



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

INTÉGRATION DES GÉOSTRUCTURES ÉNERGÉTIQUES AU FUTUR PROJET DE MÉTRO LAUSANNOIS M3 – ETUDE DE FAISABILITÉ

Rapport final

Mohamed Meghari, Direction générale de l'environnement, Direction de l'énergie
Avenue de Valmont 30b, 1014 Lausanne, mohamed.meghari@vd.ch, www.vd.ch

Comité de pilotage

Bauer Julien, Transports publics de la région Lausannoise (tl)
Rinaldi Massimo, chef de service, Services industriels de Lausanne (SIL)
Trottet Yves, directeur de projet, Direction générale de la mobilité et des routes, (DGMR)
Vuille François, directeur, Direction générale de l'environnement, Direction de l'énergie (DGE-DIREN)

Chef de projet

Mohamed Meghari, chef de la division Efficacité énergétique (DGE-DIREN)

Comité technique

Evelyne Tornare, cheffe de projet environnement, DGMR
Céline Pahud, responsable planification énergétique, DGE-DIREN
Elsa Sudry, chef de projets, SIL
Akio Shoortl, ingénieur en technique de l'environnement, DIREN

Mandataires

Fabrice Rognon, CSD INGENIEURS SA
Marco Phidias, CSD INGENIEURS SA

Expert scientifique

Lyesse Laloui, Directeur du laboratoire de mécanique des sols à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL-LMS)

Mentions légales

Éditeur :
Office fédéral des transports OFT
Programme : Stratégie Énergétique 2050 dans les transports publics (SETP 2050)
CH-3003 Berne

Conduite du programme
Tristan Chevrolet, OFT

Numéro de projet : P-169

Source

Accessible gratuitement par Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Seul l'auteur (e) ou les auteurs (es) sont responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Berne, le 30 mai 2022

Table des matières

Zusammenfassung	4
Résumé exécutif	5
Executive Summary	6
Zusammenfassung	7
Résumé	11
1. Situation de départ	15
2. Objectifs du travail	15
3. Approche méthodologique et état des connaissances.....	15
4. Résultats.....	20
5. Discussion	29
6. Conclusions et perspectives.....	30
Liste des symboles et abréviations, y compris ceux utilisés dans les annexes	31
Références	32
<i>Annexe n°1 : Profil en long du tunnel.....</i>	<i>33</i>
<i>Annexe n°2 : modèle de calcul des échanges de chaleur, données et hypothèses.....</i>	<i>34</i>

Zusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung der neuen m3-Metrolinie wollten die Waadtländer Dienststellen für Umwelt und Mobilität eine technische und wirtschaftliche Studie durchführen, um die Möglichkeit der Integration von Energiegeostrukturen für das Projekt zu ermitteln. Zu diesem Zweck wurde ein mathematisches Modell entwickelt, um die erwartbaren Wärmeaustauschvorgänge zu modellieren sowie das Energiepotenzial der Infrastruktur abzuschätzen.

Das Modell ergab ein interessantes Wärmeerzeugungspotenzial bei Heizung und Warmwasser für mehrere Gebäude der Umgebung. Während der Sommermonate wird die von den Zügen abgegebene Wärme aufgefangen und mithilfe von Wärmetauschern im Bodenbereich der Tunnelwände gespeichert. Im Winter werden die Gebäude primär durch Entzug der im Sommer gespeicherten Wärme sowie hinzutretend durch Entzug der Wärme aus der in den Tunnel strömenden Luft beheizt. Die Ergebnisse zeigen, dass das Wärmerückgewinnungspotenzial der gesamten Infrastruktur je nach Abschnitt zwischen 629 und 1.271 MWh/Jahr geschätzt wird. Kumuliert wird ein Wert von 3,8 GWh/Jahr erreicht. Betrachtet man eine Wärmepumpe mit durchschnittlicher Jahresarbeitsleistung von 3,0, so läge die gelieferte Wärmeproduktion an die Endverbraucher pro Abschnitt zwischen 944 und 1.905 MWh/Jahr sowie die der Gesamtwärmeenergie geschätzt bei circa 5,8 GWh.

Die Kosten der in den einzelnen Abschnitten erzeugten Wärme können in der gleichen Reihenfolge wie das Produktionspotenzial eingestuft werden. Die interessantesten Abschnitte sind die Abschnitte 2 (Beaulieu – Casernes) und 3 (Casernes – Plaines-du-Loup), sie liegen bei 25 Rappen/kWh, gefolgt von Abschnitt 1 (Chauderon – Beaulieu) mit gerundeten Kosten von 28 Rappen/kWh. Im Vergleich ist der 4. Abschnitt (Plaines-du-Loup – Blécherette) mit 37 Rappen/kWh deutlich weniger günstig. Die Vergemeinschaftung der Abschnitte 2 und 3 im Profil des zukünftigen Plaines-du-Loup-Viertels mit dafür geschätzten Kosten von 21 Rappen/kWh stellt sich als durchaus interessant dar.

Diese ermutigenden Ergebnisse erlauben es, weitere Studien in Betracht zu ziehen. Insbesondere wird es hierzu notwendig sein, jene Modellannahmen zu bestätigen, auf denen die Berechnungen der vorliegenden Studie beruhen.

Schliesslich müssen zwei Herausforderungen bewältigt werden, um das Projekt in die Tat umzusetzen. Einerseits muss geklärt werden, ob dieses Energieprojekt rechtzeitig fertiggestellt werden kann, um in den Bau der m3-Metro integriert werden zu können, deren endgültige Pläne schon in den nächsten Monaten dem Bundesamt für Verkehr, der zur Erteilung der Baubewilligungen im Eisenbahnbereich zuständigen Behörde, zur Genehmigung vorgelegt werden. Andererseits sollte ein Unternehmen gefunden werden, das am Betrieb einer solchen Infrastruktur interessiert ist.

Résumé exécutif

Dans le cadre du développement de la nouvelle ligne de métro m3 à Lausanne dans le canton de Vaud, les services de l'État de Vaud en charge de l'environnement et de la mobilité ont souhaité mener une étude technico-économique afin de déterminer la possibilité d'intégrer des géostructures énergétiques au projet d'ouvrage. Pour ce faire, un modèle mathématique a été développé dans le but de modéliser les échanges de chaleur en jeu et d'estimer le potentiel énergétique de l'infrastructure.

Le modèle a mis en évidence un potentiel important de production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire de plusieurs immeubles se trouvant à proximité de la ligne de métro. La chaleur dégagée par les rames de train est captée durant la période estivale pour être stockée dans le terrain à travers des échangeurs de chaleur incorporés aux parois du tunnel. Durant l'hiver, les bâtiments sont chauffés grâce à l'extraction de la chaleur emmagasinée l'été et accessoirement de l'air ambiant dans le tunnel. Les résultats montrent que les potentiels de récupération de chaleur sur l'ensemble de l'infrastructure sont estimés entre 629 et 1'271 MWh/an selon le tronçon considéré et atteignent cumulativement la valeur de 3.8 GWh/an. En considérant une pompe à chaleur (PAC) avec un coefficient de performance (COP) moyen annuel de 3.0, la production de chaleur pourrait alors se situer entre 944 et 1'905 MWh/an par tronçon et l'énergie thermique totale fournie aux consommateurs finaux serait de l'ordre de 5.8 GWh.

Les coûts de revient de la chaleur produite dans chaque tronçon peuvent se classer dans le même ordre d'intérêt que le potentiel énergétique. Les tronçons les plus intéressants, à savoir les tronçons 2 (Beaulieu - Casernes) et 3 (Casernes – Plaines-du-Loup), offrent un coût de revient estimé à 25 ct./kWh; le tronçon 1 (Chauderon – Beaulieu) suit avec un coût de revient de 28 ct./kWh. Enfin, le 4ème tronçon (Plaines-du-Loup – Blécherette) est le plus défavorable avec 37 ct./kWh. La mutualisation des tronçons 2 et 3 au profil du futur quartier de Plaines-du-Loup représente un intérêt certain, avec un coût de revient estimé à 21 ct./kWh.

Ces premiers résultats encourageants incitent à poursuivre les études. Il faudra notamment valider ou consolider les hypothèses sur lesquelles reposent les calculs de la présente étude.

Enfin, deux défis se présenteront pour la concrétisation. D'une part, il s'agira de déterminer si ce projet énergétique peut être prêt à temps pour être intégré à la construction du métro m3, dont les plans définitifs seront soumis ces prochains mois pour approbation à l'Office fédéral des transports, l'autorité qui délivre les permis de construire dans le domaine ferroviaire. De l'autre, il faudra trouver un opérateur intéressé à exploiter une telle infrastructure.

Executive Summary

Taking advantage of the upcoming development of the new m3 metro line, the State of Vaud services in charge of environment and mobility wished to carry out a technical and economic study in order to determine the possibility of integrating energy geostructures. To achieve that, a mathematical model was developed aiming to determine heat exchanges involved and to estimate the energy generation potential.

The model revealed an interesting potential of heat generation to heat and produce domestic hot water of surrounding buildings. During the summer period, the heat released by the train sets is captured and stored in the ground through heat exchangers incorporated in the tunnel walls. During the winter, the buildings are heated by extracting the heat stored during the summer and, secondarily, by extracting heat from the air flowing into the tunnel. The results show that the heat recovery potential of the entire infrastructure is estimated to be between 629 and 1'271 MWh/year, depending on the section considered. They reach cumulatively the value of 3.8 GWh. Considering a heat pump with an average annual performance factor of 3.0, the heat production could then be between 944 and 1'905 MWh/year per section and a total thermal energy supplied to the final consumers of about 5.8 GWh.

The cost of the heat produced in each section can be ranked in the same order of interest as the heat generation potential. The most interesting sections, namely the sections 2 (Beaulieu – Casernes) and 3 (Casernes – Plaines-du-Loup), offer an estimated cost of 24 cents/kWh, followed by section 1 (Chauderon – Beaulieu) with a cost of 27 cents/kWh. Finally, the 4th section (Plaines-du-Loup – Blécherette) is the most unfavorable with 37 cents/kWh. The mutualization of sections 2 and 3 in the profile of the Plaines-du-Loup neighbourhood represents a real interest, with an estimated cost of 21 cents/kWh.

These encouraging results make it possible to consider further studies. In particular, it will be necessary to confirm the hypotheses on which the calculations of the present study are based.

Finally, two challenges will be faced in order to make the project a reality. On the one hand, it will be necessary to determine whether this energy project can be ready in time to be integrated into the construction of the m3 metro, the final plans of which will be submitted in the next few months for approval to the Federal Office of Transport, the authority that issues building permits in the railway sector. On the other hand, a company interested in running such an infrastructure will have to be found.

Zusammenfassung

I. Ziele und Methode

Um den zukünftigen Mobilitätsbedürfnissen des Kantons Waadt gerecht zu werden, wird das Netz der Lausanner Metro erweitert. Bis 2031 soll im oberen Teil der Stadt, zwischen dem Bahnhof Lausanne und Blécherette, eine neue U-Bahn-Linie, die M3, gebaut werden. Die Entwicklung dieser neuen Linie geht mit dem Bau eines unterirdischen Tunnels einher und eröffnet so die Möglichkeit, Wärmetauscher einzubauen, um Erdwärme und Abwärme aus dem Betrieb der neuen U-Bahn-Linie zu nutzen.

Die Studie, die Gegenstand dieses Dokuments ist, soll die Ausstattung bestimmter Abschnitte der zukünftigen U-Bahn mit Wärmetauschern untersuchen. So soll die geothermische Energie des Untergrunds genutzt werden, unabhängig davon, ob sie natürlich im Boden gespeichert ist oder durch den Betrieb der U-Bahn-Linie entsteht. Die Studie soll außerdem die wirtschaftliche Machbarkeit von Energie-Geostrukturen aufzeigen und eine Organisationsstruktur für die Realisierung, Verwaltung und Wartung der Infrastruktur herausarbeiten, falls diese realisiert werden sollte.

Um das Potenzial für die Wärmeenerzeugung durch den Tunnel der zukünftigen U-Bahn abzuschätzen, wurde speziell für das Projekt ein mathematisches Modell zur Berechnung der stündlichen Leistung, die von der Infrastruktur geliefert wird, entwickelt. Das Modell besteht aus zwei vereinfachten Berechnungsmodulen, mit denen die beteiligten Wärmeströme dargestellt werden können. Das erste Modul bezieht sich auf den Innenbereich des Tunnels und ermöglicht die Berechnung des Austauschs durch Konvektion, und dann durch Leitung zwischen der Luft und der in die Tunnelwände eingebauten Wärmerückgewinnungsanlage. Das zweite Modul betrifft den äußeren Teil des Tunnels, der von der Wärmerückgewinnungsanlage bis zu 20 m in das Gelände reicht. In diesem Teil findet der Austausch nur durch Leitung statt, ausgehend von der titelgebenden Annahme der geologischen Studien, die im Rahmen des Bauprojekts durchgeführt wurden, dass es keine Flüssigkeitsströme im Gelände gibt. Es ist zu beachten, dass das Berechnungsmodell davon ausgeht, dass nur ein Teil des Tunnels mit Wärmetauschern ausgestattet ist; der nicht ausgestattete Teil des Tunnels wird daher ebenfalls simuliert, da er die Temperatur der Innenluft im Tunnel durch passiven Austausch beeinflusst. Um die beteiligten Wärmeströme zu berechnen, wurden auch der Austausch mit der Außenluft und die Abwärme, die durch die Fahrten der U-Bahn entsteht, sowie die Abwärme, die durch die technische Ausstattung der Verkehrslinie erzeugt wird, modelliert. Die wirtschaftlichen Berechnungen entsprechen den konventionellen Regeln für Machbarkeitsstudien und waren daher nicht Gegenstand spezieller methodischer Entwicklungen.

II. Energiepotenzial

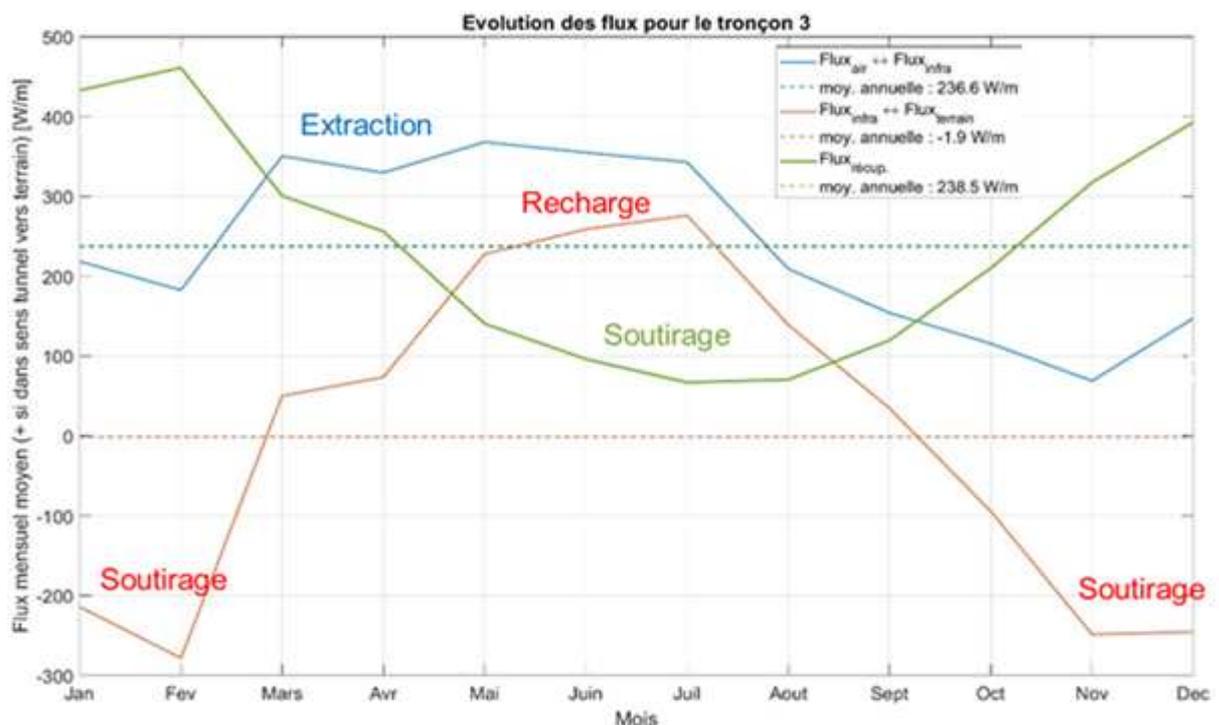


Abbildung 1: Geschätzter Wärmefluss für den Abschnitt 3, Casernes - Plaines-du-Loup (in W/m Tunnel)

Die Modellergebnisse machen deutlich, dass die Temperatur des Rückgewinnungskreislaufs von Oktober bis Februar niedriger als die des Geländes ist. Der Wärmestrom aus dem Gelände kommt zu dem der Tunnelluft hinzu und erhöht die Leistung, die dem Kreislauf entzogen werden kann, wodurch die Temperatur des Geländes in unmittelbarer Nähe des Wärmerückgewinnungssystems allmählich sinkt. Ab März kehrt sich das Phänomen um. Die Temperatur des Wärmerückgewinnungskreislaufs ist höher als die Temperatur der ersten Geländemeter, aber niedriger als die Temperatur der Umgebungsluft im Tunnel. Die Wärmetauscher nehmen also die Wärme aus der Umgebungsluft des Tunnels auf, aber ein Teil dieser Wärme geht in das Gelände, bevor sie den Eingang der Wärmepumpe erreicht. Diese Versorgung des Geländes mit Wärme über die Wärmetauscher ermöglicht sein Aufladen.

