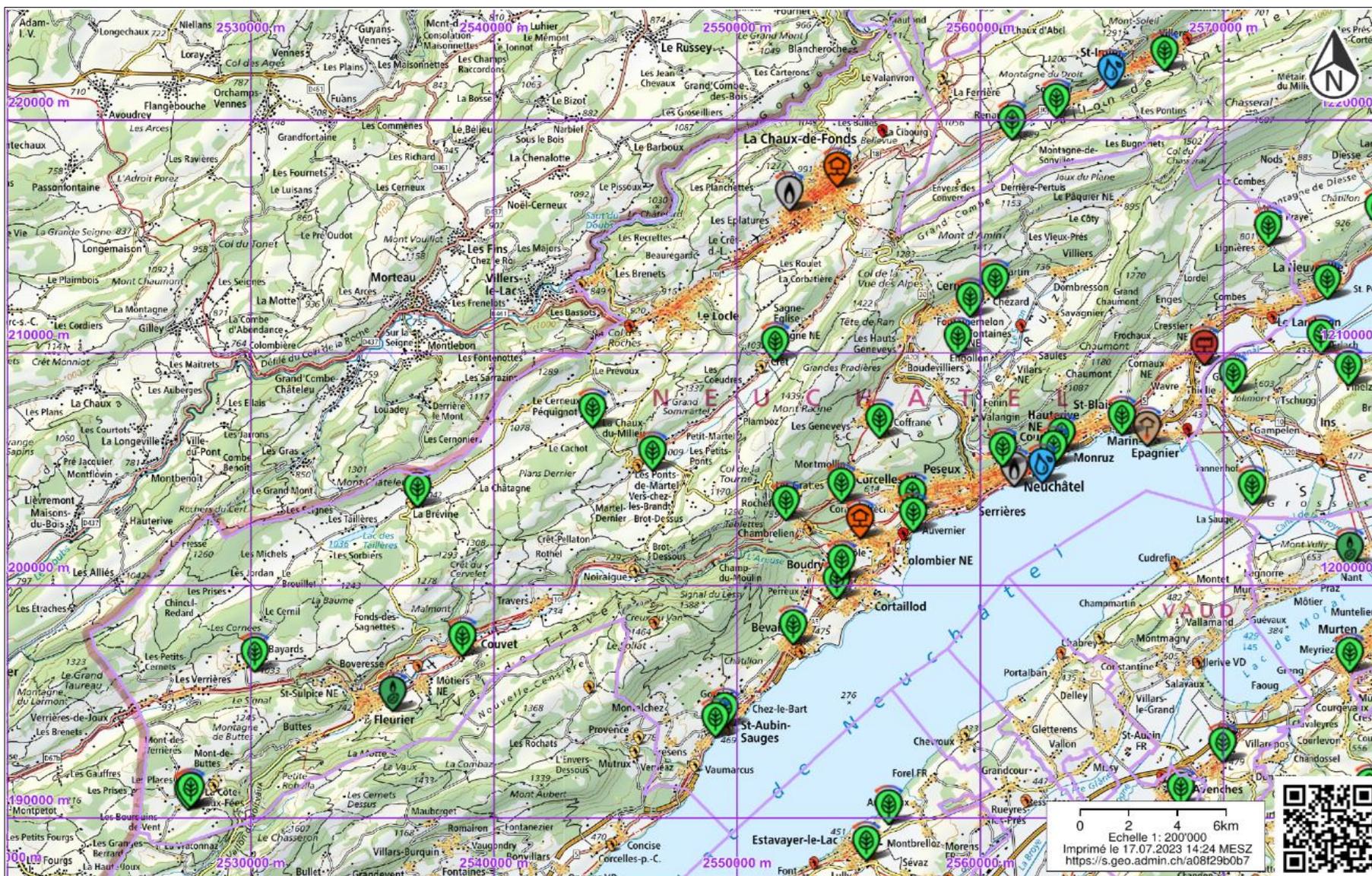


Figure 3 : Illustration des réseaux de distributions thermique dans le canton de Neuchâtel.

3. Activation thermique des tunnels projetés

3.1. Principe

L'activation thermique des tunnels projetés est possible quel que soit le mode de construction en souterrain, ou en tranchées couvertes. Elle est réalisée au moyen de tubes échangeurs de chaleur mis en place dans les segments pour les tunnels construits en souterrain avec des méthodes mécanisées (cf. figure. 4), dans le revêtement/soutènement pour les tunnels construits en souterrain avec des méthodes conventionnelles (cf. figures 5 et 6), ou dans les parois et les radiers pour les tunnels construits en tranchée couverte. L'activation thermique des ancrages et/ou des boulons mis en place est également possible (OFROU, 2013 ; Mimouni, 2014).

3.2. Hypothèses de calcul

Compte tenu de la demande thermique dans le canton de Neuchâtel, seul le potentiel de valorisation thermique avec production de chaleur a été estimé.

La construction des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel est planifiée en souterrain. Aussi, le potentiel de valorisation thermique peut être estimé au moyen d'abaques de prédimensionnement thermique (cf. figure 7), établies sur la base des résultats de simulations numériques en régime quasi-continu (Cousin, 2019 ; Peltier, 2019 ; Dornberger, 2022).

Pour la suite de ce travail, La température de l'air à l'intérieur du tunnel a été considérée égale à la température du terrain; nous avons formulé l'hypothèse que le calcul du potentiel de valorisation thermique se base également sur l'utilisation d'une installation de production de chaleur équivalente à une pompe à chaleur avec un COPa – coefficient de performance annuel – de 4 et une durée de fonctionnement de 2500 h/an. Le taux d'activation thermique – i.e un ratio de la longueur avec activation thermique par rapport à la longueur totale, a été considéré de 1/3 à 2/3.

Les hypothèses suivantes ont été arrêtées en fonction du type d'ouvrage :

- transport ferroviaire, diamètre équivalent de 11 à 14 m et vitesse de circulation de l'air de 0.5 à 3 m/s ,
- transport routier, diamètre équivalent de 11 à 14 m – 12.8 m pour le tunnel du Locle¹ – et vitesse de circulation de l'air de 1.5 à 3 m/s ,
- galeries de sécurité, diamètre équivalent de 4 à 5 m – 4.4 m pour la galerie du tunnel du Locle² – et vitesse de circulation de l'air de 0.5 m/s.

3.3. Calculs

Les résultats du calcul du potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel sont présentés au tableau 3. Il est à noter que la longueur totale – cumulée en tenant compte du nombre de tubes et des galeries – pouvant faire l'objet d'une activation thermique est de 40 km environ.

Ainsi estimé, le total du potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel est de 14 à 48 MW, soit une production annuelle de 35 à 120 GWh, qui équivaut aux besoins de chaleur de 2'920 à 10'000 ménages (pour un besoin moyen de 12 MWh par ménage environ).

¹<https://tdb.swisstunnels.ch/tunnel-details.php?V1VqbUF2cW1zeVpTVkRoMEZKYVF0dz09>

²<https://tdb.swisstunnels.ch/tunnel-details.php?Y1hjRWg5dWs4a2oyVU1LSWRuMmtQUT09>

Financièrement et en première approche, nous avons calculé le prix de la chaleur hors investissement à partir de la consommation électrique de l'installation de production de chaleur, avec un prix moyen (2022)¹ de 0.1800 CHF/kWh, pour l'électricité. Ainsi, pour l'ensemble des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel, le prix du vecteur énergétique représente 1.57 Mio à 5.40 Mio CHF/an.

Afin d'évaluer les gaz à effet de serre², il a été considéré une production de 0.125 kg CO₂-éq/kWh, correspondant au mix électrique suisse de consommation soit 1'03 à 3'752 t CO₂-éq/an.

La comparaison du bilan économique quant au vecteur énergétique et environnemental quant au rejet de CO₂ – de l'activation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel avec :

- les énergies fossiles est sans appel (cf. tableau 4). Par rapport au gaz, l'économie réalisée serait de 5.32 Mio à 18.25 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 7'375 à 19'870 tCO₂-éq/an. Par rapport au mazout EL, l'économie réalisée serait de 5.10 Mio à 17.49 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 11'499 à 39'470 tCO₂-éq/an.
- le bois-énergie est équilibrée (cf. tableau 5). Par rapport aux plaquettes, l'économie réalisée serait de 0.37 Mio à 1.27 Mio CHF/an, mais les émissions supplémentaires de gaz à effet de serre seraient de 677 à 2'324 tCO₂-éq/an. Par rapport aux granulats, l'économie réalisée serait de 4.36 Mio à 14.95 Mio CHF/an, et les émissions de gaz à effet de serre seraient équivalentes.

3.4. Discussion

L'activation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel pourrait être bénéfique sur différents sites du canton : à la Chaux-de-Fonds, mais aussi au Val-de-Ruz et à Neuchâtel avec les tunnels de la ligne directe. Les possibilités de valorisation thermique sont importantes. Dans cette éventualité, certains tunnels particuliers devraient faire l'objet d'une étude spécifique :

- les tunnels de la ligne directe, qui correspondent à plus de 60 % du total du potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés.
- le tunnel des Arêtes qui représente une opportunité – quasi-idéale – pour envisager un stockage de chaleur fatale sur le réseau de distribution thermique de la Chaux-de-Fonds. Les conditions hydrogéologiques sont favorables et le portail Nord est situé à 200 m de la future usine *Vadec_évolution*³.
- les galeries de sécurité, qui ont un potentiel de valorisation thermique moindre, mais sont plus favorables au stockage de chaleur fatale. L'entretien et la maintenance devraient – aussi – être plus simple que dans un tunnel en exploitation.
- une interconnexion des réseaux de distribution thermique de la Chaux-de-Fonds et du Val-de-Ruz qui serait envisageable par les galeries de sécurité du Mont Sagne et de la Vue-des-Alpes et permettrait d'échanger – et de stocker – de la chaleur fatale depuis le réseau de distribution thermique de la Chaux-de-Fonds

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.
<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>.

³<https://evolution.vadec.ch/>

3.5. Illustration des méthodes de valorisation thermique lors de la construction d'un tunnel



Figure 4 : Segment énergétique (Barla, 2019)

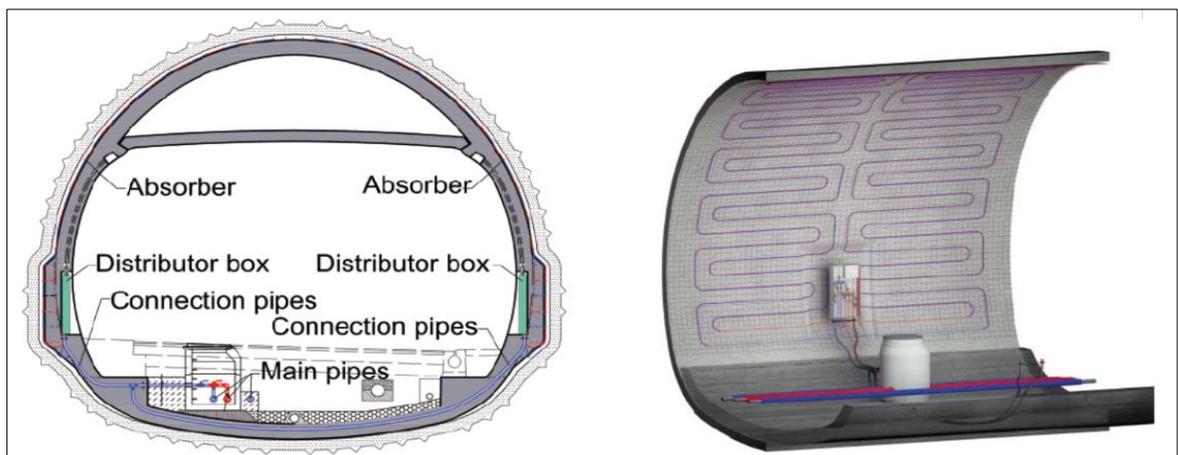


Figure 5 : Installation de tubes échangeurs de chaleur, assemblés sur la cage d'armature du revêtement définitif, dans le tunnel B10 Rosenstein, en Allemagne (Csesznák, 2016).

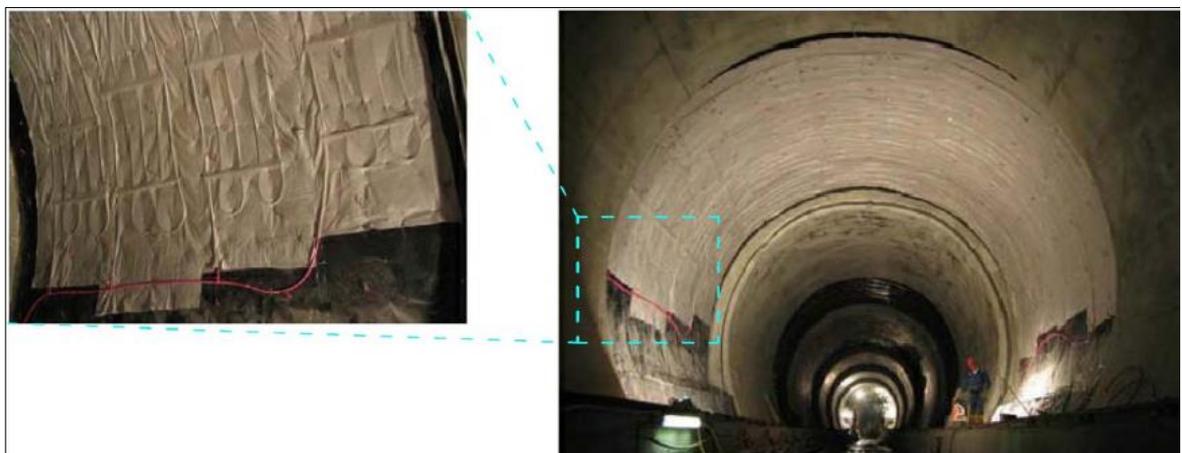


Figure 6 : Installation d'un géotextile énergétique dans le tunnel du Lainzer, en Autriche. (Tinti, 2017 ; modifié d'après Adam, 2009).