Letztendlich entzieht die Wärmepumpe dem Wärmerückgewinnungskreislauf das ganze Jahr über eine bestimmte Leistung und senkt dadurch dessen Temperatur. Dieser konstante Energieentzug (grüne Kurve in Abbildung 1, immer positiv) wird durch die kontinuierliche Energiezufuhr aus der Umgebungsluft ermöglicht (Abbildung 1, blaue Kurve, im Fall von Abschnitt 3 immer positiv), aber auch durch das Gelände, das den Wärmetauschern zwischen September und Februar zusätzliche Energie zuführt (rote Kurve in Abbildung 1). Das Gelände fungiert somit als wichtiger Wärmespeicher, aus dem im Winter, wenn der Bedarf der Endkunden am größten ist, Energie entnommen werden kann. Um das Gleichgewicht zu wahren und keine Abweichung der Bodentemperatur zu verursachen, muss die Anlage das Gelände lediglich in der Zwischensaison und im Sommer aufladen. Die Optimierungsfunktion des Modells sorgt dafür, dass die im Winter aus dem Erdreich aufgenommene Wärme strikt gleich ist wie die während des restlichen Jahres nachgeladene Wärme. Dabei wird die im Modell festgelegte Heizkurve eingehalten, die auf dem typischen Heiz- und Warmwasserbedarf für bestehende Gebäude beruht.

Die kumulierten Ergebnisse aus dem Modell (siehe Tabelle 1) zeigen, dass das Wärmerückgewinnungspotenzial für die gesamte Infrastruktur je nach betrachtetem Abschnitt zwischen 629 MWh/Jahr und 1.271 MWh/Jahr liegt. Sie erreichen kumulativ den Wert von 3,8 GWh/Jahr über die gesamte Strecke. Unter Berücksichtigung einer WP mit einem durchschnittlichen jährlichen COP von 3.0 könnte die Wärmeproduktion dann zwischen 944 und 1.905 MWh/Jahr pro Abschnitt liegen und die gesamte thermische Energie, die an die Endverbraucher geliefert werden könnte, läge in der Größenordnung von 5.8 GWh.

III. Gestehungskosten

Die Gestehungskosten für die Wärme sind mit den Kosten für die Alternativen vergleichbar, die in städtischen Gebieten in Betracht kommen, da sie überwiegend oder sogar ausschließlich aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Es wurde eine spezifische Variante analysiert. Diese besteht darin, das gesamte Potenzial der Abschnitte 2 und 3 im Profil des Projekts Plaines-du-Loup zu nutzen, das in der Nähe der U-Bahn-Linie geplant wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Gestehungskosten der von jedem Abschnitt erzeugten Wärme lassen sich in die gleiche Rangfolge wie das Produktionspotenzial einordnen. Die attraktivsten Abschnitte 2 und 3 (Beaulieu - Casernes und Casernes - Plaines-du-Loup) bieten geschätzte Gestehungskosten von 25 Rp./kWh; Abschnitt 1 (Chauderon - Beaulieu) folgt mit 28 Rp./kWh. Schließlich ist der 4. Abschnitt (Plaines-du-Loup - Blécherette) mit 37 Rp./kWh am wenigsten interessant. Die Rangfolge des Interesses an den einzelnen Abschnitten war zwangsläufig zu erwarten, da diese grundsätzlich mit dem Wärmepotenzial korreliert. Die gemeinsame Nutzung der beiden Abschnitte 2 und 3 im Profil des Viertels Plaines-du-Loup ist mit geschätzten Gestehungskosten von 21 Rp./kWh eindeutig interessant.

Abschnitt	Länge (m)	Rückgewinnbare Leistung (W/m)	Rückgewinnbare Leistung (W/m ²)	Heiße Leistung WP (kW) Durchschnitt/Spitze	Kalte Energie (MWh/Jahr)	Warme Energie (MWh/Jahr)	Verhältnis Warme Energie/ausgestatteter m (MWh/Jahr/m)	Gestehungskosten (CHF/kWh)
T1	600	170	9.7	153/293	894	1.341	2.24	0.28
T2	636	228	13.5	218/429	1.271	1.905	3.00	0.25
T3	501	239	15.8	180/353	1.049	1.573	3.14	0.25
T4	697	103	6.3	108/209	629	944	1.35	0.37
T2+T3	1.137	467	29.3	398/762	2.320	3.480	3.06	0.21

Tabelle 1: Wärmerückgewinnungspotenzial und Gestehungskosten der an Endverbraucher gelieferten Wärme.

Die Variante, das Potenzial der Abschnitte 2 und 3 im Profil des zukünftigen Stadtteils Plaines-du-Loup zu nutzen, ist in mehrfacher Hinsicht der interessanteste Weg. Erstens eignet sich die Nutzung von Niedertemperatur-Wärme besser für Niedrigenergiehäuser, insbesondere für solche, die hohe Energieeffizienzstandards erfüllen. Dies erspart auch die Notwendigkeit eines zusätzlichen Systems, um den in der Regel deutlich höheren Verteilungstemperaturen in bestehenden Gebäuden gerecht zu werden, und zielt auf eine Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz des gesamten Systems ab. Andererseits wirkt sich die gemeinsame Nutzung des Energievorkommens der beiden Abschnitte positiv auf die Gesteungskosten der erzeugten Wärme aus. Schließlich kann das Projekt vollständig in das Gesamtenergiekonzept für die Wärmeversorgung des Stadtteils Plaines-du-Loup integriert werden; die anderen untersuchten Energiequellen können derzeit nicht das gesamte gewünschte Band an erneuerbarer Energie liefern.

IV. Organisationsstruktur für die Projektverwirklichung

Es gibt zahlreiche partnerschaftliche Modalitäten zwischen den verschiedenen Akteuren, die in das Projekt der Energie-Geostrukturen involviert sind. Mit Blick auf die Eigentumsverhältnisse muss das in die Tunnelwände eingebaute Wärmegewinnungssystem jedoch demselben rechtlichen Rahmen unterliegen wie der Tunnel selbst. Nach dem Rechtsprinzip des Erwerbs können nämlich Bestandteile einer Immobilie (im vorliegenden Fall ein Tunnel) grundsätzlich nicht Gegenstand eines Eigentumsrechts sein, das sich von dem an der Immobilie unterscheidet. Somit schiene die Organisation am geeignetsten, die zwei Akteure vorsieht, die vertraglich durch eine Dienstbarkeit verbunden sind, deren Bedingungen noch festgelegt werden müssen. Das Gewinnungssystem und die gesamte mit dem Tunnel verbundene Ausrüstung müssen im Besitzumfang des Bauherrn bleiben, d. h. letztendlich der Lausanner Verkehrsbetriebe / Transports publics lausannois, (tl). Der Energiebetreiber übernimmt zugunsten der Dienstbarkeit die Investitionen in die Infrastruktur zur Wärmeerzeugung sowie die Verteilung und Lieferung der erzeugten Wärme an die Endkunden (siehe Abbildung 2). Die Fragen zu Investition, Wartung und Betriebs des Gewinnungssystems (Rückgewinnungskreislauf in den Wänden) sowie die Fragen im Zusammenhang mit der Sicherheit und generell die Verantwortlichkeiten der verschiedenen Partner sind hauptsächlich gewerbliche Elemente, die in den vorvertraglichen Gesprächen zwischen den tl und dem Betreiber angesprochen werden müssen.

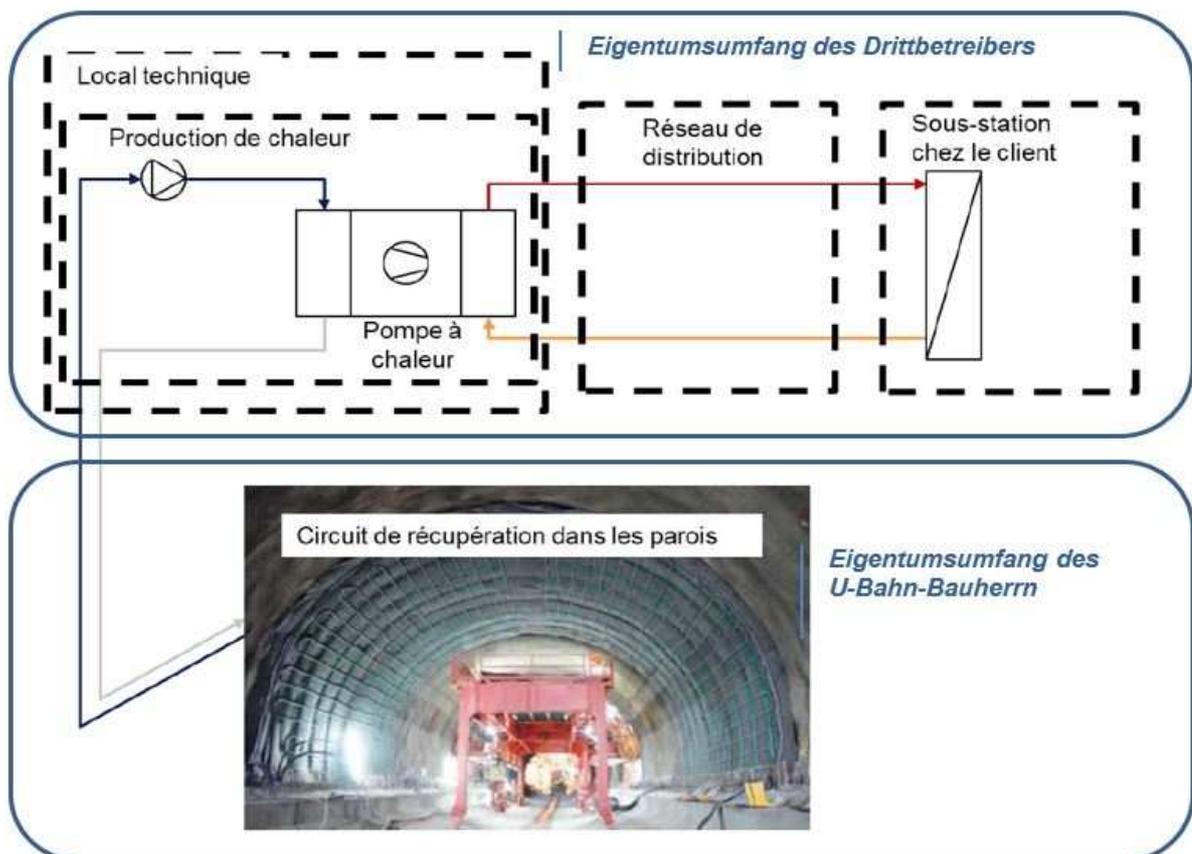


Abbildung 2: Eigentumsumfang der verschiedenen Teile der Energieinfrastruktur.

V. Schlussfolgerung und Empfehlungen

Auf der Grundlage der vorliegenden Studie wird dem Bauherrn eindeutig empfohlen, die Studien zur Integration von Energie-Geostrukturen fortzusetzen und so früh wie möglich einen Energiebetreiber einzubeziehen, wenn möglich bereits zu Beginn der Vorprojektstudien. Diese Studien müssen einerseits die in der vorliegenden Studie berücksichtigten Hypothesen bestätigen oder konsolidieren und andererseits die mechanischen Spannungen der Tragstruktur mit Hilfe thermomechanischer Simulationen besser darstellen und bei der Dimensionierung des unterirdischen Bauwerks und der Berechnung der dadurch verursachten Mehrkosten berücksichtigen. Im Rahmen künftiger Studien sollten auch die Ergebnisse der Wärmenutzung aus der Tunnelumgebungsluft präzisiert werden, wenn deutlichere Daten über das rollende Material und die Betriebsarten der U-Bahn vorliegen. Schließlich werden zwei Herausforderungen darin bestehen, dieses noch in der Entwicklung befindliche Projekt in den Bau der Metro M3 zu integrieren, deren endgültige Pläne in einigen Monaten dem Bundesamt für Verkehr zur Genehmigung vorgelegt werden, und einen Betreiber zu finden, der am Betrieb einer solchen Infrastruktur interessiert ist.

Résumé

VI. Objectifs et méthodologie

Pour répondre aux futurs besoins de mobilité du canton de Vaud, le réseau des métros lausannois se développe. À l'horizon 2031, une nouvelle ligne de métro, m3, sera construite entre la gare de Lausanne et la Blécherette dans les hauts de la ville. Le développement de cette nouvelle ligne, avec à la clé la construction d'un tunnel souterrain, ouvre la voie à la possibilité d'y incorporer des échangeurs pour récupérer la chaleur géothermique, mais aussi celle issue des rejets thermiques générés par l'exploitation de la nouvelle ligne de métro.

L'étude, objet du présent document, vise à étudier l'équipement de certaines sections de l'ouvrage du futur métro avec des échangeurs de chaleur afin d'exploiter l'énergie géothermique du sous-sol, qu'elle soit emmagasinée naturellement par le terrain ou issue de l'exploitation de la ligne de métro. L'étude a aussi pour objectif de démontrer la faisabilité économique des géostructures énergétiques et à dégager une structure organisationnelle pour la réalisation, la gestion et la maintenance de l'infrastructure si celle-ci venait à être réalisée.

Afin d'estimer le potentiel de production de chaleur à travers le tunnel du futur métro, un modèle mathématique permettant de calculer la puissance horaire fournie par l'infrastructure, a été développé spécifiquement pour le projet. Le modèle comprend deux modules simplifiés de calcul permettant de caractériser les flux de chaleur en jeu. Le premier module concerne la partie intérieure du tunnel et permet de calculer les échanges par convection, puis par conduction entre l'air et l'équipement de récupération de chaleur incorporé aux parois du tunnel. Le deuxième module concerne la partie externe du tunnel partant de l'équipement de récupération de chaleur jusqu'à 20 m. dans le terrain. Dans cette partie, les échanges se font par conduction uniquement, partant du postulat titré des études géologiques réalisées dans le cadre du projet d'ouvrage que les écoulements de fluides dans le terrain sont nuls. Notons que le modèle de calcul tient compte que seule une partie du tunnel est équipée d'échangeurs de chaleur ; la partie non équipée du tunnel est donc également simulée puisqu'elle impacte la température de l'air intérieur du tunnel via des échanges passifs. Pour calculer les flux thermiques en jeu, les échanges avec l'air extérieur et les rejets de chaleur liés aux déplacements du métro et ceux générés par les équipements techniques de la ligne de transport ont également été modélisés. Les calculs économiques répondent aux règles conventionnelles d'étude de faisabilité et n'ont donc pas fait l'objet de développements méthodologiques spécifiques.

VII. Potentiel énergétique

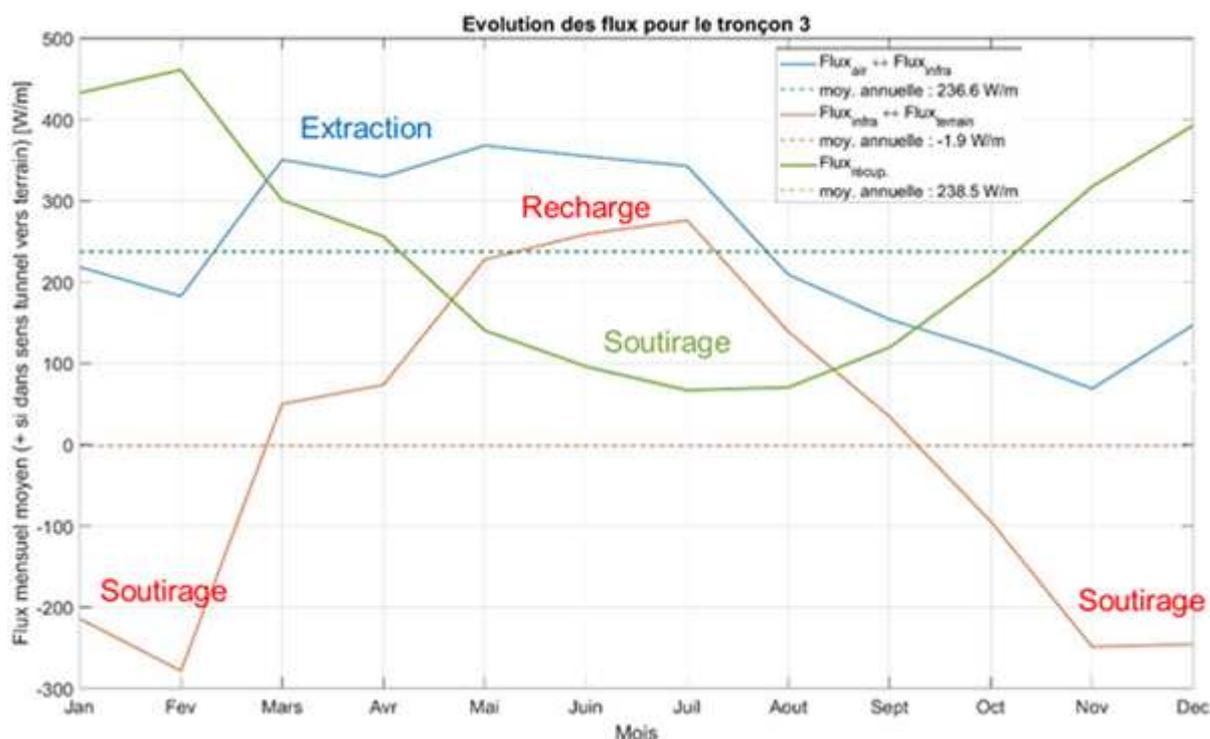


Figure 1 : Estimation des flux thermiques pour le tronçon 3, Casernes - Plaines-du-Loup (en W/m de tunnel)

Les résultats du modèle mettent en évidence que, d'octobre à février, la température du circuit de récupération est inférieure à celle du terrain. Le flux thermique provenant du terrain s'ajoute à celui de l'air du tunnel et augmente la puissance pouvant être soutirée au circuit, provoquant ainsi une baisse progressive de la température du terrain à proximité immédiate du système de récupération de chaleur. Dès le mois de mars, le phénomène s'inverse. La température du circuit de récupération de chaleur est supérieure à celle des premiers mètres de terrain, mais inférieure à la température de l'air ambiant du tunnel. Les échangeurs captent donc la chaleur issue de l'air ambiant du tunnel, mais une partie de cette chaleur alimente le terrain avant d'arriver à l'entrée de la pompe à chaleur. Cette alimentation du terrain en chaleur via les échangeurs permet la recharge de ce dernier.

In fine, toute l'année, la pompe à chaleur soutire une certaine puissance du circuit de récupération de chaleur et en abaisse donc la température. Ce soutirage constant d'énergie (courbe verte de la Figure 1, toujours positive) est rendu possible par l'apport continu en énergie provenant de l'air ambiant (Figure 1, courbe bleue, toujours positive dans le cas du tronçon 3), mais aussi du terrain, qui apporte de l'énergie supplémentaire aux échangeurs entre septembre et février (courbe rouge de la Figure 1). Le terrain joue ainsi le rôle d'un important réservoir de chaleur dans lequel on peut puiser de l'énergie en hiver, lorsque les besoins des clients finaux sont maximaux. Afin de maintenir l'équilibre et de ne pas engendrer de déviation dans la température du terrain, l'installation doit simplement recharger le terrain à la mi-saison et en été. La fonction d'optimisation du modèle s'assure de la stricte égalité entre la chaleur captée dans le terrain en hiver et celle qui est rechargée le reste de l'année, tout en respectant la courbe de chauffe définie dans le modèle, qui est basée sur des besoins typiques de chauffage et d'eau chaude sanitaire pour des bâtiments existants.

Les résultats cumulés issus du modèle (cf. Tableau 1) montrent que les potentiels de récupération de chaleur sur l'ensemble de l'infrastructure se situent entre 629 MWh/an et 1'271 MWh/an selon le tronçon considéré. Ils atteignent cumulativement la valeur de 3.8 GWh/an sur l'entier du tracé. En considérant une PAC avec un COP annuel moyen de 3.0, la production de chaleur pourrait alors se situer entre 944 et 1'905 MWh/an par tronçon et l'énergie thermique totale pouvant être fournie aux consommateurs finaux serait de l'ordre de 5.8 GWh.

VIII. Coût de revient

Le coût de revient de la chaleur se situe à un niveau comparable aux alternatives envisageables en milieu urbain, compte tenu de son caractère majoritairement, voire exclusivement, renouvelable. Une variante spécifique a été analysée. Elle consiste à mobiliser l'ensemble du potentiel des tronçons 2 et 3 au profil du projet des Plaines-du-Loup en planification à proximité de la ligne de métro. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 1.

Les coûts de revient de la chaleur produite par chaque tronçon peuvent se classer dans le même ordre d'intérêt que le potentiel de production. Les tronçons les plus intéressants, à savoir les 2 et 3 (Beaulieu - Casernes et Casernes - Plaines-du-Loup), offrent un coût de revient estimé à 25 ct./kWh; le tronçon 1 (Chauderon - Beaulieu) suit avec un coût de 28 ct./kWh. Enfin, le 4ème tronçon (Plaines-du-Loup - Blécherette) est le plus défavorable avec 37 ct./kWh. L'ordre d'intérêt des différents tronçons était forcément attendu, puisque celui-ci est en principe corrélé au potentiel de chaleur. La mutualisation des deux tronçons 2 et 3 au profil du quartier de Plaines-du-Loup représente un intérêt certain, avec un coût de revient estimé à 21 ct./kWh.

Tronçon	Longueur (m)	Puissance récupérable (W/m)	Puissance récupérable (W/m ²)	Puissance chaude PAC (kW) moyenne/pointe	Energie froide (MWh/an)	Energie chaude (MWh/an)	Ratio Energie chaude/m équipé (MWh/an/m)	Coût de revient (CHF/kWh)
T1	600	170	9.7	153/293	894	1'341	2.24	0.28
T2	636	228	13.5	218/429	1'271	1'905	3.00	0.25
T3	501	239	15.8	180/353	1'049	1'573	3.14	0.25
T4	697	103	6.3	108/209	629	944	1.35	0.37
T2+T3	1'137	467	29.3	398/762	2'320	3'480	3.06	0.21

Tableau 1 : potentiel de récupération de chaleur et coût de revient de la chaleur fournie aux consommateurs finaux

La variante consistant à mobiliser le potentiel des tronçons 2 et 3 au profil du futur quartier des Plaines-du-Loup est la voie à privilégier à plusieurs égards. D'abord, la valorisation de la chaleur basse enthalpie se prête mieux aux bâtiments à basse consommation, notamment ceux répondant à des standards de haute performance énergétique. Cela permet aussi d'éviter de prévoir un système complémentaire pour répondre aux températures de distribution généralement nettement plus hautes dans les bâtiments existants et vise à améliorer la performance énergétique globale de tout le système. D'autre part, la mutualisation du gisement énergétique des deux tronçons a un impact positif sur le coût de revient de la chaleur produite. Enfin, le projet peut s'intégrer pleinement dans le concept énergétique global d'approvisionnement en chaleur du quartier des Plaines-du-Loup ; les autres gisements énergétiques étudiés ne permettent actuellement pas de fournir l'entier du ruban d'énergie renouvelable souhaité.

IX. Structure organisationnelle pour la réalisation du projet

Les modalités partenariales entre les différents acteurs impliqués dans le projet des géostructures énergétiques sont nombreuses. Toutefois, eu égard aux rapports de propriété, le système de captage de chaleur incorporé aux parois du tunnel doit suivre le même sort juridique que le tunnel lui-même. En effet, en vertu du principe juridique de l'accession, les parties intégrantes d'un immeuble (tunnel dans le cas présent) ne peuvent en principe pas faire l'objet d'un droit de propriété distinct de celui qui porte sur l'immeuble. Ainsi, l'organisation qui semble être la plus adéquate serait celle qui consiste à prévoir deux acteurs réunis contractuellement par une servitude, dont les conditions restent à définir. Le système de captage et tout l'équipement rattaché au tunnel doit rester dans le périmètre de propriété du maître de l'ouvrage, à savoir, à terme, les Transports publics lausannois (tl). L'opérateur énergétique, au bénéfice d'une servitude, prendra en charge les investissements dans l'infrastructure de production de chaleur ainsi que la distribution et la fourniture aux clients finaux de la chaleur produite (cf. Figure 2). Les questions d'investissement, d'entretien et d'exploitation du système de captage (circuit de récupération dans les parois), de même que celles en relation avec la sécurité et, de manière générale, les responsabilités des différents partenaires sont des éléments essentiellement commerciaux qu'il s'agira d'aborder dans les discussions précontractuelles entre les tl et l'opérateur.

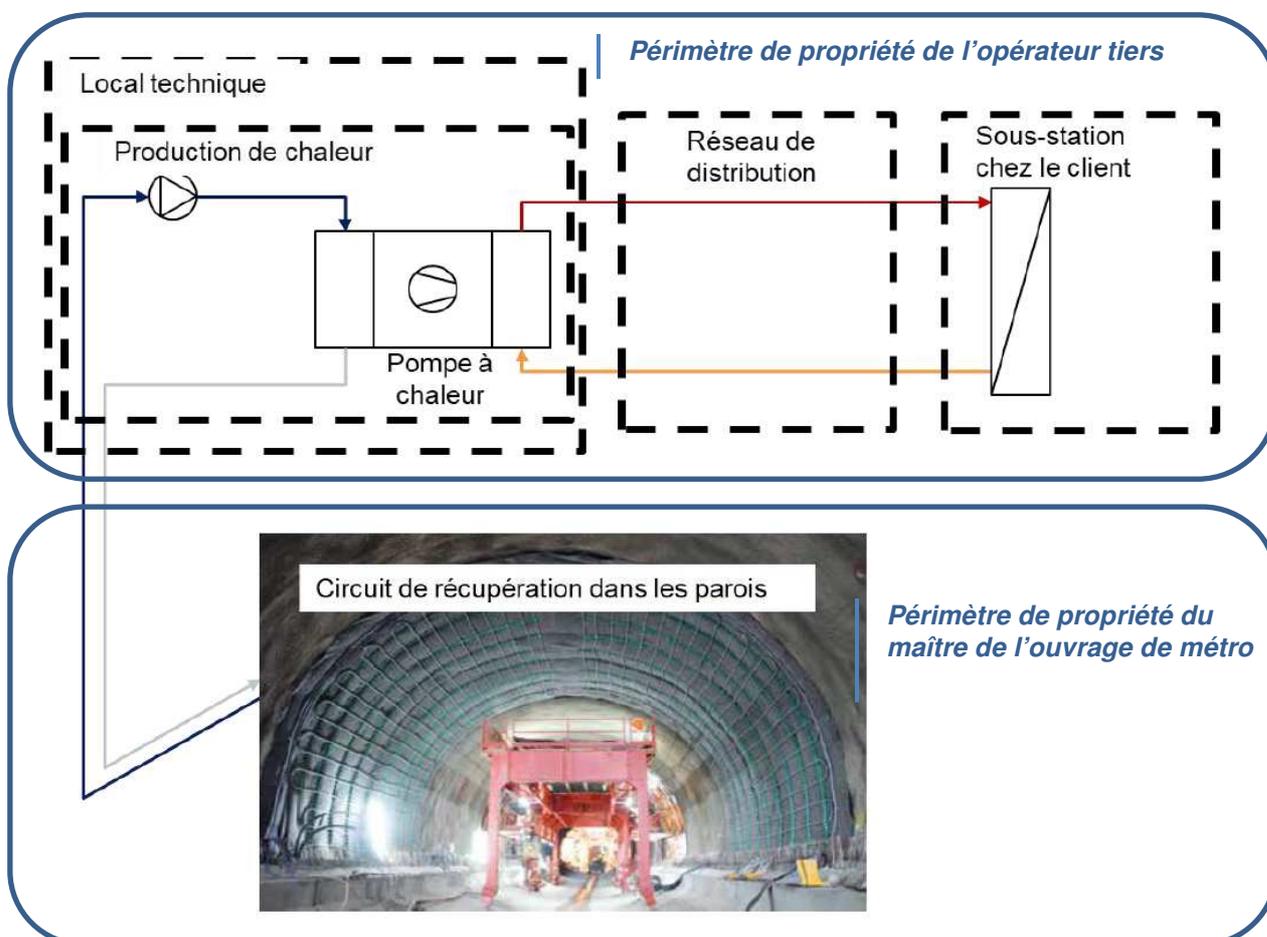


Figure 2 : périmètre de propriété des différents éléments de l'infrastructure énergétique

X. Conclusion et recommandations

Sur la base de la présente étude, il est clairement recommandé au maître d'ouvrage de poursuivre les études en vue d'intégrer les géostructures énergétiques et d'impliquer au plus tôt un opérateur énergétique, si possible dès le démarrage des études d'avant-projet. Ces études doivent, d'une part, valider ou consolider les hypothèses considérées dans la présente étude et, d'autre part, permettre de mieux caractériser les contraintes mécaniques de la structure porteuse à l'aide de simulations thermomécaniques et d'en tenir compte dans le dimensionnement de l'ouvrage souterrain et le calcul des surcoûts induits. Il convient également, dans le cadre des études à venir, de préciser les résultats obtenus en matière de valorisation de la chaleur provenant de l'air ambiant du tunnel au fur et à mesure que les données sur le matériel roulant et les modes d'exploitation du métro se préciseront. Enfin, deux défis consisteront à intégrer ce projet, encore en élaboration, à la construction du métro m3, dont les plans définitifs seront soumis pour approbation dans quelques mois à l'Office fédéral des transports et trouver un opérateur intéressé à exploiter une telle infrastructure.

1. Situation de départ

Pour répondre aux futurs besoins de mobilité du canton de Vaud, le réseau de métros lausannois se développe. À l'horizon 2030, la capacité du m2 sera augmentée et une nouvelle ligne m3 sera construite entre la gare de Lausanne et la Blécherette dans les hauts de la ville avec une mise en service prévue en 2031. Grâce au m2 et au m3, deux fois plus de voyageuses et voyageurs pourront être transportés entre la gare et le Flon, le secteur le plus chargé de la ligne.

Le développement d'une nouvelle ligne de métro, avec à la clef la construction d'un tunnel souterrain, ouvre la possibilité d'y incorporer des échangeurs pour récupérer la chaleur géothermique, mais aussi celle issue des rejets de chaleur générés par l'exploitation de la nouvelle ligne de métro. Plusieurs exemples de projets similaires réalisés à l'étranger montrent que de telles infrastructures présentent un potentiel intéressant de production de chaleur ou de froid pour couvrir les besoins des bâtiments situés à proximité.

Dans ce contexte, et afin de faire converger le développement des infrastructures de transport public avec les objectifs de la transition énergétique, la DGE, Direction générale de l'environnement, et la DGMR, Direction générale de la mobilité et des routes, ont souhaité établir, à travers une étude de faisabilité, le potentiel de géostructures énergétiques intégrées au projet du futur métro et, surtout, d'évaluer la viabilité économique d'une telle solution pour alimenter en chaleur des bâtiments en surface situés à proximité du tracé du futur métro. Le projet initial ne prévoyait pas une telle solution et la présente étude devrait contribuer significativement à aider les acteurs politiques et le maître de l'ouvrage à prévoir une telle solution qui présente pour avantage majeur, mais aussi comme défi à relever, de pouvoir être intégrée dans une infrastructure déjà planifiée.

2. Objectifs du travail

Le projet vise à étudier l'équipement de certaines sections de l'ouvrage du futur métro m3 avec des échangeurs de chaleur pour exploiter l'énergie géothermique du sous-sol, qu'elle soit emmagasinée naturellement par le terrain ou issue de l'exploitation du futur tunnel. L'étude vise à démontrer la faisabilité technico-économique des géostructures énergétiques et à dégager une structure organisationnelle pour la réalisation, la gestion et la maintenance de l'infrastructure si celle-ci venait à être réalisée.

La difficulté d'intégration des géostructures énergétiques réside dans le caractère opportuniste de l'étude de faisabilité qui doit s'insérer dans un projet ayant son propre cycle de vie et dont les études ont déjà démarré, ainsi que dans la multiplicité des acteurs concernés ou contribuant aux études du projet de métro et à sa réalisation. En effet, le métro a pour vocation de transporter des voyageurs. A cet égard, il participe grandement à la transition énergétique en permettant aux futurs usagers d'opter pour un moyen de déplacement qui est, globalement, moins impactant pour l'environnement, notamment en termes d'émission de gaz à effet de serre et qui participe au désengorgement des voies de circulation.

3. Approche méthodologique et état des connaissances

3.1. Etat des connaissances

Les géostructures énergétiques permettent d'utiliser les structures géotechniques comme des échangeurs de chaleur avec le terrain. Les pieux de fondation, les parois moulées ou les tunnels sont alors équipés de tubes en plastique dans lesquels circule un fluide caloporteur permettant de transporter l'énergie provenant du terrain en direction des bâtiments à chauffer et, dans certains cas, en injectant dans le terrain la chaleur provenant des bâtiments durant la période estivale dans le but de refroidir ces derniers. Les géostructures énergétiques fonctionnent donc selon le même principe que les systèmes géothermiques à basse enthalpie, telles que les corbeilles ou les sondes géothermiques. Elles présentent comme avantage comparatif de pouvoir s'intégrer dans les structures planifiées des bâtiments.

Les échanges de chaleur génèrent des variations de température cycliques, à la fois sur les structures géothermiques et sur le terrain qui les accueille, alors que l'efficacité du système doit répondre à des critères énergétiques et géotechniques-structurels qui dépendent fortement des conditions de localisation des constructions. Il s'agit donc d'un système complexe avec un comportement dépendant

de différents phénomènes thermiques, hydrauliques et mécaniques à la fois dans le sol et dans la structure. Ces différents phénomènes doivent être modélisés dans le but d'estimer leur potentiel énergétique, mais aussi pour quantifier leur impact sur les ouvrages et dimensionner ceux-ci en conséquence.

La technologie des géostructures énergétiques n'est pas nouvelle. Déjà en 2003, le terminal E de l'aéroport de Zurich a été équipé de plus de 300 pieux énergétiques. Ces dernières années, cette technologie se répand à travers le monde. Elle est soutenue par les acteurs politiques, car elle peut contribuer efficacement à la décarbonation du secteur des bâtiments, notamment dans les constructions nouvelles.

Le projet auquel notre étude peut se référer, est certainement celui de la gare de Lancy-Bachet sur la ligne du Léman Express. Les Services Industriels de Genève y ont lancé avec les CFF et d'autres partenaires un projet-pilote qui vise à exploiter la chaleur soutirée au tunnel de la ligne ferroviaire pour fournir en chaleur et en froid les bâtiments aux alentours. Premier de ce genre en Suisse, ce projet de géothermie a démarré en 2013 (24Heures, 07.08.2020). A travers le monde, plusieurs projets peuvent être cités en exemple. C'est le cas notamment pour de nouvelles lignes de métro du Grand Paris.

La technologie faisant l'objet de la présente étude est donc assez connue, mais n'a pas encore fait l'objet de beaucoup de projets en Suisse.

3.2. Structuration du projet

Le projet se compose des cinq *workpackages* suivants :

i. Pilotage et suivi de l'étude

Le pilotage de l'étude est assumé par deux organes, un comité de pilotage et un comité technique - mis en place pour assurer, respectivement le suivi stratégique et opérationnel du projet. Une équipe pluridisciplinaire représentant les services concernés de l'État de Vaud, les Services industriels de Lausanne (SiL), pressentis pour la réalisation et l'exploitation des réseaux thermiques qui peuvent découler du projet et les Transports publics de la région lausannoise (tl) auxquels la propriété de l'ouvrage sera transférée au terme des travaux.