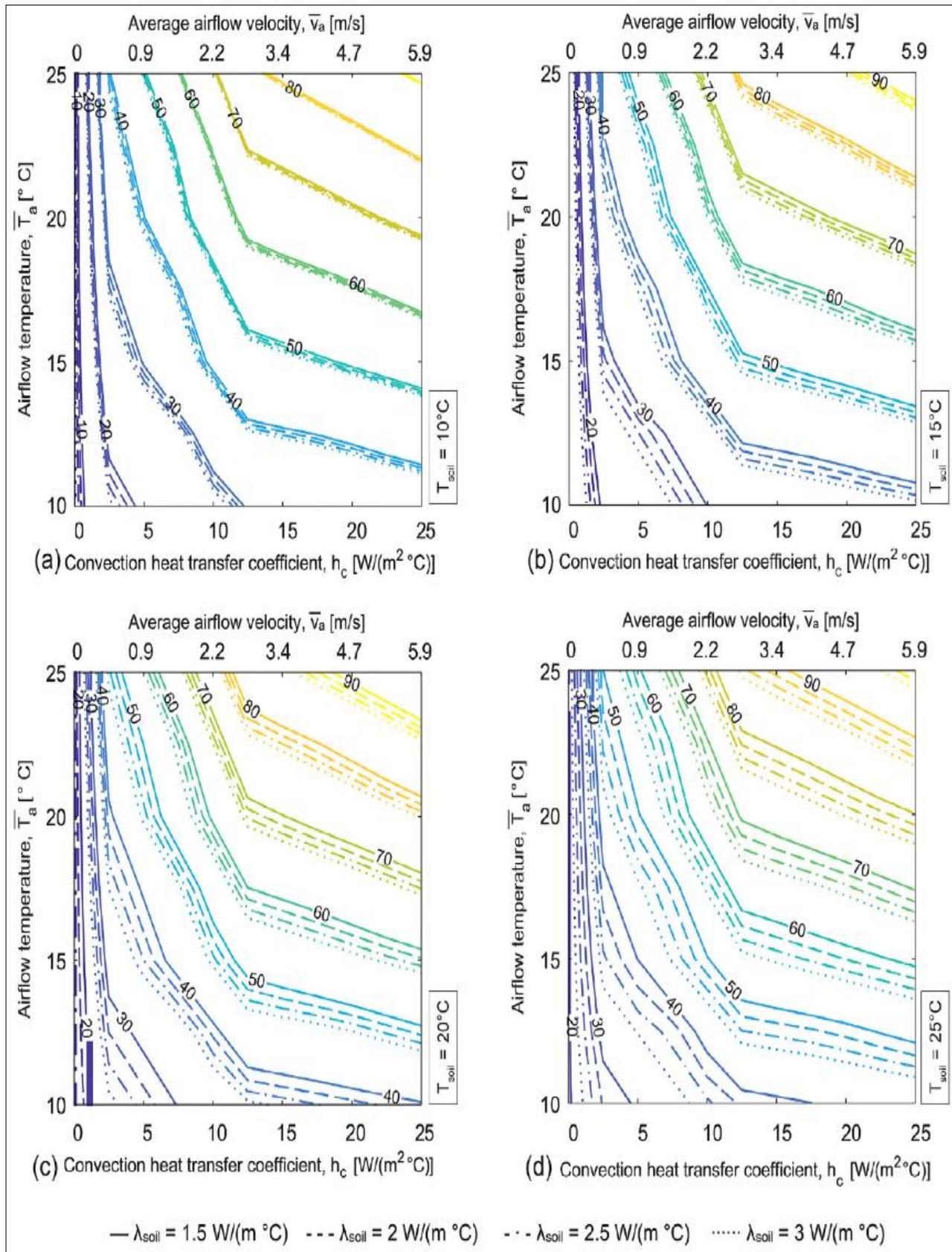


Figure 7 : Puissance thermique extractible (W/m²) – surface avec activation thermique – pour une température non perturbée du terrain de (a) 10°C, (b) 15°C, (c) 20°C et (d) 25°C (Dornberger, 2022)

4. Activation thermique des tunnels existants

4.1. Principe

L'activation thermique des tunnels existants peut être réalisée au moyen des panneaux thermiques développés – en Suisse – par Enerdrape¹. C'est une innovation récente, qui n'a pas encore fait l'objet d'une installation pilote dans un tunnel existant, mais a déjà été mis en place dans un parking souterrain (cf. figure 8).

Il est à noter que la mise en place d'un géotextile énergétique dans un tunnel abandonné – i.e. un tunnel existant – a fait l'objet d'une installation pilote (Lee, 2012 ; Lee, 2016). Les panneaux thermiques développés par Enerdrape se distinguent toutefois favorablement, du fait de la facilité d'installation, d'un moindre gabarit et de meilleures performances thermiques.



Figure 8 : Exemple d'installation de panneaux thermiques (Enerdrape, 2023).

4.2. Hypothèses de calcul

Compte tenu de la demande thermique dans le canton de Neuchâtel, seul le potentiel de valorisation thermique avec production de chaleur est estimé.

Les panneaux thermiques n'ayant pas encore fait l'objet d'une installation pilote dans un tunnel existant, l'estimation du potentiel de valorisation thermique se base sur les données techniques disponibles pour une installation pilote dans un parking souterrain. La puissance thermique extractible par les panneaux thermiques est supposée – de façon conservative – égale à $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ avec une différence de température mesurée entre la température d'entrée du fluide caloporteur de 2°C , et la température du terrain minorée de 1°C . Les panneaux thermiques comportant une couche d'isolation, l'influence de la température et de la vitesse de l'air à l'intérieur du tunnel sur les performances thermiques est négligée.

Le calcul du potentiel de valorisation thermique se base aussi sur les hypothèses d'une installation de production de chaleur équivalente à une pompe à chaleur avec un COPa – coefficient de performance annuel – de 4 et une durée de fonctionnement de 2500 h/an, et d'un tunnel avec un taux d'activation thermique – i.e un ratio de la longueur avec activation thermique par rapport à la longueur totale – de $2/3$.

Les hypothèses suivantes ont été arrêtées en fonction du type d'ouvrage :

- tunnels construits en souterrain : surface de panneaux thermiques de $6 \text{ m}^2/\text{ml}$ (pour chaque tube),

¹<https://enerdrape.com/>

- tunnels construits en tranchée couverte : surface de panneaux thermiques de 6 m²/ml si le tunnel est monotube, et de 6 m²/ml (pour chaque tube) si le tunnel est bitube (les panneaux thermiques ne sont pas mis en place sur les parois centrales séparant les deux tubes),
- tunnel du Fun'ambule : surface de panneaux thermiques de 3 m²/ml - galeries de sécurité et galeries de ventilation.

4.3. Calculs

Les résultats du calcul du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel sont présentés au tableau 6 , pour les tunnels construits en souterrain et au tableau 7 pour les tunnels construits en tranchée couverte, respectivement.

Ainsi estimé, le total du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, pour les tunnels construits en souterrain et pour les tunnels construits en tranchée couverte, est respectivement de 15.5 et 1.8 MW, soit une production annuelle de 38.7 et 4.6 GWh , qui équivaut aux besoins de chaleur de 3'230 et 380 ménages (pour un besoin moyen de 12 MWh par ménage environ).

Financièrement et en première approche, nous avons calculé le prix de la chaleur, hors investissement à partir de la consommation électrique de l'installation de production de chaleur, avec un prix moyen (2022)¹ de 0.1800 CHF/kWh, pour l'électricité. Ainsi, pour les tunnels existants construits en souterrain, le prix du vecteur énergétique est de 1.74 Mio CHF/an et pour les tranchées couvertes de 0.20 Mio CHF/an.

Afin d'évaluer les gaz à effet de serre², il a été considéré une production 0.125 kgCO₂-éq/kWh, correspondant au mix électrique suisse de consommation, soit 1'210 t CO₂eq/an pour les tunnels et 142 t CO₂ eq/an pour les tranchées couvertes.

La comparaison du bilan économique pour le vecteur énergétique et environnemental pour les rejets de CO₂– de l'activation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, pour les tunnels construits en souterrain et pour les tunnels construits en tranchée couverte, respectivement, avec :

- les énergies fossiles est sans appel (cf. tableau 8). Par rapport au gaz, l'économie réalisée serait de 4.14 Mio et 0.49 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 8'164 et 960 tCO₂-éq/an. Par rapport au mazout EL, l'économie réalisée serait de 3.90 Mio et 0.46 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 12'729 à 1'497 tCO₂-éq/an.
- le bois-énergie est équilibrée (cf. tableau 9), par rapport aux plaquettes, l'économie réalisée serait de 0.41 Mio et 0.05 Mio CHF/an, mais les émissions supplémentaires de gaz à effet de serre seraient de 750 et 88 tCO₂-éq/an. Par rapport aux granulats, l'économie réalisée serait de 3.08 Mio et 0.36 Mio CHF/an, et les émissions de gaz à effet de serre seraient équivalentes.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.
<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>

4.4. Discussion

Le littoral neuchâtelois – et en particulier le littoral Ouest ainsi que la Ville de Neuchâtel – est la région qui bénéficierait le plus de la valorisation thermique des tunnels existants. Les possibilités de valorisation thermique sont non-négligeables, mais doivent être confirmées par une installation pilote. Il est important de noter – pour définir des priorités – que le potentiel de valorisation thermique des tunnels existants, construits en souterrain, est nettement plus important que celui des tunnels existants, construits en tranchée couverte. Dans cette situation, certains tunnels particuliers pourraient faire l'objet d'une étude spécifique :

- le tunnel de la Clusette, avec sa nouvelle galerie de sécurité, pourrait potentiellement couvrir les besoins thermiques du village de Brot-Dessous et/ou d'une partie du village de Noiraigue. C'est l'opportunité de réaliser une installation pilote de panneaux thermiques qui, après confirmation du potentiel de valorisation thermique, pourra être valorisée dans un réseau de distribution.
- le tunnel du Fun'ambule, en plein centre de Neuchâtel, est l'opportunité de réaliser un essai pilote, et de le mettre en avant – communication et visibilité – auprès de la population. La production de chaleur pourra être valorisée sans difficulté dans un environnement bâti dense.

Une installation pilote de panneaux thermiques constitue un pas indispensable qui doit être réalisé avant d'envisager d'autres possibilités de valorisation thermique des tunnels existants.

Il est à noter que la valorisation thermique d'autres espaces souterrains – e.g. les parkings souterrains – pourrait également être réalisée avec l'installation de panneaux thermiques.