L'équipe est appuyée par un mandataire spécialisé engagé à l'issue d'un processus d'appel d'offres et par un expert scientifique dont le rôle consiste à appuyer les organes du projet sur le plan technique et scientifique.

ii. Analyse de faisabilité technique

Cette phase a pour but d'évaluer les capacités thermiques d'extraction et d'injection de chaleur, ainsi que les besoins de chaleur le long du tracé du m3 et l'adéquation entre les besoins et le potentiel de production d'énergie. Il s'agit aussi ici de déterminer quels sont les tronçons du m3 qui pourront être équipés d'échangeurs de chaleur, d'en évaluer les implications sur l'ouvrage et sur le déroulement des travaux. Il est également question d'établir, à cette étape, la faisabilité technico-économique tant sur le plan structurel, que du point de vue du potentiel de production d'énergie.

iii. Analyse des surcoûts

Il s'agit ici d'estimer les surcoûts globaux liés à l'intégration des géostructures énergétiques, les coûts d'exploitation et de maintenance de l'infrastructure énergétique et le coût de revient de l'énergie produite. Ces analyses sont basées sur des données statistiques issues d'études similaires et des estimations ou des calculs effectués par les experts.

iv. Modalités d'exploitation de l'infrastructure énergétique

À cette étape, on s'intéressera aux options organisationnelles, contractuelles et juridiques permettant l'exploitation et l'entretien durable de l'infrastructure énergétique. Il s'agira également de proposer un modèle de partenariat pour assurer les interfaces entre le maître de l'ouvrage, les exploitants du m3 et les exploitants de l'infrastructure énergétique.

v. Valorisation des résultats

La valorisation des résultats fera l'objet de publications dans des revues scientifiques et dans la presse spécialisée. Des présentations publiques seront organisées pour vulgariser les résultats des études.

3.3. Méthodologie

3.3.1. Modélisation des échanges de chaleur et calcul du potentiel de production d'énergie

Afin d'estimer le potentiel de production de chaleur à travers l'infrastructure souterraine du futur métro, un modèle mathématique a été développé. Le modèle permet de calculer la puissance horaire pouvant être extraite de l'infrastructure. Le modèle tient compte, heure par heure, du flux thermique provenant du terrain et de celui provenant de l'air ambiant du tunnel, dont les caractéristiques physiques sont influencées par les apports thermiques provenant de la chaleur dégagée par les rames de métro et le renouvellement d'air. Le modèle retenu traduit donc les échanges de chaleur par convection et conduction entre l'air ambiant et le système de récupération, ainsi que les échanges par conduction entre le système de récupération et le terrain, ce dernier jouant le rôle de système de stockage saisonnier de chaleur.

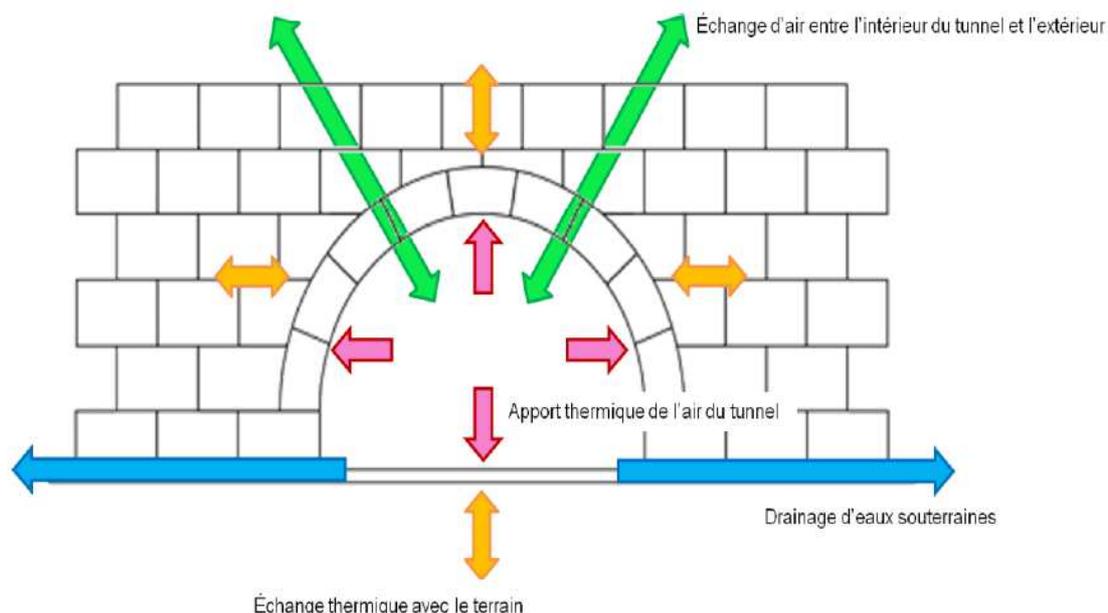


Figure 3 : échanges de chaleur modélisés (les échanges par drainages d'eaux souterraines sont négligés)

Pour construire le modèle mathématique, la première étape a consisté à caractériser l'infrastructure souterraine et à la découper en quatre tronçons présentant chacun des caractéristiques géologiques propres (cf. annexe 1). Chaque tronçon est ensuite découpé en 4 à 6 sous-tronçons homogènes du point de vue de l'accélération des rames (positive en cas d'accélération, nulle en cas de maintien de la vitesse, négative en cas de freinage) et en matière de géologie. Le modèle mathématique développé comprend deux modules simplifiés de calcul, permettant chacun de caractériser les flux de chaleur en jeu :

- Le module de la partie intérieure du tunnel jusqu'à l'équipement de récupération de chaleur par convection, puis par conduction ;
- La partie extérieure de l'équipement de récupération de chaleur jusqu'à 20 m. dans le terrain. Dans cette partie, les échanges se font par conduction uniquement, partant du postulat que les écoulements de fluides dans le terrain sont nuls. Cette hypothèse est tirée des études géologiques réalisées par le bureau Norbert SA pour le compte de la DGMR. Notons que le modèle de calcul tient compte du fait que seule une partie du tunnel est équipée d'échangeurs de chaleur. La partie non équipée est également simulée, puisqu'elle impacte la température de l'air intérieur du tunnel via des échanges passifs.

La température initiale du terrain, ainsi que la température de bord du modèle sont considérées à 11°C (valeur moyenne entre la SIA qui indique une valeur moyenne de 9.5°C et d'autres valeurs de la littérature qui laissent penser que la température pourrait être plus proche de 12°C). La simulation est faite sur une durée de 5 années, mais les résultats utilisés sont ceux de la 2ème année pour laquelle

les résultats montrent que les échanges thermiques sont stabilisés. La modélisation des échanges thermiques est effectuée de manière unidimensionnelle en conditions stationnaires. Ces valeurs sont admises homogènes sur le pourtour du tunnel. A ce stade, considérant les nombreuses hypothèses à admettre, cette méthode permet une précision suffisante pour le prédimensionnement des échangeurs et les calculs de l'énergie thermique produite. Plus précisément, la Figure 4 indique la dénomination des éléments utilisés dans les équations décrites ci-après.

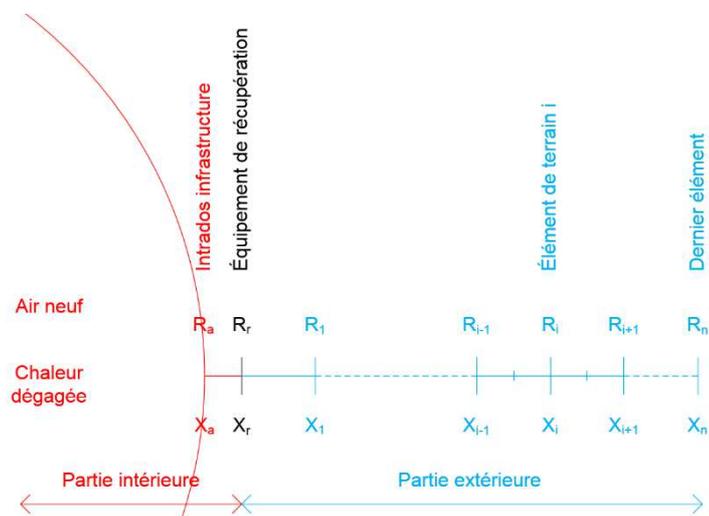


Figure 4 : représentation du modèle et nomenclature de ses éléments constitutifs

Afin de tester l'influence des hypothèses et les incertitudes liées aux variables sur les résultats, une étude de sensibilité est réalisée en définissant, pour chaque variable, trois valeurs (basse, standard et haute). L'impact de chaque variable a pu être évalué dans deux cas de figure :

- En considérant uniquement l'impact de la variable étudiée en fixant les autres variables à leur valeur standard retenue pour les calculs initiaux ;
- En considérant l'impact de la variable étudiée tout en faisant varier l'ensemble des autres variables.

Pour les flux de chaleur en jeu, deux grandeurs physiques sont déterminantes, à savoir la température de récupération (température à l'interface de l'équipement de récupération située dans l'infrastructure du tunnel) et la température de l'air ambiant dans le tunnel. Celle-ci aurait dû être déterminée sur la base de mesures dans le tunnel du métro m2 déjà en fonctionnement, mais malheureusement, ce travail n'a pas pu se réaliser pour des raisons techniques et organisationnelles.

Le modèles de calcul des échanges de chaleur en jeu dans les parties interne et externe du tunnel et le bilan de l'énergie soutirée sont précisés dans l'annexe 2.

3.3.2. Déperditions thermiques des rames de métros

Outre les échanges de chaleur avec l'extérieur (renouvellement d'air) et le terrain, les déperditions de chaleur générées par les métros sont également prises en compte, afin de déterminer la température d'équilibre à l'intérieur du terrain. Il s'agit des déperditions suivantes :

- Les pertes thermiques de la chaîne de traction ;
- Les rejets de chaleur liés au freinage des trains ;
- Les déperditions de chaleur dues à la climatisation, au fonctionnement des auxiliaires électriques, au frottement des pneus sur le rail et à l'aérodynamisme des trains.

Ces déperditions permettent le calcul de la température ambiante à l'intérieur du tunnel heure par heure, afin de modéliser ensuite les échanges de chaleur entre le tunnel et le terrain (cf. annexe 2).

3.3.3. Caractéristiques hydrogéologiques le long de la ligne de métro

La ligne de métro m3 traverse des terrains de nature géologiquement différentes. Ces terrains ont été caractérisés grâce à de multiples forages de reconnaissances effectués en 2016. La géologie le long de la ligne de métro est décrite dans les rapports établis par le bureau Norbert SA sur mandat de la DGMR. Elle présente des terrains meubles (remblais, sédiments glacio-lacustres et moraine) et rocheux (molasse grise de Lausanne). Dans les données à disposition, les sédiments glacio-lacustres apparaissent régulièrement humides à très humides. La moraine est quant à elle compacte et très peu perméable. La molasse présente quelques fractures ouvertes productrices de faibles venues d'eau. Ces formations peu perméables peuvent donc renfermer, notamment pour les sédiments glacio-lacustres (terrain régulièrement humide à très humide, parfois saturé) et le soubassement rocheux (petites venues d'eau), une certaine quantité d'eau.

Sur la base de données disponibles dans les rapports susmentionnés, il a pu être défini pour l'ensemble du tracé plusieurs tronçons de géologie différents qui sont mis en correspondance avec les géologies admises de la norme SIA 384/6. Pour chaque tronçon, une géologie attendue, une correspondance de type de roche ainsi que des valeurs de conductivité et de capacité thermique sont ainsi proposées. Ces valeurs de conductivité thermique sont extraites des Tableaux 6 et 7 de la norme SIA 384/6 sur les sondes géothermiques. Elles devront toutefois être affinées lors de la phase de projet par des tests de réponses thermiques.

3.3.4. Calcul du coût de revient de l'énergie produite

i. Estimation des besoins de chaleur en surface

Pour calculer les coûts de revient de l'énergie, il faut tout d'abord s'assurer qu'il existe suffisamment de preneurs de chaleur pour valoriser l'énergie produite. Partant, le coût de revient peut être calculé pour chaque tronçon selon les investissements à consentir et les coûts d'exploitation de l'infrastructure énergétique. Les calculs sont réalisés séparément pour chacun des quatre tronçons, lesquels font l'objet, chacun, d'une boucle de chauffage dédiée. Une variante spécifique consistant à prévoir une seule boucle de chauffage sur les deux tronçons les plus prometteurs, sera également analysée.

ii. Estimation des coûts de revient de la chaleur produite

L'estimation des coûts et du coût de revient de la chaleur produite est basée sur une caractérisation détaillée de l'ensemble de l'infrastructure énergétique au départ du système de captage de chaleur en tunnel et jusqu'à la distribution aux consommateurs finaux. Tous les postes sont pris en compte, à savoir :

- Le système de récupération de chaleur en tunnel ;
- La production de chaleur en centrale ;
- La distribution de chaleur chez les preneurs par conduites de chauffage à distance ;
- Les sous-stations chez les preneurs ;
- Les divers et imprévus (estimés forfaitairement à 30% des coûts cumulés des postes précédents) ;
- Les coûts d'ingénierie et du bureau d'assistance au maître d'ouvrage (BAMO) (estimés forfaitairement à 25% des coûts cumulés des postes précédents).

Les coûts totaux sont ensuite traduits en annuités d'investissements. A ceux-là s'ajoutent les coûts annuels d'exploitation en relation notamment, avec l'achat d'énergie, les coûts de maintenance, la commercialisation de l'énergie, etc. Le coût de revient de l'énergie, calculé sur la base des investissements et des coûts d'exploitation, permet de situer la rentabilité et donc la faisabilité économique du projet.

a. Coûts d'investissements

Les investissements sont calculés de manière échelonnée selon le phasage de réalisation du projet de métro. Il est tenu compte des réinvestissements périodiques selon la durée de vie des différentes parties de l'installation (les appareils et les pompes, les conduites et le génie civil n'ont pas les mêmes durées de vie et donc d'amortissement) ;

La méthode utilisée pour intégrer les effets financiers des investissements sur les coûts annuels est prudente et donne des résultats conservateurs pour les raisons suivantes :

- Aucune taxe de raccordement, ni de taxe annuelle de puissance n'ont été considérées, ce qui signifie que l'entier des effets des investissements est reporté sur les coûts de l'énergie produite et vendue. En pratique, une part de l'investissement est souvent répercutée sur les consommateurs finaux sous la forme d'une taxe de raccordement et n'apparaît donc pas dans le coût de l'énergie, exprimé en ct./kWh, fournie aux consommateurs ;
- Le coût de revient ne tient pas compte d'éventuelles subventions à l'investissement, ni à la réduction des émissions de CO₂. Or, vu l'intérêt du projet, des aides financières publiques pourront être obtenues ;
- L'infrastructure est comptablement amortie à la fin de la durée d'analyse de 45 ans. En pratique, même si la valeur de l'infrastructure sera comptablement nulle à la fin de cette période, elle conservera une valeur d'usage non nulle et pourra être utilisée pendant une durée plus longue (les conduites, typiquement, ont une durée de vie de 60 ans et le système de récupération de chaleur dans le tunnel est théoriquement censé durer 100 ans).

Les annuités d'investissements sont décomposées en sous-catégories et représentées selon plusieurs étapes temporelles du projet qui constituent les jalons de souscription de prêts bancaires successifs permettant de financer les investissements de départ et les réinvestissements nécessaires au remplacement des éléments arrivant à la fin de leur durée de vie (cf. Figure 8). Le calcul des investissements est réalisé sur une période de 45 ans et est effectué séparément pour chaque tronçon. Sur ces 45 ans, on estime que la chaleur est vendue pendant 40 ans (le calcul tient compte d'une durée initiale de 5 ans de travaux à financer sans qu'aucune vente de chaleur n'ait lieu).

b. Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation comprennent tous les coûts générés en phase d'exploitation de l'infrastructure énergétique, y compris les coûts d'entretiens, de maintenance, d'achat d'énergie, etc. Les taxes CO₂ pour l'appoint d'énergie des tronçons 1, 2 et 4 ne sont pas prises en compte. Les coûts externes ne sont pas non plus pris en compte.

3.3.5. Modalités d'exploitation de l'infrastructure énergétique

Les modalités d'exploitation de l'infrastructure énergétique sont analysées sur la base des rapports de propriété et les différentes configurations possibles. Elles sont ensuite soumises au regard critique du collège des experts impliqués, afin de proposer une solution à défendre pour la suite du projet.

4. Résultats

4.1. Déperditions générées par les rames de métro

Rapportées à la longueur du tunnel, les déperditions liées à l'accélération en montée et le freinage en descente sont les plus importantes. La phase de maintien de vitesse (entre deux stations) induit également des déperditions non négligeables, notamment à cause de la résistance au dépassement de la vitesse constante. Naturellement, les déperditions liées au freinage en cote et à l'accélération en descente sont bien moins importantes, tandis que les rejets de chaleur liés à la climatisation et au fonctionnement des auxiliaires sont faibles si on les rapporte à la longueur de tunnel.

	Puissance annuelle moyenne dissipée par m2	Puissance annuelle moyenne dissipée par m2 pendant les heures de pointe
Tronçon 1 : Chauderon - Beaulieu	4.2 W/m2.	8.7 W/m2.
Tronçon 2 : Beaulieu - Casernes	5.1 W/m2.	10.7 W/m2.
Tronçon 3 : Casernes - Plaines du Loup	5.2 W/m2.	10.9 W/m2.
Tronçon 4 : Plaines-du-Loup - Blécherette	1.5 W/m2.	3.2 W/m2.

Tableau 2 : puissances annuelles dissipées sur l'année et durant les heures de pointes en W/m2.

En moyenne journalière, les déperditions thermiques des rames varient entre 1.5 W et 5.2 W/m2 en fonction des tronçons considérés et en tenant compte du cadencement des métros. Le flux maximal instantané, calculé sur les heures de pointe, varie entre 3.2 W et 10.9 W/m2. Si on fait abstraction des valeurs du tronçon T4, dont les résultats semblent peu prometteurs, cette fourchette varie de 4.2 à 5.2 W/m2 en moyenne et entre 8.7 et 10.9 W/m2 en instantané.

Les différences entre les tronçons s'expliquent par la forme géométrique du parcours du métro. Le métro qui arrive en station après une pente descendante transfère davantage de chaleur au tunnel que le métro qui se déplace en côte dans le sens inverse. Ceci est dû à deux phases de freinage accrues. La première lorsque le métro est stabilisé à la vitesse maximale permise (le train en descente doit alors freiner pour ne pas dépasser la vitesse maximale) et la seconde pour freiner jusqu'à l'arrêt lors de l'arrivée en station. A l'inverse, le métro se déplaçant dans le sens montant dépense de l'énergie (et dissipe donc de la chaleur) pour vaincre l'énergie potentielle liée à la côte. Toutefois, les déperditions générées lors des deux phases d'accélération (accélération initiale en sortie de station, puis maintien de la vitesse en côte permettant de vaincre la pente) sont nettement inférieures aux déperditions liées au freinage du métro arrivant en sens inverse. Ce phénomène est dû essentiellement au fait que le rendement de traction est de 80%, alors que le rendement moyen de récupération de chaleur au freinage est de 30% (cf. annexe 2). Le système de traction dégage donc moins de chaleur que le système de freinage et induit donc moins de récupération de chaleur pour une même différence d'énergie cinétique.

En tenant compte du cadencement des rames, les déperditions thermiques totales des trains dans le tronçon le plus prometteur (T3) s'élèvent à 5.2 W/m². Ces déperditions sont 13% inférieures à la valeur calculée et estimée dans le cadre du Grand Paris (6 W/m²). Les métros du m3 ont une vitesse 53% inférieure à la vitesse maximale des rames du Grand Paris (120 km/h). L'énergie cinétique variant avec le carré de la vitesse, on aurait pu s'attendre à ce que les déperditions de chaleur du m3 soient très inférieures à celles calculées dans le projet du Grand Paris. Cet effet est partiellement compensé par le cadencement du m3, supérieur à celui du Grand Paris et à la forte pente du m3 qui augmente les déperditions thermiques.

4.2. Potentiel de récupération de chaleur

Les résultats du modèle mettent en évidence que, d'octobre à février, la température du circuit de récupération est inférieure à celle du terrain (Figure 6). Le flux thermique provenant du terrain s'ajoute à celui de l'air du tunnel et augmente la puissance pouvant être soutirée au circuit, provoquant ainsi une baisse progressive de la température du terrain à proximité immédiate du système de récupération de chaleur. Dès le mois de mars, le phénomène s'inverse. La température du circuit de récupération de chaleur est supérieure à celle des premiers mètres de terrain, mais inférieure à la température de l'air ambiant du tunnel. Les échangeurs captent donc la chaleur issue de l'air ambiant du tunnel, mais une partie de cette chaleur alimente le terrain avant d'arriver à l'entrée de la pompe à chaleur. Cette alimentation du terrain en chaleur via les échangeurs permet la recharge de ce dernier.

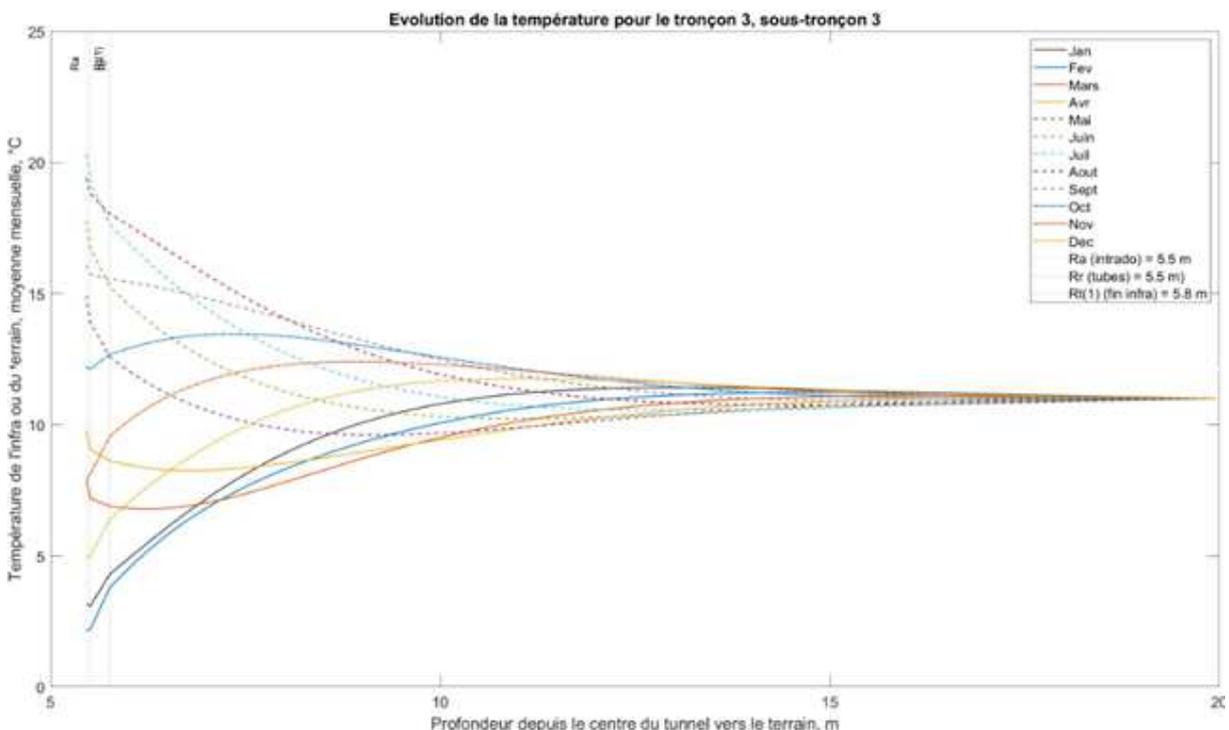


Figure 5 : modélisation des températures moyennes du terrain au cours de la seconde année d'extraction de chaleur pour le sous-tronçon 3 du Tronçon 3 Casernes - Plaines du Loup

In fine, la pompe à chaleur soutire toute l'année une certaine puissance du circuit de récupération de chaleur et en abaisse donc la température. Ce soutirage constant d'énergie (courbe verte de la Figure 6, toujours positive) est rendu possible par l'apport continu en énergie provenant de l'air ambiant (Figure 6, courbe bleue, toujours positive dans le cas du tronçon 3), mais aussi du terrain qui apporte de l'énergie supplémentaire aux échangeurs entre septembre et février (courbe rouge de la Figure 6). Le terrain joue ainsi le rôle d'un important réservoir de chaleur dans lequel on peut puiser de l'énergie en hiver, lorsque les besoins des clients finaux sont maximaux. Afin de maintenir l'équilibre et de ne pas engendrer des déviations dans la température du terrain, l'installation doit simplement recharger le terrain à la mi-saison et en été. La fonction d'optimisation du modèle s'assure de la stricte égalité entre la chaleur captée dans le terrain en hiver et celle qui est rechargée le reste de l'année, tout en respectant la courbe de chauffe définie dans le modèle basé sur des besoins typiques de chauffage et d'eau chaude sanitaire pour des bâtiments existants.

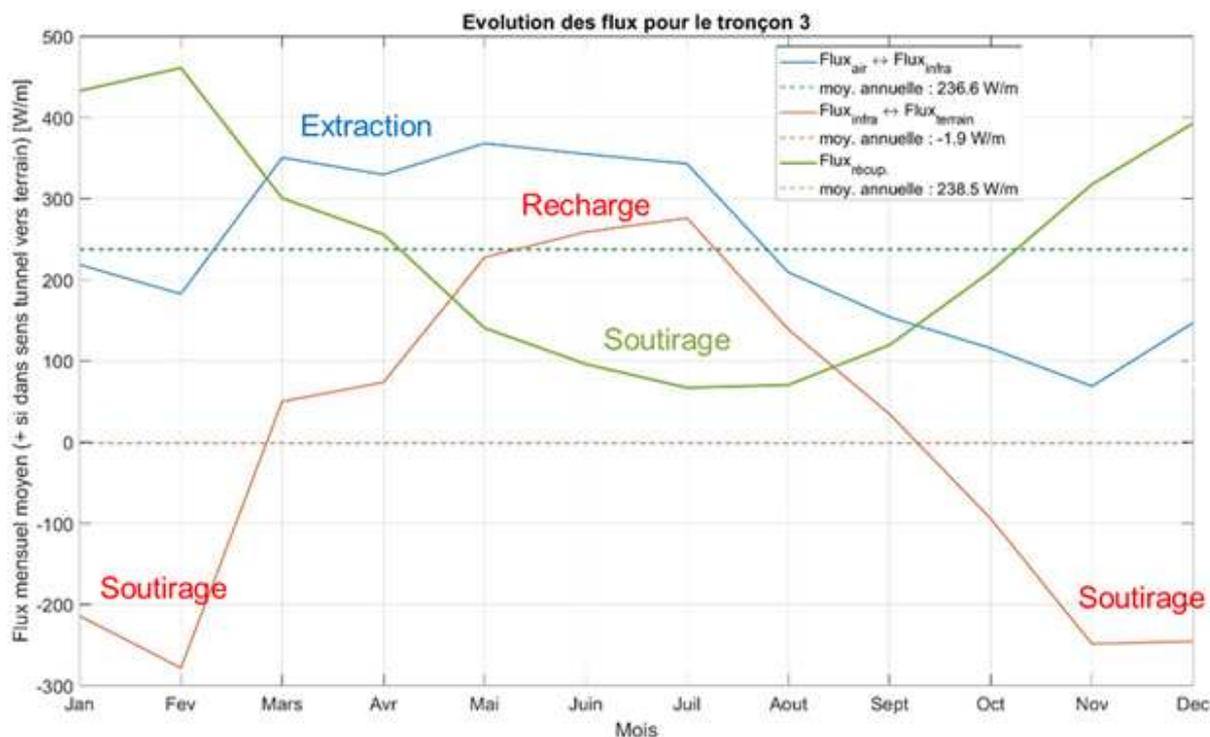


Figure 6 : estimation des flux thermiques pour le tronçon 3, Casernes - Plaines-du-Loup (en W/m de tunnel)

De manière plus détaillée, la Figure 6 montre que le système de récupération de chaleur extrait relativement peu de chaleur de l'air ambiant du tunnel entre octobre et février. Cela en raison de l'influence des conditions climatiques sur la température de l'air ambiant, laquelle est plus basse que durant le reste de l'année. Pendant les mois d'hiver, peu de chaleur en provenance de l'air intérieur du tunnel est valorisée. Comme c'est précisément durant cette période que les besoins des preneurs de chaleur sont les plus forts, l'énergie nécessaire est ainsi soutirée au terrain (flux rouge négatif par convention) pour compenser la quantité relativement faible de chaleur qui provient directement de l'air ambiant. Le fait de soutirer le maximum de chaleur au terrain et la chaleur résiduelle de l'air ambiant permet de maximiser le flux récupéré (indiqué en vert). C'est ce dernier qui constitue l'énergie valorisée à l'entrée des PAC.

De mars à septembre, les besoins de chaleur des preneurs baissent de manière quasi continue (courbe verte), alors même que l'air ambiant se réchauffe progressivement. Durant cette période, la chaleur contenue dans l'air ambiant du tunnel excède donc les besoins des preneurs (courbe bleue au-dessus de la courbe verte). Ainsi, une partie de la chaleur extraite de l'air ambiant sert à assurer les besoins résiduels de chaleur des preneurs, tandis que le solde sert à recharger le terrain qui a été opportunément mis à contribution en hiver.

Ainsi, en mars, la puissance thermique permettant d'assurer les besoins de chaleur des bâtiments, est d'environ 300 W/m (courbe verte). Or, il est possible d'extraire 350 W/m de l'air extérieur (courbe bleue). Le système de récupération de chaleur capte donc initialement 350 W/m, mais seulement 300 W/m arrivent effectivement à l'entrée des PAC. Le solde de 50 W/m « fuit » vers le terrain, ce qui permet sa recharge progressive. Durant ce mois, les besoins de chaleur des preneurs sont donc assurés à 100% par l'extraction de chaleur provenant de l'air ambiant du tunnel et le solde d'énergie disponible dans l'air intérieur est extrait pour recharger le terrain. En prenant les exemples des mois d'avril à septembre, le

même principe prévaut. La seule différence est que les besoins de chaleur sont tellement faibles que la quasi-totalité de la chaleur provenant de l'air ambiant du tunnel sert à recharger le terrain.

Les résultats cumulés issus du modèle montrent que les potentiels de récupération de chaleur sur l'ensemble de l'infrastructure sont estimés entre 629 et 1'271 MWh/an selon le tronçon considéré. Ils atteignent cumulativement 3.8 GWh/an sur l'entier du tracé (coté évaporateur de la PAC). En considérant une PAC avec un coefficient de performance (COP) moyen annuel de 3.0, le potentiel de récupération de chaleur pourrait alors se situer entre 944 et 1'905 MWh/an par tronçon et l'énergie thermique totale fournie aux consommateurs finaux serait de l'ordre de 5.8 GWh/an (coté condenseur de la PAC).

4.2.1. Analyse de sensibilité du modèle

Le modèle possède différentes limites. Outre l'aspect isotrope, qui n'est pas en mesure d'apprécier la complexité réelle des flux générés, le modèle s'appuie sur un certain nombre de variables dont les valeurs de base comportent parfois des incertitudes élevées. L'analyse de sensibilité permet d'évaluer la variabilité des résultats si l'on change l'une ou l'autre variable prise en compte. L'analyse de sensibilité, dont les résultats sont présentés ci-après, permet de mieux apprécier l'effet de chacune des variables sur les résultats issus du modèle de calcul et resitue en conséquence le potentiel énergétique de l'infrastructure.

Variable	Effet de la variable Sæule	Effet conjugué avec les autres variables	Résultats
T° terrain (variation de 26%)	<u>Majeur</u> (facteur 8.5 entre valeur basse et valeur haute)	<u>Très important</u> (facteur 2.6 entre valeur basse et valeur haute)	Plus le terrain est chaud, plus le flux extrait est faible. Ceci n'a pas d'effet négatif. En effet, il est possible et intéressant de modifier de quelques degrés la T° du terrain à la baisse en augmentant la récupération de chaleur lors des premiers hivers, afin de maximiser par la suite le ΔT moyen annuel entre l'air extérieur et le terrain et donc la quantité de chaleur valorisée.
Climat (variation de 20%)	<u>Majeur</u> (facteur 4.7 entre valeur basse et valeur haute)	<u>Très important</u> (facteur 2.2 entre valeur basse et valeur haute)	Plus le climat est chaud, plus le flux extrait est important. Le réchauffement climatique devrait donc augmenter le potentiel, puisqu'il maximisera le delta entre la T° du terrain et la T° de l'air ambiant (déphasage du terrain).
Hc (variation de +400%)	<u>Important</u> (facteur 1.5 entre valeur basse et valeur haute)	<u>Important</u> (facteur 1.5 entre valeur basse et valeur haute)	Plus la vitesse de l'air dans le tunnel est élevée, plus l'échange est important. Le fait de multiplier le Hc par 5 augmente la récupération de chaleur de 50%.
Cadencement (variation de +10%)	<u>Faible</u> (facteur 1.08 entre cadencement prévu ou +10%)	<u>Faible</u> (facteur 1.03 entre cadencement prévu ou +10%)	Plus le cadencement est important, plus on extrait de chaleur, mais l'effet reste faible, voire très faible.
Renouv. d'air (variation de 180%)	<u>Important</u> (facteur 1.4 entre valeur basse et valeur haute)	<u>Pas d'effet</u>	Un renouvellement faible accroît en principe le flux extrait. Le fait de ne pas ventiler mécaniquement le tunnel est en principe favorable du point de vue de la récupération de chaleur. Ceci reste à consolider lors des études de détail.
Conductivité thermique (λ) (variation de 30%)	<u>Négligeable</u>	<u>Négligeable</u>	Pas d'effet significatif de la conductivité thermique dans les plages de variations étudiées.
Capacité thermique (C_p) (variation de 30%)	<u>Négligeable</u>	<u>Négligeable</u>	Pas d'effet significatif de la capacité thermique dans les plages de variations étudiées.

Tableau 3 : résumé des hypothèses et des résultats de l'analyse de sensibilité

4.3. Coût de revient de la chaleur

4.3.1. Preneurs de chaleur

Du fait de la localisation privilégiée du futur métro, les preneurs potentiels de chaleur sont nombreux et l'entier de la chaleur produite pourrait être valorisée pour alimenter en chaleur les bâtiments alentours à travers des PAC. La comparaison des données de consommation et du potentiel de production de chaleur permet de déclarer que l'entier du potentiel identifié pourrait être valorisé, sous réserve des contraintes de passage des conduites et de l'intérêt des propriétaires des bâtiments de s'y raccorder.

Ces éléments, notamment l'intérêt des propriétaires, ne font pas partie de l'étude de faisabilité et trouveront leur place dans les études d'avant-projet et de projet.

Vu l'état d'isolation des bâtiments, une installation d'appoint et de secours devrait être prévue selon qu'il s'agisse de couvrir les besoins énergétiques des bâtiments existants ou de s'intégrer dans un concept global où les géostructures pourront fournir de la chaleur en ruban à des bâtiments, dont la performance énergétique est de préférence équivalente à Minergie-P. C'est typiquement le cas du futur quartier des Plaines-du-Loup.

4.3.2. Coûts d'investissements

Les investissements sont ventilés par phase, selon le développement du projet. Les réinvestissements dans les équipements arrivant en fin de vie, ainsi que la maintenance et le maintien de valeur des équipements sont pris en compte. La durée d'analyse économique est de 45 ans, après laquelle les investissements et les réinvestissements doivent être complètement amortis comptablement. La durée de 45 ans se base sur une période initiale de 5 ans de travaux sans vente de chaleur, puis 40 ans de vente de chaleur, pour se rapprocher de la durée classique d'un contrat de *contracting*.

La Figure 7 illustre à quoi correspondent concrètement les différentes catégories d'investissements qui sont chiffrées séparément dans la Figure 8.