5. Conclusion et remarques finales

Il est à noter que la seule installation réalisée en Suisse, au jour d'aujourd'hui, est une installation pilote dans la galerie d'essai d'Hagerbach (OFROU, 2010 et 2016). Des projets d'activation thermique de nouveaux tunnels sont toutefois à l'étude en Suisse, à Bâle (Epting, 2020) et à Lausanne (OFT, 2022).

En Europe, plusieurs installations de production de chaleur – reliées à un consommateur final – sont déjà opérationnelles, comme en Autriche, à Jenbach (Frodl, 2010 ; Franzius, 2011) et à Vienne (Adam, 2009), au Royaume-Uni, à Londres (Nicholson, 2014), et en Allemagne, à Stuttgart (Csesznák, 2016). Cette dernière installation, en particulier, a été réalisée en zone de protection des eaux souterraines et fournit de la chaleur à la nouvelle maison des éléphants du jardin botanique et zoologique Wilhelma.

5.1. Protection des eaux souterraines

Les projets de tunnels énergétiques doivent bien entendu prendre en compte et respecter les directives de protection des eaux souterraines (OFEV, 2009). Il est intéressant de souligner qu'en prenant les dispositions appropriées, les tunnels énergétiques peuvent permettre d'exploiter le potentiel de valorisation thermique de la géothermie superficielle dans les zones de protection des eaux souterraines, où les forages géothermiques ne sont pas autorisés.

5.2. Bilan énergétique, économique et environnemental

Le bilan énergétique d'un tunnel est principalement déterminé en phase de planification, et ne peut plus vraiment être optimisé en phase d'exploitation (OFROU, 2016). Il n'y a pas, actuellement, d'exigences à rechercher des solutions optimisées du point de vue énergétique, qui devraient être davantage étudiées durant la phase de planification, comme les tunnels énergétiques.

Les estimations ici établies du point de vue du prix du vecteur de chaleur et du rejet de CO₂ engendrées par cette production de chaleur pour les tunnels neuchâtelois, comme tunnels énergétiques, permettent de conclure que les tunnels énergétiques sont:

- une solution intéressante et pertinente de remplacement des énergies fossiles pour la production de chaleur,
- une solution complémentaire au bois-énergie pour la production de chaleur neuchâteloise,
- que l'impact environnemental de rejet de CO₂ de ces solutions est étroitement liée au mix énergétique d'utilisation des PAC et que ce dernier doit et va s'améliorer grandement par la mise en place de nombreuses mesures de décarbonisation du mix énergétique Suisse, par exemple la pose de panneaux solaires photovoltaïques.

Du point de vue de l'investissement, le recul quant aux solutions à mettre en place et la spécificité de chaque projet ne permet pas d'apporter des ordres de grandeur. L'équipement de valorisation thermique planifié, d'un nouvel ouvrage, pourra représenter quelques % de l'investissement global.

En revanche, l'équipement d'un ouvrage existant représente un projet de valorisation thermique en soi.

Le potentiel de valorisation thermique des ouvrages souterrains est important et devrait faire l'objet d'études de faisabilité technico-économique détaillées. Compte tenu du potentiel économique et environnemental des tunnels énergétiques – et en perspective du coût global des travaux – les nouveaux tunnels, en particulier, devraient impérativement prendre en compte la possibilité d'une activation thermique dès la phase de planification.

Dans la mesure où les installations de tunnels énergétiques sont encore – pour l'instant – en transition entre l'académie et l'industrie, ces études pourraient faire appel à l'expertise académique par exemple du LMS (EPFL) comme proposé dans le postulat.

Masai Conseils SA



Séverine Scalia Giraud



Etienne Cassini

Cernier, le 16 novembre 2023

RÉFÉRENCES

Il est à noter que, dans un souci de lisibilité, les références techniques – i.e. rapports et standards – sont listées séparément des références académiques (cf. tableau 1).

- ADAM, Dietmar et MARKIEWICZ, R. Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels, and sewers. *Géotechnique*, 2009, vol. 59, no 3, p. 229-236.
- BARLA, M., DI DONNA, Alice, et INSANA, A. A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 87, p. 1-14.
- BRANDL, Heinz. Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 2006, vol. 56, no 2, p. 81-122.
- COUSIN, Benoît, LORIA, Alessandro F. Rotta, BOURGET, Andrew, *et al.* Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, vol. 91, p. 102997.
- CSESZNÁK, András, JÄRSCHKE, Roland, et WITTKE, Martin. B 10 Rosenstein Tunnel– Designing a geothermal energy system in a spa protection area/B 10-Rosensteintunnel– Planung einer Geothermieanlage im Heilquellenschutzgebiet. *Geomechanics and Tunnelling*, 2016, vol. 9, no 5, p. 458-466.
- DORNBERGER, Sarah C., ROTTA LORIA, Alessandro F., ZHANG, Manlu, *et al.* Heat exchange potential of energy tunnels for different internal airflow characteristics. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2022, vol. 30, p. 100229.
- FRANZIUS, Jan Niklas et PRALLE, Norbert. Turning segmental tunnels into sources of renewable energy. In : *Proceedings of the institution of civil engineers-civil engineering*. Thomas Telford Ltd, 2011. p. 35-40.
- FRODL, Stephan, FRANZIUS, Jan Niklas, et BARTL, Thomas. Design and construction of the tunnel geothermal system in Jenbach. *Geomechanics and Tunnelling*, 2010, vol. 3, no 5, p. 658-668.
- ISLAM, Md Saiful, FUKUHARA, Teruyuki, WATANABE, Hiroshi, *et al.* Horizontal U-tube road heating system using tunnel ground heat. *Journal of snow engineering of Japan*, 2006, vol. 22, no 3, p. 229-234.
- LEE, Chulho, PARK, Sangwoo, WON, Jongmuk, *et al.* Evaluation of thermal performance of energy textile installed in Tunnel. *Renewable Energy*, 2012, vol. 42, p. 11-22.
- LEE, Chulho, PARK, Sangwoo, CHOI, Hyun-Jun, *et al.* Development of energy textile to use geothermal energy in tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, vol. 59, p. 105-113.
- NICHOLSON, Duncan P., CHEN, Qing, DE SILVA, Mike, *et al.* The design of thermal tunnel energy segments for Crossrail, UK. In : *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability*. Thomas Telford Ltd, 2014. p. 118-134
- PELTIER, Margaux, ROTTA LORIA, Alessandro F., LEPAGE, Loïc, *et al.* Numerical investigation of the convection heat transfer driven by airflows in underground tunnels. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 159, p. 113844.
- ROTTA LORIA, Alessandro F. Energy geostructures: Theory and application. In : *E3S web of conferences*. EDP Sciences, 2020. p. 01004.

- ROTTA LORIA, Alessandro F.. The thermal energy storage potential of underground tunnels used as heat exchangers. *Renewable Energy*, 2021, vol. 176, p. 214-227.
- STEMMLE, Ruben, MENBERG, Kathrin, RYBACH, Ladislaus, *et al.* Tunnel geothermics – A review. *Geomechanics and Tunnelling*, 2022, vol. 15, no 1, p. 104-111.
- TINTI, Francesco, BOLDINI, Daniela, FERRARI, Marco, *et al.* Exploitation of geothermal energy using tunnel lining technology in a mountain environment. A feasibility study for the Brenner Base tunnel–BBT. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, vol. 70, p. 182-203.

Les références suivantes ne sont pas citées dans le présent document, mais sont recommandées comme un complément d'information sur les tunnels énergétiques.

- DAI, Xiangdong, BIDARMAGHZ, Asal, et NARSILIO, Guillermo A. Energy tunnels: A review of the state of the art and knowledge gaps to harness renewable energy from underground infrastructure. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, vol. 142, p. 105431.
- LALOUÏ, Lyesse et ROTTA LORIA, Alessandro F.. *Analysis and design of energy geostructures: theoretical essentials and practical application*. Academic Press 2019.