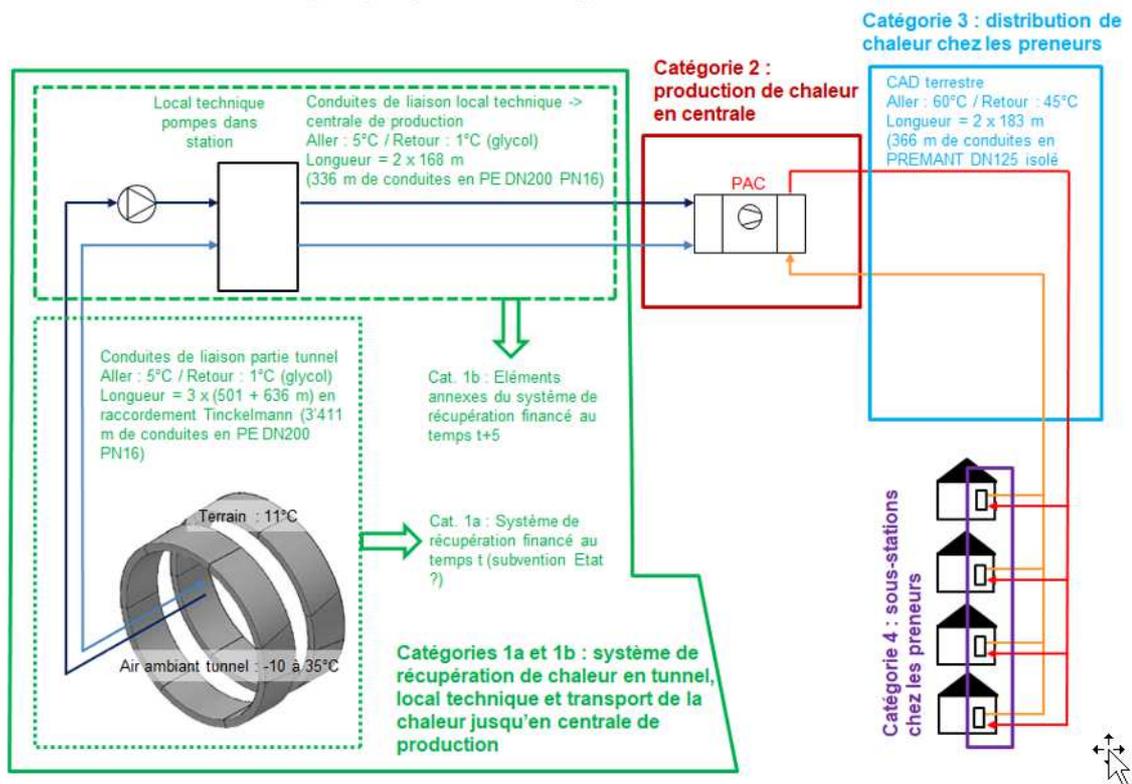


Figure 7 : vue synoptique des catégories d'investissements pour les T2 et T3 cumulés

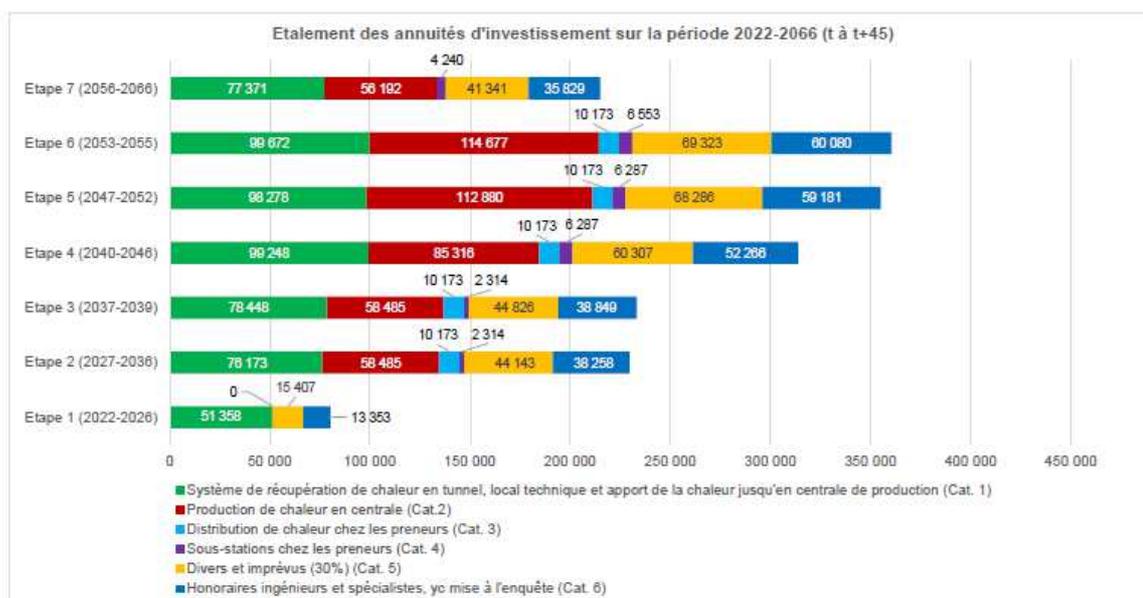


Figure 8 : annuités d'investissements entre 2022 et 2066 pour les tronçons n°2 et 3

i. Surcoûts induits par les contraintes mécaniques supplémentaires

Les coûts mentionnés ci-dessus ne tiennent pas compte des éventuels surcoûts liés au renforcement structurel de l'ouvrage en béton armé en raison de contraintes mécaniques induites par le système de captage de chaleur, à savoir la génération d'efforts ou de déformations complémentaires dans la structure et la modification des propriétés mécaniques des matériaux et du sol. En effet, les variations de température impactent les propriétés des matériaux, en particulier le béton. Les variations de température effectivement subies par le béton du fait du système de récupération de chaleur envisagé, vont générer des déformations qui, si elles sont empêchées par les conditions aux limites, vont créer des contraintes complémentaires.

Les variations cycliques de température imposées au sol ont également un effet sur le comportement thermomécanique de celui-ci, en matière de déformation et résistance au cisaillement. Selon Bertrand et Laloui [1], la réponse mécanique des sols fins soumis à des variations d'humidité, de température et de contraintes est régie par un comportement élasto-plastique complexe. En particulier, les variations de température ont pour effet une contraction ou une dilation du sol, ce qui provoque une variation de son indice des vides et donc un changement de ses propriétés de résistance mécanique. Sous certaines conditions, les déformations irréversibles que subit le matériau peuvent être dommageables pour la stabilité des ouvrages supportés par le sol.

On notera toutefois que les propriétés relatives à la résistance et aux déformations indiquées par la norme SIA 262 pour les ouvrages en béton armé sont valables dans une plage de température comprise entre -40 °C et $+100\text{ °C}$. Les méthodes de calcul usuelles sont donc applicables. Les calculs et le dimensionnement conventionnels des ouvrages en béton armé sont réalisés selon des conditions similaires aux contraintes thermiques observées dans le cadre d'une géostructure énergétique. La gamme de température rapportée dans le cas des géostructures énergétiques correspond à celle usuellement considérée pour des ouvrages en béton armé exposés aux intempéries et ce, aussi bien pour le cas sans extraction de chaleur que pour le cas avec extraction.

4.3.3. Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation représentent plus de la moitié du coût de revient de chaleur. L'achat d'énergie représente la part la plus importante de ces coûts. Les hypothèses concernant les prix de l'énergie sont donc déterminantes pour le calcul du prix de revient. A noter toutefois que l'augmentation des prix de l'énergie ne devrait pas influencer l'attractivité des géostructures énergétiques dans la mesure où les autres alternatives s'en trouveraient également affectées. On peut noter par ailleurs que, malgré l'impossibilité de prévoir l'évolution du coût des différents agents énergétiques, il est clair que les énergies fossiles sont sujettes à une volatilité bien plus importante que le coût de l'électricité.

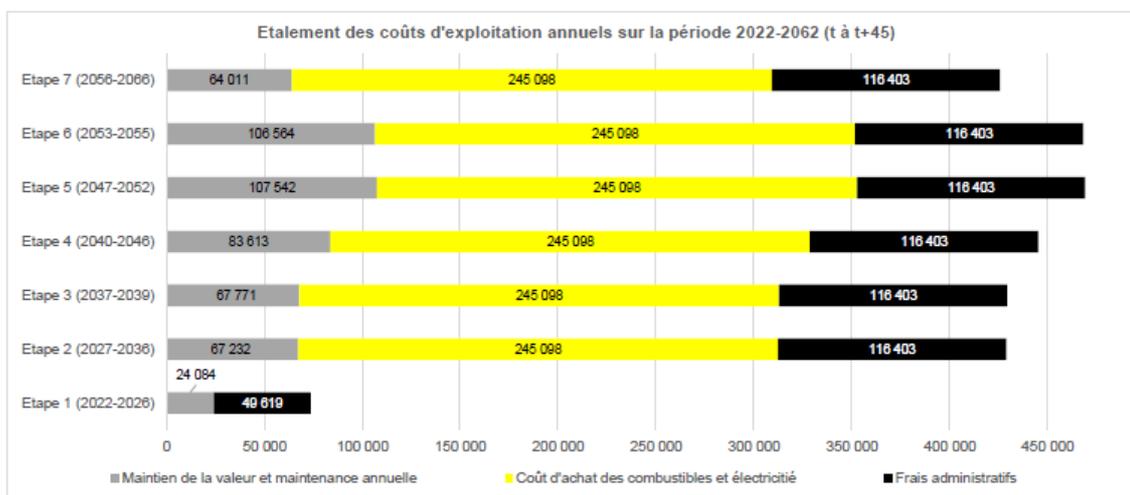


Figure 9 : coûts d'exploitations annuels pour les tronçons n°2 et 3 entre 2022-2066

4.3.4. Coût de revient de la chaleur

Le coût de revient de la chaleur se situe à un niveau comparable aux alternatives envisageables en milieu urbain, compte tenu de son caractère majoritairement, voire exclusivement renouvelable. A noter toutefois que les calculs économiques sont, à ce stade de l'étude, très conservateurs. Il existe plusieurs possibilités pour améliorer la compétitivité du coût de revient de la chaleur produite. A ce titre, une variante spécifique a été notamment analysée. Elle consiste à mobiliser l'ensemble du potentiel des tronçons 2 et 3 au profil du projet des Plaines-du-Loup en planification à proximité du tracé de métro.

Tronçon	Longueur (m)	Puissance récupérable (W/m)	Puissance récupérable (W/m²)	Puissance chaude PAC (kW) moyenne/pointe	Energie froide (MWh/an)	Energie chaude (MWh/an)	Ratio Energie chaude/m équipé (MWh/an/m)	Coût de revient (CHF/kWh)
T1	600	170	9.7	153/293	894	1'341	2.24	0.28
T2	636	228	13.5	218/429	1'271	1'905	3.00	0.25
T3	501	239	15.8	180/353	1'049	1'573	3.14	0.25
T4	697	103	6.3	108/209	629	944	1.35	0.37
T2+T3	1'137	467	29.3	398/762	2'320	3'480	3.06	0.21

Tableau 4 : potentiel de récupération de chaleur et coût de revient de la chaleur fournie aux consommateurs finaux

Le coût de revient de la chaleur produite dans chaque tronçon suit le même ordre d'intérêt que le potentiel de production. Les tronçons les plus intéressants, à savoir les 2 et 3, offrent un coût de revient de 25 ct./kWh ; le tronçon 1 suit avec un coût de revient de 28 ct./kWh. Enfin, le 4^{ème} tronçon est le plus défavorable avec 37 ct./kWh. L'ordre d'intérêt des différents tronçons était forcément attendu étant donné sa corrélation au potentiel de chaleur. La mutualisation des deux tronçons 2 et 3 au profil du quartier de Plaines-du-Loup représente un intérêt certain, avec un coût de revient estimé à 21 ct./kWh.

4.4. Modalités d'exploitation de l'infrastructure énergétique

Comme indiqué précédemment dans la Figure 7, l'infrastructure peut être décomposée en quatre parties :

- Le système de captage de chaleur intégré aux parois du tunnel et les conduites de transport de la chaleur le long du tunnel jusqu'au local technique situé dans le tunnel (Catégorie 1a, financée au temps t) ;
- Le local technique et le transport de la chaleur du local technique jusqu'à la centrale de production (Catégorie 1b, financée au temps t+5) ;
- La centrale de production de chaleur (Catégorie 2, financée au temps t+5) ;

- Le réseau de distribution de chaleur (CAD, Catégorie 3, financée au temps t+5) ;
- Les sous-stations chez les clients (Catégorie 4, financée au temps t+5).

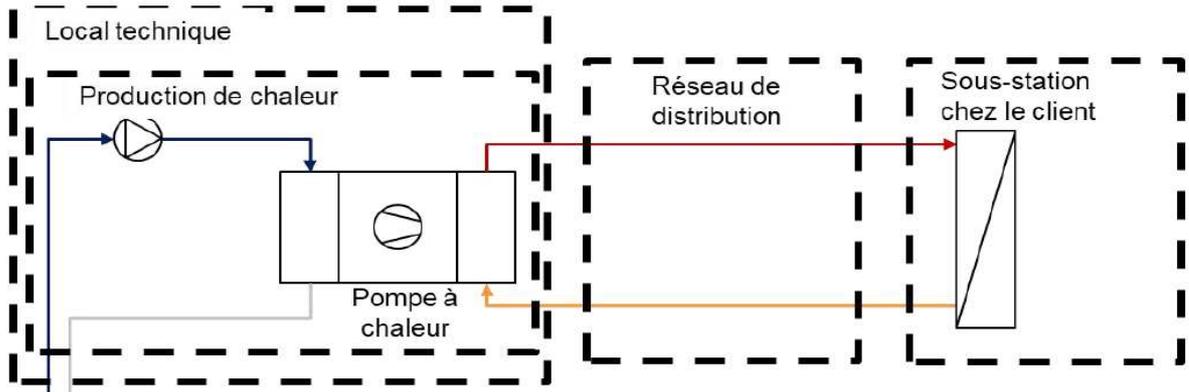
Ces différentes composantes peuvent faire l'objet de diverses prestations, à savoir la conception des systèmes de captage et de distribution de chaleur, leur réalisation, leur exploitation, voire leur financement. Toutefois, il existe des limites à prendre en compte. En vertu du principe juridique de l'accession, les parties intégrantes d'un immeuble (tunnel dans le cas présent) ne peuvent en principe pas faire l'objet d'un droit de propriété distinct de celui qui porte sur l'immeuble. Ainsi, les échangeurs de chaleur incorporés aux parois du tunnel ne peuvent être la propriété que de celui qui est aussi propriétaire du tunnel.

Les conduites de transport de chaleur des échangeurs jusqu'au local technique et le local technique situés intégralement dans le volume des infrastructures propriétés des tl doivent donc être considérés comme faisant partie intégrante du reste de l'immeuble et sont donc réputés propriété des tl.

Les tl n'étant pas un fournisseur d'énergie, l'organisation la plus réaliste pour ce type de projet consiste à associer, à travers une servitude, un opérateur tiers pour l'exploitation du système de captage de chaleur incorporé aux parois du tunnel.

Eléments	Propriétaire	Concessionnaire	Lien contractuel entre le propriétaire et l'exploitant
Echangeurs de chaleurs dans les parois et conduites de transport de la chaleur dans le tunnel (Catégorie 1a)	tl	tl	-
	tl	Tiers	L'exploitant paie une redevance annuelle pour la mise à disposition de la récupération et/ou une location
	Tiers	Tiers	Le tiers rachète au tl l'infrastructure de récupération de chaleur. Cette variante n'est pas envisageable sur le plan juridique.
Local technique et transport de la chaleur du local technique jusqu'à la centrale de production (Catégorie 1b)	tl	Tiers	L'exploitant paie une redevance annuelle pour la mise à disposition de la récupération et/ou une location
	Tiers	Tiers	Si les deux « tiers » sont identiques, rien si deux sociétés distinctes : contrat de prestation spécifique.
Pompe à chaleur et accessoires pour la production de chaleur (Catégorie 2)	tl	Tiers	Contrat de vente/achat de chaleur produite par la valorisation de la chaleur du tunnel. Peu cohérent si la centrale de production est prévue en dehors de l'enceinte du tunnel.
	Tiers	Tiers	Si les deux sociétés sont distinctes, il faudrait prévoir un contrat de prestations spécifique.
Réseau de distribution (Catégorie 3)	Tiers	Tiers	Si les deux sociétés sont distinctes, il faudrait prévoir un contrat de prestations spécifique.
Sous-stations chez les clients (Catégorie 4)	Tiers	Tiers	Contrat de fourniture de chaleur.

Tableau 5 : variantes organisationnelles/contractuelles



L'opérateur énergétique, au bénéfice d'une servitude, prendra en charge les investissements dans l'infrastructure de production d'énergie, ainsi que la distribution et la fourniture aux clients finaux de la chaleur produite (cf. Figure 7). Les questions d'investissements, d'entretien et d'exploitation du système de captage (circuit de récupération dans les parois selon Figure 7), de même que celles en relation avec la sécurité et, de manière générale, les responsabilités des différents partenaires sont des éléments essentiellement commerciaux qu'il s'agira d'aborder dans les discussions précontractuelles entre les tl et l'opérateur.

La servitude de conduite est une forme particulière de droit de superficie qui permet à son titulaire d'être propriétaire d'une conduite se trouvant sur le fonds d'autrui. Si les parties se mettent d'accord sur les modalités de la servitude, elles concluront un contrat constitutif de la servitude de conduite qui doit revêtir la forme écrite (70 al. 2 ORF). La servitude n'a pas besoin d'être inscrite au registre foncier, mais peut l'être.

5. Discussion

Tout au long de l'année, la chaleur nécessaire aux preneurs est extraite directement de l'air ambiant du tunnel. Lorsque l'air ambiant ne suffit pas à fournir la chaleur nécessaire pour couvrir les besoins en hiver, le terrain, utilisé comme système de stockage saisonnier de la chaleur dégagée par les rames de métro durant la période estivale, fournit l'énergie complémentaire. Dès que les conditions climatiques sont plus clémentes, l'énergie contenue dans l'air ambiant dépasse les besoins des preneurs. L'énergie excédentaire est injectée dans le terrain afin de le recharger en chaleur permettant ainsi de démarrer un nouveau cycle de décharge l'hiver suivant, puisqu'il y a une égalité entre la chaleur prélevée du terrain en hiver et celle qui est rechargée en été. Il s'agit là d'une limite imposée au modèle dans le but de ne pas altérer la stabilité thermique du terrain sur le long terme et d'assurer sa régénération en vue de la pérennité du système de production de chaleur. Rien n'empêche toutefois de déroger à ce principe ponctuellement afin d'optimiser le fonctionnement du système tout en assurant sa pérennité.