TABLEAUX

Tableau 1. Références techniques

éditeur	année	référence	titre (fr)
CREGE	2008	PGN ^{1,2} (+) (CREGE 11-08/02)	Évaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel. Vol 1 :Rapport final. Vol. 2 : Annexes.
CREGE	2010	PDGN ^{3,4} (+) (CREGE 08-10/01)	Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel. Vol. 1 : Rapport final. Vol. 2 : Annexes.
CREGE	2013	IGS-NE ⁵ (+)	Inventaire géothermique et structural du canton de Neuchâtel. Rapport final.
OFEV	2009	— ⁶ (+)	Exploitation de la chaleur tirée du sol et du sous-sol. Aide à l'exécution destinée aux autorités d'exécution et aux spécialistes de géothermie.
OFROU	2010	FB 1330 ⁷ (+) (FGU 2008/006)	Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains ; évaluation de systèmes.
OFROU	2013	FB 1417 ⁸ (+) (FGU 2009/002)	Ancrages échangeurs de chaleur pour tunnels thermo-actifs.

¹https://crege.ch/download/rapports/PGN_v3.1_08.pdf

²https://crege.ch/download/rapports/PGN_v3.1_08_ANNEXES.pdf

³https://crege.ch/download/rapports/RapportFinalPDGN_08_2010.pdf

⁴https://crege.ch/download/rapports/RapportFinalPDGN_08_2010_Annexes.pdf

⁵https://crege.ch/download/rapports/IGS-NE/IGS-NE_rappor_final.pdf

⁶[https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/uv-umwelt-](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/uv-umwelt-vollzug/waermenutzung_ausbodenunduntergrund.pdf.download.pdf/exploitation_de_lachaleurtireedusoletdusous-sol.pdf)

[vortrag/waermenutzung_ausbodenunduntergrund.pdf.download.pdf/exploitation_de_lachaleurtireedusoletdusous-sol.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/wasser/uv-umwelt-vollzug/waermenutzung_ausbodenunduntergrund.pdf.download.pdf/exploitation_de_lachaleurtireedusoletdusous-sol.pdf)

⁷<https://www.mobilityplatform.ch/fr/research-data-shop/product/1330>

⁸<https://www.mobilityplatform.ch/fr/research-data-shop/product/1417>

éditeur	année	référence	titre (fr)
OFROU	2016	FB 1570 ¹ (+) (FGU 2012/005)	Extraction d'énergie géothermique de tunnels urbains ; l'essai pilote.
OFROU	2016	FB 1581 ² (+) (AGT 2014/005)	Amélioration de l'efficacité énergétique des tunnels routiers.
OFT	2022	P-169 ³ (+)	Intégration des géostructures énergétiques au futur projet de métro lausannois M3. Étude de faisabilité.
SIA	2005	SIA D 0190 ⁴	Utilisation de la chaleur du sol par des ouvrages de fondation et de soutènement en béton. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance.
SIA	2021	SIA 384/6 ⁵	Sondes géothermiques.
TI	2020	C264 V1 ⁶	Géostructures thermiques. Présentation du fonctionnement thermique et mécanique.

(+) Document disponible en téléchargement libre.

¹<https://www.mobilityplatform.ch/fr/research-data-shop/product/1570>

²<https://www.mobilityplatform.ch/fr/research-data-shop/product/1581>

³https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/umwelt/energiestrategie-projekte/schlussbericht-p169.pdf.download.pdf/P169_Rapport_final_SETP_2050.pdf

⁴<https://shop.sia.ch/documentations/4/d%200190/f/F/Product>

⁵https://shop.sia.ch/collection%20des%20normes/architecte/384-6_2021_f/F/Product

⁶<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/comportement-d-ouvrages-geotechniques-sous-sollicitations-complexes-42706210/geostructures-thermiques-c264/fonctionnement-d-une-geostructure-thermique-c264niv10001.html>

Tableau 2. Moyenne annuelles sur la période 2008 – 2021 des différentes régions climatiques du canton de Neuchâtel, calculées sur la base des valeurs mesurées et mises à disposition par le SENE (NE)¹.

région climatique	localité(s)	température de l'air (°C)	degrés-jours cumulés (-)	température du sol (°C) (+)
Neuchâtel	Auvernier, Corcelles-Cormondèche, Hauterive, Marin-Epagnier, Neuchâtel, Peseux, Saint-Blaise, Thielle-Wavre	10.9	2933	12.45
Littoral Est	Cornaux, Cressier, Le Landeron	10.5	3035	12.05
Littoral Ouest	Bevaix, Bôle, Boudry, Colombier, Cortaillod, Fresens, Gorgier, Montalchez, Saint-Aubin-Sauges, Vaumarcus	10.2	3131	11.75
Val-de-Ruz	Boudevilliers, Les Brenets, Cernier, Chézard-Saint-Martin, Coffrane, Dombresson, Enges, Engollon, Fenin-Vilars-Saules, Fontainemelon, Fontaines, Les Geneveys-sur-Coffrane, Les Hauts-Geneveys, Lignièrès, Montmollin, Rochefort, Savagnier, Valangin, Villiers	8.6	3669	10.15
Val-de-Travers	Boveresse, Brot-Dessous, Buttes, Couvet, Fleurier, Môtiers, Noiraigue, Saint-Sulpice, Travers	7.6	4026	9.15
La Chaux-de-Fonds	La Chaux-de-Fonds, Le Pâquier, Les Planchettes	7.3	4152	8.85
Le Locle	Les Bayards, La Côte-aux-Fées, Le Locle, Les Verrières	7.4	4142	8.95
Vallée de la Brévine	La Brévine, Le Cerneux-Péquignot, La Chaux-du-Milieu	5.6	4799	7.15
Vallée de la Sagne	Brot-Plamboz, Les Ponts-de-Martel, La Sagne	6.3	4538	7.85

(+) Calcul normalisé (SIA, 2021). La température du sol est estimée pour des altitudes inférieures à 1'000 m, et est donc sous-estimée pour les altitudes supérieures à 1'000 m. Ce choix est conservatif pour évaluer le potentiel de production de chaleur.

¹<https://www.ne.ch/autorites/DDTE/SENE/energie/Pages/Degres-jours.aspx>

Tableau 3. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel

contact	tunnel	puissance totale (kW)		production totale (MWh)	
CFF	Chaumont	3'494	15'566	8'736	38'916
CFF	Chaumont (galerie)	1'271	3'177	3'177	7'942
CFF	Vue-des-Alpes	2'626	11'142	6'566	27'855
CFF	Vue-des-Alpes (galerie)	955	2'388	2'388	5'969
OFROU	La Chaux-de-Fonds I	1'421	4'340	3'552	10'849
OFROU	La Chaux-de-Fonds II	1'421	4'340	3'552	10'849
OFROU	Le Locle I ⁽⁺⁾	4'844	4'424	4'609	41'064
OFROU	Le Locle I (galerie) ⁽⁺⁾	500	999	1'249	2'499
OFROU	Le Locle II ^(o)	1'817	4'361	4'543	10'903
OFROU	Mont Sagne (galerie)	180	450	450	1'124
OFROU	Vue-des-Alpes (galerie)	363	908	908	2'269
SPCH (NE)	Arêtes	443	1'353	1'108	3'384
potentiel de valorisation thermique (cumul)		13'991	48'024	34'978	120'059

⁽⁺⁾ Pour le tunnel d'évitement du Locle, les plans du premier tube et de la galerie de sécurité ont été approuvés, et ne peuvent plus faire l'objet de modifications.

^(o) Pour le tunnel d'évitement du Locle, la réalisation d'un deuxième tube est prévu par alésage de la galerie de sécurité du premier tube.

Tableau 4. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue des énergies fossiles

production de chaleur		ga		mazout EL	
production totale	GWh/an	35.0	120.1	35.0	120.1
rendement	–	0.95 ⁽⁺⁾		0.90 ⁽⁺⁾	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.1444		0.1311	
bilan économique	CHF/an	5.32 Mio	18.25 Mio	5.10 Mio	17.49 Mio
bilan économique comparé ^(o)	CHF/an	+ 3.74 Mio	+ 12.85 Mio	+ 3.52 Mio	+ 12.09 Mio
	–	+ 238 %		+ 224 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.230		0.324	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	8'468	29'067	12'592	43'222
bilan environnemental comparé ^(o)	tCO ₂ -éq/an	+ 7'375	+ 25'315	+ 11'499	+ 39'470
	–	+ 675 %		+ 1052 %	

(+) Estimation sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

(o) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>.

Tableau 5. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue de du bois-énergie.

production de chaleur		plaquettes		granulats (pellets)	
production totale	GWh/an	35.0	120.1	35.0	120.1
rendement	–	0.90 (+)		0.90 (+)	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.05 (+)		0.1121	
bilan économique	CHF/an	1.94 Mio	6.67 Mio	4.36 Mio	14.95 Mio
bilan économique comparé ^(o)	CHF/an	+ 0.37 Mio	+ 1.27 Mio	+ 2.78 Mio	+ 9.55 Mio
	–	+ 23.5 %		+ 177 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.0107		0.0277	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	416	1'427	1'077	3'695
bilan environnemental comparé ^(o)	tCO ₂ -éq/an	– 677	– 2'324	– 17	– 57
	–	– 62.0 %		– 1.5 %	

(+) Estimation sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

(o) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>.

Tableau 6. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain

contact	tunnel	puissance totale (kW)	production totale (MWh)
CFF	Brot	174	434
CFF	Col des Roches	137	344
CFF	Crosettes	505	1'262
CFF	Fleurier	179	447
CFF	Gibet	342	854
CFF	Haut de la Tour	110	274
CFF	Loges (+)	1'243	3'107
CFF	Mont Sagne (+)	423	1'057
CFF	Moyats	129	322
CFF	Saint-Aubin-Sauges	1'051	2'629
OFROU	Gorges du Seyon I (aval)	389	972
OFROU	Gorges du Seyon II (amont)	328	820
OFROU	Gorgier I	1'285	3'213
OFROU	Gorgier II	1'285	3'213
OFROU	Hauts-Geneveys	309	772
OFROU	Mont Sagne	502	1'256
OFROU	Neuchâtel I – Est	1'317	3'294
OFROU	Neuchâtel I – Ouest	400	999
OFROU	Neuchâtel I (ventilation)	161	403
OFROU	Neuchâtel II – Est	1'263	3'158
OFROU	Neuchâtel II – Ouest	375	939
OFROU	Neuchâtel II (ventilation)	161	403
OFROU	Sauges I	896	2'240
OFROU	Sauges II	887	2'217
OFROU	Serrières I	418	1'046
OFROU	Serrières II	390	974

contact	tunnel	puissance totale (kW)	production totale (MWh)
OFROU	Vue-des-Alpes	1'239	3'098
SPCH (NE)	Bois des Rutelins	138	344
SPCH (NE)	Clusette	328	820
SPCH (NE)	Clusette (galerie)	164	410
SPCH (NE)	Evitement de Saint-Aubin (A5)	219	547
TransN	Châtelard	95	238
TransN	Petits Monts	228	571
– ^(o)	Fun'ambule	83	208
Potentiel de valorisation thermique (cumul)		15'488	38'720

⁽⁺⁾ Une reconversion en voie verte est prévue après la mise en service de la ligne directe Neuchâtel – La Chaux-de-Fonds.

^(o) TransN est responsable de l'exploitation, et la ville de Neuchâtel est propriétaire de l'installation.

Tableau 7. Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte.

contact	tunnel	puissance totale (kW)	production totale (MWh)
OFROU	Areuse I	113	283
OFROU	Areuse II	113	283
OFROU	Boudevilliers I	106	265
OFROU	Boudevilliers II	106	265
OFROU	Chanélaz I	168	420
OFROU	Chanélaz II	168	420
OFROU	Hauterive I	140	350
OFROU	Hauterive II	140	350
OFROU	Malvilliers I	65	162
OFROU	Malvilliers II	65	162
OFROU	Monruz I	105	261
OFROU	Monruz II	105	261
OFROU	Saint-Blaise I	77	192
OFROU	Saint-Blaise II	77	192
OFROU	Vignier I	87	217
OFROU	Vignier II	87	217
TransN	Reymond	101	252
Potentiel de valorisation thermique (cumul)		1'821	4'552

Tableau 8. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue des énergies fossiles

production de chaleur		gaz		mazout EL	
production totale	GWh/an	38.7 ^(s)	4.6 ^(tc)	38.7 ^(s)	4.6 ^(tc)
rendement	–	0.95 ⁽⁺⁾		0.90 ⁽⁺⁾	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.1444		0.1311	
bilan économique	CHF/an	5.89 Mio	0.69 Mio	5.64 Mio	0.66 Mio
bilan économique comparé ^(o)	CHF/an	+ 4.14 Mio	+ 0.49 Mio	+ 3.90 Mio	+ 0.46 Mio
	–	+ 238 %		+ 224 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.230		0.324	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	9'374	1'102	13'939	1'639
bilan environnemental comparé ^(o)	tCO ₂ -éq/an	+ 8'164	+ 960	+ 12'729	+ 1'497
	–	+ 675 %		+ 1052 %	

⁽⁺⁾ Estimation sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

^(o) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain ou en tranchée couverte.

^(s) Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain.

^(tc) Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>.

Tableau 9. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel avec la production de chaleur issue de du bois-énergie

production de chaleur		plaquettes		granulats (pellets)	
production totale	GWh/an	38.7 ^(s)	4.6 ^(tc)	38.7 ^(s)	4.6 ^(tc)
rendement	–	0.90 ⁽⁺⁾		0.90 ⁽⁺⁾	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.05 ⁽⁺⁾		0.1121	
bilan économique	CHF/an	2.15 Mio	0.25 Mio	4.82 Mio	0.57 Mio
bilan économique comparé ^(o)	CHF/an	+ 0.41 Mio	+ 0.05 Mio	+ 3.08 Mio	+ 0.36 Mio
	–	+ 23.5 %		+ 177 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.0107		0.0277	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	460	54	1'192	140
bilan environnemental comparé ^(o)	tCO ₂ -éq/an	– 750	– 88	– 18	– 2
	–	– 62.0 %		– 1.5 %	

⁽⁺⁾ Estimation sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

^(o) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain ou en tranchée couverte.

^(s) Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain.

^(tc) Estimation du potentiel de valorisation thermique des tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>

Tableau 10. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 avec la production de chaleur issue des énergies fossiles

production de chaleur		gaz		mazout EL	
production totale	GWh/an	47.1	94.2	47.1	94.2
rendement	–	0.95 ⁽⁺⁾		0.90 ⁽⁺⁾	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.1444		0.1311	
bilan économique	CHF/an	7.16 Mio	14.33 Mio	6.86 Mio	13.73 Mio
bilan économique comparé ^(o)	CHF/an	+ 5.04 Mio	+ 10.08 Mio	+ 4.74 Mio	+ 9.49 Mio
	–	+ 238 %		+ 224 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.230		0.324	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	11'410	22'820	16'960	33'930
bilan environnemental comparé ^(o)	tCO ₂ -éq/an	+ 9'940	+ 19'870	+ 15'490	+ 30'980
	–	+ 675 %		+ 1052 %	

(+) Estimation sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

(o) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>

Tableau 11. Comparaison économique et environnementale de la production de chaleur issue de la valorisation du potentiel thermique des nouveaux tunnels – prévus dans le plan NeMo2030 – avec la production de chaleur issue de du bois-énergie

production de chaleur		plaquettes		granulats (pellets)	
production totale	GWh/an	47.1	94.2	47.1	94.2
rendement	–	0.90 (+)		0.90 (+)	
prix moyen (2022) ¹	CHF/kWh	0.05 (+)		0.1121	
bilan économique	CHF/an	2.62 Mio	5.24 Mio	5.87 Mio	11.74 Mio
bilan économique comparé (°)	CHF/an	+ 0.50 Mio	+ 0.99 Mio	+ 3.75 Mio	+ 7.50 Mio
	–	+ 23.5 %		+ 177 %	
émission des gaz à effet de serre ²	kgCO ₂ -éq/kWh	0.0107		0.0277	
bilan environnemental	tCO ₂ -éq/an	560	1'121	1'450	2'901
bilan environnemental comparé (°)	tCO ₂ -éq/an	– 912	– 1'825	– 22	– 45
	–	– 62.0 %		– 1.5 %	

(+) Estimation – raisonnable – sur la base de l'expérience de Masai Conseils SA.

(°) Calcul par rapport à la solution de référence, qui exploite pour la production de chaleur le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030.

¹IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).

<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

²KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.

<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>.