Les résultats montrent que l'infrastructure du métro permettrait de fournir suffisamment de chaleur pour couvrir les besoins de plusieurs bâtiments en surface sans créer de perturbations aux terrains alentours. Estimé à 5.8 GWh, ce potentiel reste à consolider. En effet, compte tenu des nombreuses variables prises en compte et les hypothèses les concernant, il y a lieu de valider ce potentiel en phase d'avant-projet à travers notamment des simulations numériques 3D et une consolidation de certaines hypothèses.

L'analyse de sensibilité menée sur les différentes variables impactant les résultats montre que la température initiale du terrain semble jouer un rôle majeur dans les résultats obtenus. Puisque le terrain n'apporte sur un intervalle annuel aucune chaleur au système de récupération (la totalité de la chaleur valorisée provient exclusivement de l'air ambiant, le terrain ne jouant que le rôle de stockage saisonnier), le flux extrait dépend donc très fortement du différentiel de température moyen annuel entre la température extérieure et la température du terrain. Cet effet est maximisé par le fait que l'air du tunnel provenant de l'extérieur est réchauffé par les déperditions thermiques des rames. Ce résultat montre qu'il pourrait être intéressant de modifier la température d'équilibre du terrain, afin de la ramener à des valeurs proches de 9°C. Ceci permettrait, comme indiqué plus haut, de maximiser l'échange de chaleur entre l'air ambiant et le système de récupération.

La température extérieure semble jouer aussi un rôle majeur dans les résultats obtenus. En effet, prise isolément, c'est-à-dire en fixant toutes les autres variables à leurs valeurs de base, une variation de 20% de la température extérieure fait varier la puissance du flux extrait par m² de voûte équipée d'un facteur de 4.7, soit une variation de 370%. L'augmentation de la température extérieure augmente le ΔT moyen annuel avec la température initiale du terrain, puisque la valeur de base est de 11°C annuel. Ce ΔT moyen annuel accroît donc l'échange moyen annuel de chaleur entre l'air extérieur et le système de récupération de chaleur. On peut faire l'hypothèse que le phénomène de réchauffement climatique agira davantage sur le climat de l'air extérieur en augmentant sa température moyenne annuelle que sur la température moyenne du terrain. En effet, le terrain déphase et atténue l'onde de chaleur et devrait par conséquent être affecté dans une moindre mesure par l'élévation de la température moyenne annuelle de l'air extérieur. Par conséquent, on peut estimer que le réchauffement climatique pourrait augmenter le potentiel de récupération de chaleur par l'augmentation moyenne de la température annuelle extérieure conjugué à un effet très mesuré sur la température du terrain.

Le facteur de convection Hc joue également un rôle non négligeable sur le potentiel énergétique des géostructures. Une variation de 400% du facteur Hc fait varier la puissance du flux extrait par m² de voûte équipée d'un facteur 1.5, soit une variation de 50%. Le facteur Hc augmente avec la vitesse de l'air. L'augmentation du facteur Hc favorise les échanges de chaleur entre l'air du tunnel et le béton du

soutènement dans lequel sont disposés les tubes du système de récupération de chaleur. L'effet du facteur H_c conjugué à la variabilité des autres variables est identique si on le compare à l'effet de la variable H_c seule. Il convient de considérer l'impact avec le fait que les 50% d'impact sont obtenus en faisant varier de 400% les valeurs. L'effet est donc important dans l'absolu, mais faible si l'on considère l'effet relatif de la variable H_c .

Les autres variables, à savoir le facteur de cadencement, la conductivité thermique et la capacité thermique du sol semblent, d'après les analyses effectuées, jouer un rôle mineur sur le potentiel énergétique des géostructures. S'agissant enfin du taux de renouvellement d'air, une variation de 180% de celui-ci ferait varier la puissance du flux extrait par m^2 de voûte équipée d'un facteur 1.4, soit une variation de 40%. Ce qui n'est de loin pas négligeable. A ce titre, on peut noter que le m3 ne sera pas, a priori, ventilé mécaniquement, ce qui est donc favorable à un fort potentiel de récupération de chaleur.

6. Conclusions et perspectives

La récupération de chaleur constitue un gisement significatif à l'échelle des quartiers habités aux alentours des stations du futur métro m3. Sa valorisation permettrait de produire environ 5.8 GWh/an de chaleur, permettant d'alimenter l'équivalent de 1'000 logements répondant au standard Minergie.

La variante consistant à mobiliser le potentiel des tronçons 2 et 3, entre les stations de Casernes et Plaines-du-Loup, au profil du futur quartier des Plaines-du-Loup, est la voie à privilégier à plusieurs égards. D'abord, la valorisation de la chaleur basse enthalpie se prête mieux aux bâtiments à basse consommation d'énergie et répondant à des standards de haute performance énergétique. Par ailleurs, l'intégration des géostructures au concept global d'approvisionnement du quartier permettrait d'éviter de prévoir un système complémentaire pour répondre aux pics de consommation liés aux températures élevées de distribution de chaleur, généralement nettement plus hautes pour les bâtiments existants qui sont, en général, mal isolés.

La mutualisation du gisement des deux tronçons a un impact positif sur le coût de revient de la chaleur produite. Ce coût, calculé sur la base d'hypothèses conservatrices, pourrait être davantage optimisé en tenant compte de facteurs négligés ou conservateurs à dessein dans la présente étude.

Sur la base de la présente étude, il est clairement recommandé au maître de l'ouvrage de poursuivre les études en vue d'intégrer les géostructures énergétiques et d'impliquer au plus tôt un opérateur énergétique, si possible dès la phase d'avant-projet. Ces études doivent permettre, d'une part, de valider ou consolider les hypothèses considérées dans la présente étude et, d'autre part, de mieux caractériser les contraintes mécaniques de la structure porteuse à l'aide d'une simulation thermomécanique et d'en tenir compte dans le dimensionnement de l'ouvrage souterrain et le calcul des surcoûts éventuellement engendrés.

Pour pouvoir intégrer des géostructures énergétiques au projet d'ouvrages souterrains, il faut tenir compte des exigences normatives relatives à la sécurité structurale et à l'aptitude au service des ouvrages. De plus, il faut tenir compte des effets des géostructures énergétiques (variations de température, d'humidité et de contraintes/déformations) sur la structure porteuse, sur les propriétés et la portance du sol de fondation (cf. ch. 4.2.2.i du rapport). Enfin, pour les ouvrages ferroviaires dont les projets seront soumis à l'approbation des plans par l'OFT, il faudra soumettre le projet à un expert indépendant pour examen (cf. Directive OFT Organismes de contrôle indépendants Chemins de fer). Si nécessaire, un autre expert, spécialiste en ce domaine, devra également examiner les effets des géostructures énergétiques sur les structures porteuses et sur le sol de fondation.

Enfin, deux défis se présenteront pour la concrétisation du projet. D'une part, il s'agira de déterminer si ce projet énergétique peut être prêt à temps pour être intégré à la construction du métro m3, dont les plans définitifs seront soumis ces prochains mois pour approbation à l'Office fédéral des transports, l'autorité qui délivre les permis de construire dans le domaine ferroviaire. De l'autre, il faudra trouver un opérateur intéressé à exploiter une telle infrastructure.

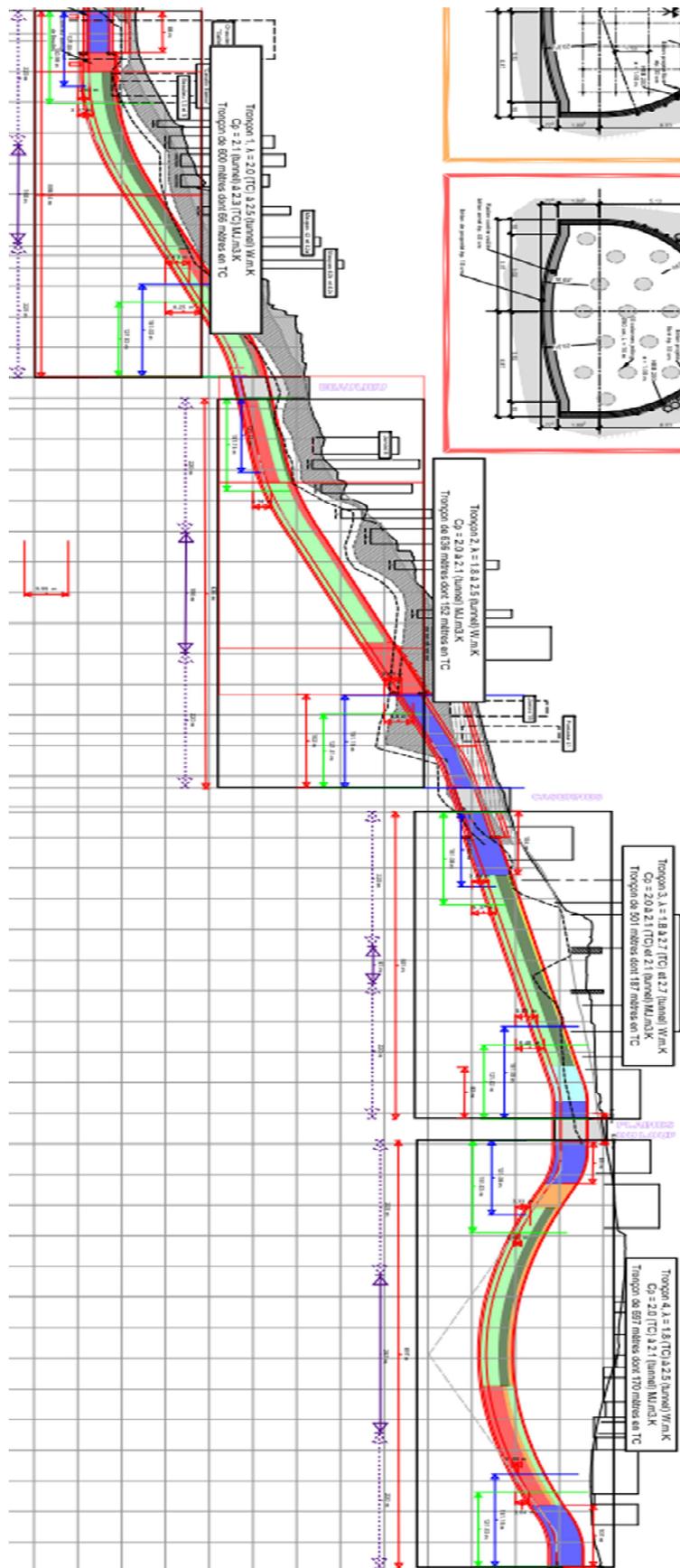
Liste des symboles et abréviations, y compris ceux utilisés dans les annexes

U :	Coefficient de transfert de chaleur en W/m ² K
A :	Surface d'échange rapportée aux m de tunnel [m ² /m]
ΔT :	Différence de température entre les deux côtés de la paroi [°C]
C _{onv}	Résistance de convection [W/m ² K]
C _{ond}	Résistance de conduction [W/m ² K]
hc	Coefficient de convection air-infrastructure [W/m ² K] (intradoss du tunnel)
λ ₁	Coefficient de conduction de l'infrastructure [W/mK]
m _{air}	Débit massique d'air neuf rapporté à 1 m de tunnel [kg/ms]
C _{pair}	Chaleur spécifique de l'air [J/kgK]
Φ _{trains}	Chaleur émise par les trains en W/m
X _{utilisation}	Taux d'équipement de récupération du tunnel en %
Φ _{a,r}	Flux thermique vers le terrain pour la partie avec récupération de chaleur [W/m]
R _a	Rayon du tunnel [m]
t _r	Taux de renouvellement d'air en h ⁻¹
T _{a,neuf}	Température de l'air extérieur en °C
Φ _{a,terr non équipé}	Flux du terrain vers l'air (R _a à R _r), pour la partie non-équipée du terrain [W/m]
T _{dim}	Température de dimensionnement
T _{ecs}	Température à partir de laquelle il n'y a qu'une production d'eau chaude sanitaire (ECS) ; le ratio entre ?
Φ _{a,r}	Flux à travers la partie intérieure
Φ _{r,1}	Flux de l'équipement de récupération jusqu'au premier nœud extérieur
λ	Conductivité thermique
C _p	Capacité thermique
PAC	Pompe à chaleur
T _{r passive}	Température du circuit de captage sans échange de chaleur
COP	Coefficient de performance
DGMR	Direction générale de la mobilité et des routes
DGE	Direction générale de l'environnement

Références

- [1] F. Bertrand et L. Laloui, ***Thermo-plasticity of fine-grained soils at various saturation states application to nuclear waste disposal***, THÈSE NO 4188, EPFL. 14.11 2008
- [2] B.Cousin, A. F. Rotta Loria,*, A. Bourget, F. Rognon, L. Laloui ; ***Energy performance and economic feasibility of energy segmental linings for subway tunnels*** ; Tunnelling and Underground Space Technology n° 91, 2019
- [3] M. Peltier, A. F. Rotta Loria, L. Lepage, E. Garin, L. Laloui ; ***Numerical investigation of the convection heat transfer driven by airflows in underground tunnels*** ; Applied Thermal Engineering n° 159, 2019

Annexe n°1 : Profil en long du tunnel



Annexe n°2 : modèle de calcul des échanges de chaleur, données et hypothèses

I. Modèle de la partie intérieure du tunnel

Pour la partie intérieure, l'équation du flux dans l'élément d'infrastructure qui se trouve en contact avec l'air du tunnel d'un côté et en contact avec l'équipement de récupération de chaleur de l'autre côté, est la suivante :

$$\Phi = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_r \cdot (T_{a,eq} - T_r) \left[\frac{W}{m} \right]$$

On considère que pour des Δt et Δx suffisamment petits, l'équation pour un flux stationnaire peut être utilisée. Le flux à travers une paroi circulaire est déterminé par l'équation suivante :

- U : coefficient de transfert de chaleur en W/m^2K
- A : surface d'échange rapportée aux m de tunnel [m^2/m]
- ΔT : différence de température entre les deux côtés de la paroi [$^{\circ}C$]
- T_r : température de l'équipement de récupération [$^{\circ}C$]
- $T_{a,eq}$: température d'équilibre de l'air dans le tunnel [$^{\circ}C$]

En considérant à la fois des échanges par convection à l'interface air-infrastructure et par conduction à travers l'infrastructure, le coefficient U s'écrit :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{Conv} + \frac{1}{Cond}} = \frac{1}{\frac{1}{h_c \cdot \frac{R_a}{R_r}} + \frac{R_r \cdot \ln \frac{R_r}{R_a}}{\lambda_1}} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

- $Conv$ et $Cond$ les résistances respectivement de convection et de conduction [W/m^2K]
- h_c : coefficient de convection air-infrastructure [W/m^2K] (intradors du tunnel)
- λ_1 : coefficient de conduction de l'infrastructure [W/mK]

$$\Phi_{a,r} = \frac{\pi}{\frac{1}{h_c \cdot 2 \cdot R_a} + \frac{\ln \frac{R_r}{R_a}}{2 \cdot \lambda_1}} \cdot (T_{a,eq} - T_r) \left[\frac{W}{m} \right]$$

La température de l'équipement de récupération T_r est fixée selon le scénario de récupération, il s'agit de la condition limite côté extérieur. Et la température de l'air du tunnel, qui représente une condition limite du côté intérieur, est déterminée sur la base des échanges thermiques liés au renouvellement d'air, aux apports de chaleur dus au déplacement des rames de métro, ainsi que l'échange de chaleur avec le terrain. Pour ce dernier, seule la partie équipée en échangeurs de chaleur est considérée.

a. Température d'équilibre de l'air

L'équipement du tunnel d'échangeurs de chaleur ne doit pas induire de perturbations thermiques du terrain à long terme. Ainsi, dans les calculs, l'énergie soutirée au terrain doit être égale à l'énergie apportée en recharge en moyenne annuelle. Compte tenu du fait que la modélisation optimise l'extraction de chaleur de telle manière que l'énergie soutirée au terrain soit égale à l'énergie apportée en recharge, la quantité d'énergie valorisable dépend uniquement de la quantité de chaleur qui peut être extraite de l'air ambiant du tunnel, dont la caractéristique physique déterminante est la température de l'air ambiant.

A noter que par rapport à la littérature [1], cette hypothèse peut clairement être retenue comme étant très conservatrice s'agissant du calcul de l'énergie pouvant être soutirée à travers la géostructure énergétique.

On extrait la température d'équilibre de l'équation de conservation de l'énergie :

$$m_{air} \cdot C_{p_{air}} \cdot \Delta T_{air} + \Phi_{trains} - x_{utilisation} \cdot \Phi_{a,r} = 0$$

- m_{air} : débit massique d'air neuf rapporté à 1m de tunnel [kg/ms]
- $C_{p_{air}}$: chaleur spécifique de l'air [J/kgK]
- Φ_{trains} : chaleur émise par les trains en W/m
- $X_{utilisation}$: taux d'équipement de récupération du tunnel en %
- $\Phi_{a,r}$: flux thermique vers le terrain pour la partie avec récupération de chaleur [W/m]

La température d'équilibre $T_{a,eq}$ est ainsi :

$$T_{a,eq} = \frac{\Phi_{trains} - x_{utilisation} \cdot \Phi_{a,r}}{C_{p_{air}} \cdot \rho_{air} \cdot \frac{\pi \cdot R_a^2 \cdot tr}{3600}} + T_{a,neuf} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

- R_a : rayon du tunnel [m]
- t_r : taux de renouvellement d'air en h-1
- $T_{a,neuf}$: température de l'air extérieur en $^\circ\text{C}$

Le calcul de la température d'équilibre de l'air se base sur le flux vers le terrain. Or, le calcul du flux vers le terrain se base sur la température d'équilibre du terrain. Ainsi, le calcul de la température d'équilibre se base sur les flux avec le terrain au temps t-1.

Le calcul de la température d'équilibre de l'air doit toutefois tenir compte de la partie du tunnel qui n'est équipée en échangeurs de chaleur et qui va échanger de manière passive avec le terrain, et donc influence la température d'équilibre de l'air.