Tableau 12. Tunnels projetés dans le canton de Neuchâtel

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
CFF	Chaumont	Cernier (Val-de-Ruz) / Neuchâtel	5688	transport ferroviaire
CFF	Chaumont (galerie)	Cernier (Val-de-Ruz) / Neuchâtel	5688	galerie de sécurité
CFF	Vue-des-Alpes	Cernier (Val-de-Ruz) / La Chaux-de-Fonds	5700	transport ferroviaire
CFF	Vue-des-Alpes (galerie)	Cernier (Val-de-Ruz) / La Chaux-de-Fonds	5700	galerie de sécurité
OFROU	La Chaux-de-Fonds I	La Chaux-de-Fonds	3700	transport routier (N20)
OFROU	La Chaux-de-Fonds II	La Chaux-de-Fonds	3700	transport routier (N20)
OFROU	Le Locle I	Le Locle	4126	transport routier (N20)
OFROU	Le Locle I (galerie)	Le Locle	4067	galerie de sécurité
OFROU	Le Locle II ⁽⁺⁾	Le Locle	4067	transport routier (N20)
OFROU	Mont Sagne (galerie)	La Chaux-de-Fonds	1610	galerie de sécurité
OFROU	Vue-des-Alpes (galerie)	Fontainemelon / Fontaines (Val-de-Ruz)	3250	galerie de sécurité
SPCH (NE)	Arêtes	La Chaux-de-Fonds	1154	transport routier (H18)

⁽⁺⁾ Pour le tunnel d'évitement du Locle, la réalisation d'un deuxième tube est prévu par alésage de la galerie de sécurité du premier tube.

Tableau 13. Tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en souterrain (i.e. hors tunnels construits en tranchée ouverte)

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
BLS	Champréveyres	Hauterive / Neuchâtel	160	transport ferroviaire
BLS	Marin	Marin-Epagnier (La Tène)	55	transport ferroviaire
CFF	Bois-de-Ban	Rochefort	160	transport ferroviaire
CFF	Brot	Rochefort	455	transport ferroviaire
CFF	Champ Rouge	Rochefort	85	transport ferroviaire
CFF	Col des Roches	Le Locle	433	transport ferroviaire
CFF	Combes (Convers)	La Chaux-de-Fonds	254	transport ferroviaire
CFF	Combes (Creux)	La Chaux-de-Fonds	230	transport ferroviaire
CFF	Crosettes	La Chaux-de-Fonds	1618	transport ferroviaire
CFF	Fleurier	Fleurier (Val-de-Travers)	545	transport ferroviaire
CFF	Gibet	Neuchâtel	678	transport ferroviaire
CFF	Haut de la Tour	Saint-Sulpice (Val-de-Travers)	334	transport ferroviaire
CFF	La Luche	Rochefort	116	transport ferroviaire
CFF	Loge	Rochefort	54	transport ferroviaire
CFF	Loges (+)	Les Hauts-Geneveys	3259	transport ferroviaire
CFF	Mont Sagne (+)	La Chaux-de-Fonds	1355	transport ferroviaire

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
CFF	Moyats	Rochefort	338	transport ferroviaire
CFF	Places-Bourgeoises	Rochefort	70	transport ferroviaire
CFF	Rochefort	Rochefort	72	transport ferroviaire
CFF	Saint-Aubin-Sauges	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	2253	transport ferroviaire
CFF	Saint-Blaise	Saint-Blaise	155	transport ferroviaire
CFF	Saint-Sulpice	Saint-Sulpice (Val-de-Travers)	277	transport ferroviaire
CFF	Sauge	Rochefort	118	transport ferroviaire
CFF	Vauseyon	Neuchâtel	58	transport ferroviaire
CFF	Verrière	Rochefort	154	transport ferroviaire
OFROU	Col-des-Roches	Le Locle	100	transport routier (N20)
OFROU	Gorges du Seyon I – Aval	Neuchâtel / Valangin (Neuchâtel)	1020	transport routier (N20)
OFROU	Gorges du Seyon II – Amont	Neuchâtel / Valangin (Neuchâtel)	860	transport routier (N20)
OFROU	Gorgier I	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	2754	transport routier (N5)
OFROU	Gorgier II	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	2754	transport routier (N5)
OFROU	Hauts-Geneveys	Les Hauts-Geneveys (Val-de-Ruz)	810	transport routier (N20)
OFROU	Mont Sagne	La Chaux-de-Fonds	1610	transport routier (N20)
OFROU	Neuchâtel I – Est	Neuchâtel	2614	transport routier (N5)

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
OFROU	Neuchâtel I – Ouest	Neuchâtel	793	transport routier (N5)
OFROU	Neuchâtel I (ventilation)	Neuchâtel	640	galerie de ventilation
OFROU	Neuchâtel II – Est	Neuchâtel	2506	transport routier (N5)
OFROU	Neuchâtel II – Ouest	Neuchâtel	745	transport routier (N5)
OFROU	Neuchâtel II (ventilation)	Neuchâtel	640	galerie de ventilation
OFROU	Prébarreau	Neuchâtel	120	transport routier (N5)
OFROU	Sauges I	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	1920	transport routier (N5)
OFROU	Sauges II	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	1900	transport routier (N5)
OFROU	Serrières I	Neuchâtel	830	transport routier (N5)
OFROU	Serrières II	Neuchâtel	773	transport routier (N5)
OFROU	Vue-des-Alpes	Fontainemelon / Fontaines (Val-de-Ruz)	3250	transport routier (N20)
SPCH (NE)	Bois des Rutelins	Saint-Sulpice (Val-de-Travers)	420	transport routier (H10)
SPCH (NE)	Châtelard	Les Brenets (Le Locle)	92	transport routier (RC169)
SPCH (NE)	Clusette	Brot-Dessous / Noiraigue (Rochefort)	1000	transport routier (H10)
SPCH (NE)	Clusette (galerie)	Brot-Dessous / Noiraigue (Rochefort)	1000	galerie de sécurité
SPCH (NE)	Evitement de Saint-Aubin (A5)	Saint-Aubin-Sauges (La Grande Béroche)	469	transport routier (RC129)
SPCH (NE)	Maison Monsieur I	La Chaux-de-Fonds	30	transport routier (RC168)

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
SPCH (NE)	Maison Monsieur II	La Chaux-de-Fonds	25	transport routier (RC168)
SPCH (NE)	Noirvaux	La Côte-aux-Fées	15	transport routier (RC149)
SPCH (NE)	Rançonnière I	Le Locle	60	transport routier (RC169)
SPCH (NE)	Rançonnière II	Le Locle	24	transport routier (RC169)
SPCH (NE)	Rasse I	La Chaux-de-Fonds	30	transport routier (RC168)
SPCH (NE)	Rasse II	La Chaux-de-Fonds	20	transport routier (RC168)
SPCH (NE)	Roche Percée	Saint-Sulpice (Val-de-Travers)	36	transport routier (H10)
SPCH (NE)	Sagnettes (de la Roche)	Couvet (Val-de-Travers)	35	transport routier (RC149)
TransN	Châtelard	Le Locle	300	transport ferroviaire
TransN	Petits Monts	Le Locle	720	transport ferroviaire
TransN	Raya	Le Locle	38	transport ferroviaire
– ^(o)	Fun'ambule	Neuchâtel	330	transport funiculaire

⁽⁺⁾ Une reconversion en voie verte est prévue après la mise en service de la ligne directe Neuchâtel – La Chaux-de-Fonds.

^(o) TransN est responsable de l'exploitation, et la ville de Neuchâtel est propriétaire de l'installation.