Ainsi, la température d'équilibre globale, $T_{a,eq,global}$ est la suivante :

$$T_{a,eq,global} = \frac{\Phi_{trains} - x_{utilisation} \cdot \Phi_{a,r} - (1 - x_{utilisation}) \cdot \Phi_{a,terr \text{ non équipé}}}{C_{p_{air}} \cdot \rho_{air} \cdot \frac{\pi \cdot R_a^2 \cdot tr}{3600}} + T_{a,neuf} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

- $1 - X_{utilisation}$: partie non équipée du sous-tronçon
- $\Phi_{a,terr \text{ non équipé}}$: flux du terrain vers l'air (R_a à R_r), pour la partie non-équipée du terrain [W/m]

b. Chaleur dégagée par les trains

Les pertes thermiques ci-dessous sont prises en comptes dans le calcul de la chaleur dégagée à l'intérieur du tunnel en raison du déplacement des trains et l'exploitation du métro :

- Les pertes thermiques de la chaîne de traction ;
- Les rejets de chaleur liés au freinage des trains ;
- Déperditions de chaleur dues à la climatisation, au fonctionnement des auxiliaires électriques, au frottement des pneus sur le rail et à l'aérodynamisme des trains.

Pour caractériser ces déperditions, un certain nombre d'informations et d'hypothèses a dû être recueilli, concernant notamment :

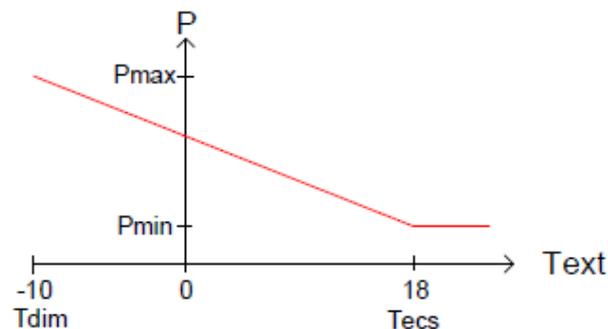
- Les données générales du matériel et les modalités d'exploitation du tunnel ;
- La géométrie du profil en long ;
- Le matériel roulant (dimensions, poids, vitesse maximale) ;
- Le rendement récupération au freinage ;
- Le nombre de passagers ;
- La vitesse d'accélération, de décélération et de croisière ;
- Le cadencement des rames dynamique, heure par heure et jour par jour.

c. Température de récupération

La température de récupération est déterminante à la fois pour la puissance récupérable et pour la recharge. La récupération devra respecter les contraintes suivantes :

- Adéquation entre récupération et besoins de chaleur ;
- Equilibre des flux dans le terrain ;
- Pas d'apport d'énergie par le système de récupération.

On peut représenter les besoins de chaleur par une courbe de chauffe classique telle qu'illustrée à la figure ci-dessous



Principe de courbe de chauffe

- T_{dim} : température de dimensionnement ;
- T_{ecs} : température à partir de laquelle il n'y a qu'une production d'eau chaude sanitaire (ECS) ;
- Le ratio entre P_{max} et P_{min} est estimé à 7 ;
- La courbe de chauffe est traduite en ΔT_{pr} entre la température théorique passive $T_{rpassive}$ à l'emplacement de l'équipement de récupération (à $t-1$) et la température de récupération T_r .

$$\Delta T_{pr} = T_{rpassive,t-1} - T_{r,t} = a \cdot T_{ext} + b \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$a = \frac{\Delta T_{pr \max} - \Delta T_{pr \min}}{T_{ecs} - T_{dim}} \quad \text{et} \quad \Delta T_{pr \min} = \frac{\Delta T_{pr \max}}{k}$$

$$b = \Delta T_{pr \max} + a \cdot (0 - T_{dim})$$

- $\Delta T_{pr \max}$ est une valeur d'ajustement déterminée itérativement pour tendre à l'équilibre des flux dans le terrain ;

- La valeur k est fixée de manière que le ratio entre P_{max} et P_{min} soit de 7 environ. Pour cela, k est fixé de manière empirique à 11 ;

Les valeurs T_{ecs} , T_{dim} et k constituent le scénario de récupération, à savoir la forme de la courbe de puissance demandée par d'éventuels preneurs de chaleur.

d. Température passive théorique

La température théorique passive $T_{rpassive}$ à l'emplacement de l'équipement de récupération intervient dans le calcul de la température de récupération et représente la température au nœud X_r en l'absence de soutirage d'énergie. Dans cette condition, il y a égalité entre les flux $\Phi_{a,r}$ et $\Phi_{r,1}$ décrits précédemment. On peut écrire :

$$U_{a,r} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_r \cdot (T_{a,eq} - T_{rpassive}) = U_{r,1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot (T_{rpassive} - T_1) \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$T_{rpassive} = \frac{U_{a,r} \cdot R_r \cdot T_{a,eq} + U_{r,1} \cdot R_1 \cdot T_1}{U_{a,r} \cdot R_r + U_{r,1} \cdot R_1} \text{ [}^\circ\text{C]}]$$

II. Modèle de la partie externe au tunnel

Pour la partie extérieure, on ne considère que de la conduction et du stockage. Le flux $\Phi_{i-1,i}$, i (entre X_{i-1} et X_i , rapporté à 1m de tunnel), au temps t , est déterminé, comme vu précédemment, par l'équation suivante :

$$\Phi_{i-1,i} = U_{i-1,i} \cdot 2 \cdot \pi \cdot R_i \cdot (T_{i-1} - T_i) \left[\frac{W}{m} \right]$$

Comme pour la partie intérieure, on considère que pour des Δt et Δx suffisamment petits, l'équation pour un flux stationnaire peut être utilisée.

Dans ce cas, le coefficient U pour de la conduction dans un domaine circulaire s'écrit :

$$U_{i-1,i} = \frac{\lambda_i}{R_i \cdot \ln \frac{R_i}{R_{i-1}}} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$\Phi_{i-1,i} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i \cdot (T_{i-1} - T_i)}{\ln \frac{R_i}{R_{i-1}}} \left[\frac{W}{m} \right]$$

La variation de température du nœud X_i au temps t est déterminée par l'équation :

$$\Delta T_{i,t} = \frac{\Delta \Phi_{i,t-1} \cdot \Delta t}{m_i \cdot C p_i} \text{ [K]}$$

Avec la masse de l'anneau i par m de tronçon suivant (interfaces à l'équidistance entre $i-1$ et i ainsi qu'entre i et $i+1$) :

$$m_i = \rho_i \cdot \pi \cdot \left(\left(\frac{R_{i+1} + R_i}{2} \right)^2 - \left(\frac{R_i + R_{i-1}}{2} \right)^2 \right) \left[\frac{Kg}{m} \right]$$

La différence de flux sur l'anneau i est :

$$\Delta\Phi_{i,t-1} = \Phi_{i-1,i,t-1} - \Phi_{i,i+1,t-1} \left[\frac{W}{m} \right]$$

- La température de l'équipement de récupération T_r est fixée selon le scénario de récupération, il s'agit de la condition limite côté intérieur ;
- La température du terrain est fixée en limite à 11°C, c'est la condition limite côté extérieur ;
- Les températures du terrain sont initialisées avec une valeur fixée à 11°C.

III. Bilan de l'énergie soutirée

Le flux de chaleur soutiré par l'équipement de récupération est calculé comme suit :

$$\Phi_r = \Phi_{a,r} - \Phi_{r,1} \left[\frac{W}{m} \right]$$

$\Phi_{a,r}$: le flux à travers la partie intérieure

$\Phi_{r,1}$: le flux de l'équipement de récupération jusqu'au premier nœud extérieur (cf. Figure 3)

Le bilan annuel d'un sous-tronçon est réduit à une puissance récupérée par mètres de tunnel en fonction du mois de l'année. Les résultats finaux des sous-tronçons sont regroupés en réalisant une somme pondérée de chaque sous-tronçon par les longueurs respectives des sous-tronçons. Les résultats pour un tronçon sont ainsi une série de puissances récupérables selon les mois de l'année. Ces puissances moyennes peuvent être rapportées à un m de tronçon (W/m), ou bien à une unité de surface de l'intrados équipé (W/m²).

IV. Plages de variation des variables de calcul du potentiel de récupération de chaleur

Variable	Valeur basse	Valeur de base	Valeur haute
<i>Température initiale moyenne du terrain autour du système de récupération.</i>	9.5°C (valeur SIA)	11°C	12°C
<i>Climat</i>	Année 2010, T° annuelle moyenne 10.45°C	Fichier SIA 2028, T° annuelle moyenne 11.19°C	Année 2018, T° annuelle moyenne 12.57°C.
<i>Convection de l'air (Hc)</i>	15 W/m ² /K	75 W/m ² /K (pour le ST6 du T2)	
<i>Cadencement des rames des trains</i>	Non applicable	Cadencement selon hypothèses de projet	Cadencement selon §5.1 +10%
<i>Taux de renouvellement d'air dans le tunnel</i>	4h ⁻¹	9h ⁻¹	14h ⁻¹ .
<i>Conductivité thermique du terrain autour du système de récupération</i>	2.0 W/m.K	2.3 W/m.K (pour le ST6 du T2)	2.6 W/m.K
<i>Capacité thermique du terrain autour du système de récupération.</i>	2.1 MJm ³ .K	2.4 MJ.m ³ .K	

V. Valeur selon SIA 384/6 des conductivités et capacités thermiques prises en compte le long du tracé du fut métro m3

Tronçon d'étude	Géologie attendue	Correspondance admise avec la norme SIA 384/6	Conductivité thermique estimée selon la norme SIA 384/6 (λ)	Capacité thermique estimée selon la norme SIA 384/6 (ρc)	Kilométrage selon Annexe 1
Tronçon 1 : station	Dépôts glaciolacustres, limon argileux par endroit, peu sableux et humide	Argile saturé d'eau à sable saturé d'eau	2.0 W/(m.K)	2.3 MJ/(m3.K)	995.891 à 1051.878
Tronçon 1 : tranchée couverte					1051.878 à 1125.00
Tronçon 1 : tunnel	Molasse marneuse	Molasse d'eau douce inferieure, pélite	2.4 W/(m.K)	2.1 W/(m.K)	1125.00 à 1250.00
Tronçon 1 : tunnel	Molasse marneuse et gréseuse	Molasse d'eau douce inferieure, pélite et grès fin	2.5 W/(m.K)	2.1 MJ/(m3.K)	1250.00 à 2080.067
Tronçon 2 : station					1250.00 à 2080.067
Tronçon 2 : tunnel					1250.00 à 2080.067
Tronçon 2 : tunnel	Moraine limono graveleuse compacte	Moraine compacte	1.8 W/(m.K)	2.0 W/(m.K)	2080.067 à 2165.067
Tronçon 2 : tranchée couverte	Dépôts glaciolacustres, sablo-graveleux parfois limomeux, très humides	Sable saturé	2.3 W/(m.K)	2.4 W/(m.K)	2165.067 à 2318.596
Tronçon 3 : station					2318.596 à 2358.396
Tronçon 3 : tranchée couverte	Moraine limono graveleuse compacte	Moraine compacte	1.8 W/(m.K)	2.0 W/(m.K)	2358.396 à 2462.182
Tronçon 3 : tunnel	Molasse gréseuse	Molasse d'eau douce inferieure, grès fin à moyen	2.7 W/(m.K)	2.1 MJ/(m3.K)	2462.182 à 2775.000
Tronçon 3 : tranchée couverte					2775.00 à 2831.451
Tronçon 3 : tranchée couverte	Moraine limono graveleuse compacte	Moraine compacte	1.8 W/(m.K)	2.0 W/(m.K)	2831.451 à 2859.451
Tronçon 4 : station					2859.451 à 2893.451
Tronçon 4 : tranchée couverte					2893.451 à 2965.451
Tronçon 4 : tunnel	Molasse marneuse et gréseuse	Molasse d'eau douce inferieure, pélite et grès fin	2.5 W/(m.K)	2.1 MJ/(m3.K)	2965.451 à 3005.451
Tronçon 4 : tunnel					3005.451 à 3488.451
Tronçon 4 : tranchée couverte	Moraine limono graveleuse et sédiments glaciolacustres et colluvions	Moraine compacte	1.8 W/(m.K)	2.0 MJ/(m3.K)	3488.461 à 3589.451
Tronçon 4 : station					3589.451 à 3623.451

VI. Calcul des déperditions des rames de métro

Ce chapitre indique les données de base ayant servi aux calculs énergétiques liés aux déperditions de chaleur des rames en mouvement. Lorsque les données ne sont pas disponibles, des hypothèses sont faites sur la base de l'expérience.

A. Longueurs inter-stations

Définies dans le profil en long de l'annexe 1.

Sources : plans fournis par la DGMR

B. Caractéristiques du matériel roulant

Les caractéristiques du matériel roulant qui sera utilisé sur la ligne du m3 sont décrites sur la base des informations fournies par le fabricant des rames du m2 actuel, le fabricant des rames du m3 futur étant inconnu à ce stade.

a. Données (Source : données fournis par le maître d'ouvrage du métro (DGMR) :

- Roulement pneu sur roue métallique ;
- 2 voitures par rame, masse en charge nominale (4 pers/m₂) 70.9 tonnes ;
- Longueur totale d'une rame 30.68 m ;
- Déperditions liées au fonctionnement des auxiliaires par train : 12.6 kW en 72 V (DC).

b. Hypothèses Source : estimation CSD INGENIEURS. :

- Rendement système de traction 80% ;
- Rendement moyen de récupération d'énergie au freinage : 30%, considérant qu'une partie du freinage ne peut pas être récupérée.

C. Déperditions de chaleur dues à l'accélération et au freinage des trains

a. Hypothèses basées sur les données du métro m2 déjà en fonctionnement depuis une quinzaine d'années :

- Vitesse maximale 56 km/h, accélération 1.0 m.s⁻², décélération 0.8 m.s⁻² ;
- Les accélérations et décélération sont considérées constantes quel que soit la pente du tracé, ce qui signifie un démarrage en côte nécessitera davantage d'énergie pour obtenir la même accélération de 1.0 m.s⁻² par rapport à la situation en terrain plat : ceci augmente donc la déperdition de chaleur par le système de traction. A l'inverse, il y aura moins de traction requise en cas de descente après un démarrage et ainsi moins de déperditions de chaleur ;
- Un freinage en côte sera facilité par la gravité : la déperdition de chaleur sera donc moindre pour assurer une décélération de 0.8 m.s⁻². A l'inverse, un freinage en descente génèrera bien plus de déperditions de chaleur, puisqu'il faudra vaincre l'énergie potentielle due à la différence de niveau ;
- Sur la base des indications précédentes, l'accélération se produit sur une longueur fixe de 121 m. (15.6 secondes) tandis que le freinage est réalisé sur une distance de 151 m. (19.4 secondes). Les inter-stations de l'opération n°2 sont toutes supérieures à 272 m., ce qui signifie que le train atteint la vitesse max. dans tous les cas. La longueur de l'inter-station influe donc uniquement sur la durée pendant laquelle le train reste à la vitesse max de 56 km/h.

D. Déperditions de chaleur dues à la climatisation, au fonctionnement des auxiliaires électriques, aux frottements des pneus sur le rail et à l'aérodynamisme des trains.

a. Données (source : DGMR, études internes) :

- Déperditions liées au fonctionnement des auxiliaires électriques = 12.6 kW, source DGMR ;
- Surface d'attaque frontale d'un métro (pour le calcul des pertes aérauliques) = 8.5 m² (mesure sur plan de l'opération n°1), source : Profil en alignement droit – Station Lausanne Gare Ouest (Plan M-SY00-33-0000-SYM-PG-001) ;
Déperditions liées aux pertes de frottement du pneu sur le rail = Cr (Coefficient de résistance au roulement, sans unité) = 0.0042.

b. Hypothèses :

- Déperditions calculées à la vitesse moyenne de 28 km/h dans les secteurs d'accélération et de freinage ;
- Déperditions liées à la climatisation = 80W par passager = 15.8 kW ;

- Déperditions liées aux pertes aérauliques (aérodynamisme des trains) = $C_x = 0.3$ (valeur de C_x pour un train de marchandise), source : estimations de CSD Ingénieurs SA ;
- Cadencement des trains : les hypothèses de cadencement sont à prendre avec précaution. En effet, il ne s'agit que d'hypothèses que l'on peut considérer comme conservatoires, les horaires du m3 ne sont pas connus aujourd'hui : seule une cadence maximum à 3 min aux heures de pointe à l'orée 2030 est prévue. Ces horaires hypothétiques sont donc basés sur cette cadence à 3 min. aux heures de pointe et pour le reste des plages horaires, sur des fluctuations journalières inspirées des cadences du m2 actuel permettant de proposer des horaires de m3 fictifs.

VII. **Autres données utilisées pour les calculs des échanges de chaleur**

- Climat : selon fichier SIA 2028. Les données de la station de Pully sont utilisées ;
- Taux de renouvellement de l'air : 9 h-1 ;
- Température initiale du terrain = 11°C ;
- Hc dans les entrées de tunnel = 75 W/m²/K (estimation selon Laloui et al., 2019) ;
- Hc dans les longueurs développées entre les entrées et sorties des tunnels = (estimation selon Laloui et al., 2019) = 25 W/m²/K ;

VIII. **Données utilisées pour le calcul des investissements**

- Taux d'intérêt : 1.75, source SIL ;
- Durée d'amortissement moyenne, à savoir la moyenne pondérée des durées de vie de chaque élément et de leurs coûts associés : 45 ans ;
- Taux applicable pour la maintenance des installations : 0 à 1.5 % selon les éléments. Source SIL ;
- Imprévus : 30% ;
- Coûts ingénieurs, y compris BMA 15% + 5% ;
- Frais administratifs annuels de commercialisation et de gestion : 2.5% ;
- Prix de l'électricité : Coût du kWh = 0.183 CHF (coût SIL) ;
- COPa PAC = 3.0 ;
- Les investissements sont échelonnés selon la planification de réalisation du projet de métro avec comme objectif, la fourniture de chaleur au moment de l'inauguration du métro.