Tableau 14. Tunnels existants dans le canton de Neuchâtel, construits en tranchée couverte

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
OFROU	Areuse I	Boudry	485	transport routier (N5)
OFROU	Areuse II	Boudry	485	transport routier (N5)
OFROU	Auvernier I	Auvernier (Milvignes)	185	transport routier (N5)
OFROU	Auvernier II	Auvernier (Milvignes)	185	transport routier (N5)
OFROU	Boudevilliers I	Boudevilliers (Val-de-Ruz)	555	transport routier (N20)
OFROU	Boudevilliers II	Boudevilliers (Val-de-Ruz)	555	transport routier (N20)
OFROU	Chanélaz I	Cortailod	720	transport routier (N5)
OFROU	Chanélaz II	Cortailod	720	transport routier (N5)
OFROU	Falaises Ouest I	Neuchâtel	275	transport routier (N5)
OFROU	Falaises Ouest II	Neuchâtel	275	transport routier (N5)
OFROU	Hauterive I	Hauterive	555	transport routier (N5)
OFROU	Hauterive II	Hauterive	555	transport routier (N5)
OFROU	Malvilliers I	Boudevilliers (Val-de-Ruz)	340	transport routier (N20)
OFROU	Malvilliers II	Boudevilliers (Val-de-Ruz)	340	transport routier (N20)
OFROU	Monruz I	Neuchâtel	415	transport routier (N5)
OFROU	Monruz II	Neuchâtel	415	transport routier (N5)

contact	tunnel	localité(s) (c.q. commune)	longueur (ml)	utilisation (c.q. axe)
OFROU	Saint-Blaise I	Saint-Blaise	305	transport routier (N5)
OFROU	Saint-Blaise II	Saint-Blaise	305	transport routier (N5)
OFROU	Vignier I	Saint-Blaise	345	transport routier (N5)
OFROU	Vignier II	Saint-Blaise	345	transport routier (N5)
TransN	Reymond	La Chaux-de-Fonds	323	transport ferroviaire

ANNEXES

Annexe 1. Plan Neuchâtel Mobilité 2030

Le plan NeMo2030⁴⁰ est le plan stratégique de mobilité du canton de Neuchâtel, pour lequel il est prévu des travaux d'adaptation des infrastructures des différents modes de transport, et en particulier des travaux de réfection ou de construction de nouveaux tunnels :

- la construction de deux nouveaux tunnels ferroviaires, avec la construction de deux nouvelles galeries de sécurité – et d'une nouvelle gare dans le Val-de-Ruz – pour la future ligne directe Neuchâtel – La Chaux-de-Fonds ;
- la réfection des tunnels ferroviaires des Loges et de la Vue-des-Alpes en voie verte, pour la mobilité douce entre la Chaux-de-Fonds et le Val-de-Ruz ;
- la construction d'un nouveau tunnel routier – le tunnel des Arêtes – pour le contournement de la Chaux-de-Fonds par la H18, et de deux nouveaux tunnels routiers, pour les contournements du Locle et de la Chaux-de-Fonds par la N20 ;
- la construction de deux nouvelles galeries de sécurité pour les tunnels routiers du Mont-Sagne et de la Vue-des-Alpes, sur la N20 entre la Chaux-de-Fonds et le Val-de-Ruz ;
- la réfection, avec la construction d'une nouvelle galerie de sécurité, du tunnel routier de la Clusette, sur la H10 dans le Val-de-Travers.

Le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 peut être estimé dans son ensemble et mis en perspective dans le contexte énergétique du canton de Neuchâtel. Ce calcul préliminaire – en ordre de grandeur – permet de préciser les enjeux et les limites de la valorisation thermique des tunnels neuchâtelois.

La longueur totale – cumulée en tenant compte du nombre des tubes et des galeries de sécurité – des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 est de 45 km environ. Compte tenu des travaux récents sur les tunnels énergétiques, la puissance thermique extractible moyenne peut être estimée – de façon relativement conservative – à 30 W/m² pour les surfaces avec activation thermique (Brandl, 2006 ; Dornberger, 2022). Le calcul préliminaire du potentiel de valorisation thermique se base aussi sur les hypothèses d'un tunnel avec un diamètre moyen de 10 m et un taux d'activation thermique – i.e un ratio de la longueur avec activation thermique par rapport à la longueur totale – de 1/3 à 2/3, et d'une installation de production de chaleur équivalente à une pompe à chaleur avec un COPa – coefficient de performance annuel – de 4 et une durée de fonctionnement de 2500 h/an.

Ainsi estimé, le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 est au total de 18.8 à 37.7 MW, soit une production annuelle de 47.1 à 94.2 GWh, et dont 14.1 à 18.3 MW, soit une production annuelle de 35.5 à 70.7 GWh, sont d'origine géothermique et aérothermique. A titre de comparaison, cela équivaut à la production de chaleur :

- d'une longueur de sondes géothermiques verticales comprise entre 353 et 942 km, pour une puissance linéique de 30 à 40 W/m,
- correspondant aux besoins de 3'930 à 7'850 ménages, pour un besoin moyen de 12 MWh par ménage environ,
- comprise entre 1/4 et 1/2 de la production de chaleur par valorisation thermique des déchets de l'arc jurassien dans la future – prévue pour 2030 – usine *Vadec_évolution*⁴¹.

⁴⁰<http://www.nemobilite2030.ch/>

⁴¹<https://evolution.vadec.ch/>

Le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 n'est pas négligeable, mais n'est pas suffisant pour remplacer les autres agents énergétiques pour la production de chaleur dans le canton de Neuchâtel. La valorisation thermique des tunnels neuchâtelois doit donc se faire en complément – et non au détriment – des autres agents énergétiques, locaux et renouvelables, comme le bois-énergie et les rejets de chaleur fatale.

Il est à noter que la production de chaleur avec le bois-énergie (plaquettes) est souvent complétée dans les réseaux de distribution thermique – pour les périodes de maintenance ou de pointe de consommation – par une production de chaleur avec les énergies fossiles (gaz), ni local ni renouvelable. Le potentiel de valorisation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 peut être mis en perspective dans ce contexte, en comparant le bilan annuel – économique et environnemental – de la production de chaleur avec les tunnels énergétiques, les énergies fossiles (mazout EL et gaz, cf. tableau 10) et le bois-énergie (plaquettes et granulats, cf. tableau 11).

Le bilan annuel de l'activation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 est de 2.12 Mio à 4.24 Mio CHF/an et de 1'470 à 2'950 tCO₂-éq/an. Il est calculé à partir de la consommation électrique de l'installation de production de chaleur, avec un prix moyen (2022)⁴² de 0.1800 CHF/kWh, pour l'électricité, et une émission des gaz à effet de serre⁴³ de 0.125 kgCO₂-éq/kWh, correspondant au mix électrique suisse de consommation. La comparaison du bilan économique et environnemental – annuel – de l'activation thermique des nouveaux tunnels du plan NeMo2030 avec ;

- les énergies fossiles est sans appel (cf. tableau 10). Par rapport au gaz, l'économie réalisée serait de 5.04 Mio à 10.08 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 9'940 à 19'870 tCO₂-éq/an. Par rapport au mazout EL, l'économie réalisée serait de 4.74 Mio à 9.49 Mio CHF/an, et les émissions évitées de gaz à effet de serre seraient de 15'490 à 30'980 tCO₂-éq/an. Les tunnels énergétiques sont plus économiques et plus écologiques, et sont une solution de remplacement des énergies fossiles pour la production de chaleur.
- le bois-énergie est équilibrée (cf. tableau 11). Par rapport aux plaquettes, l'économie réalisée serait de 0.50 Mio à 0.99 Mio CHF/an, mais les émissions supplémentaires de gaz à effet de serre seraient de 912 à 1'825 tCO₂-éq/an. Par rapport aux granulats, l'économie réalisée serait de 3.75 Mio à 7.50 Mio CHF/an, et les émissions de gaz à effet de serre seraient équivalentes. Les tunnels énergétiques sont une solution complémentaire et/ou alternative au bois-énergie pour la production de chaleur.

⁴²IPC (OFS, 2023). Indice des prix à la consommation, prix moyens de l'énergie et des carburants, valeurs mensuelles (depuis 1993) et annuelles (depuis 1966).
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home.html>

⁴³KBOB 2009/1:2022, Version 3 (OFCL, 2023). Données des écobilans dans la construction.
<https://www.kbob.admin.ch/kbob/fr/home.html>

Annexe 2. Neuchat'unnel

Les tunnels neuchâtelois sont listés d'après les informations disponibles dans la base de données des tunnels en Suisse du GTS⁴⁴, complétées ou corrigées – e.g. retrait de plusieurs tunnels disparus – avec les informations disponibles sur le géoportail cantonal⁴⁵. Une distinction est faite entre les tunnels projetés (cf. tableau 12), les tunnels existants, construits en souterrain (cf. tableau 13), et les tunnels existants, construits en tranchée couverte (cf. tableau 14).

Il est à noter que les travaux prévus pour la réfection du tunnel de la Clusette, avec la construction d'une nouvelle galerie de sécurité, sont en cours. Le percement de la galerie de sécurité est achevé et elle est listée dans les tunnels existants, construits en souterrain.

Il est à noter également que tous les tunnels projetés seront construits en souterrain.

⁴⁴<https://tdb.swisstunnels.ch/>

⁴⁵<https://sitn.ne.ch>