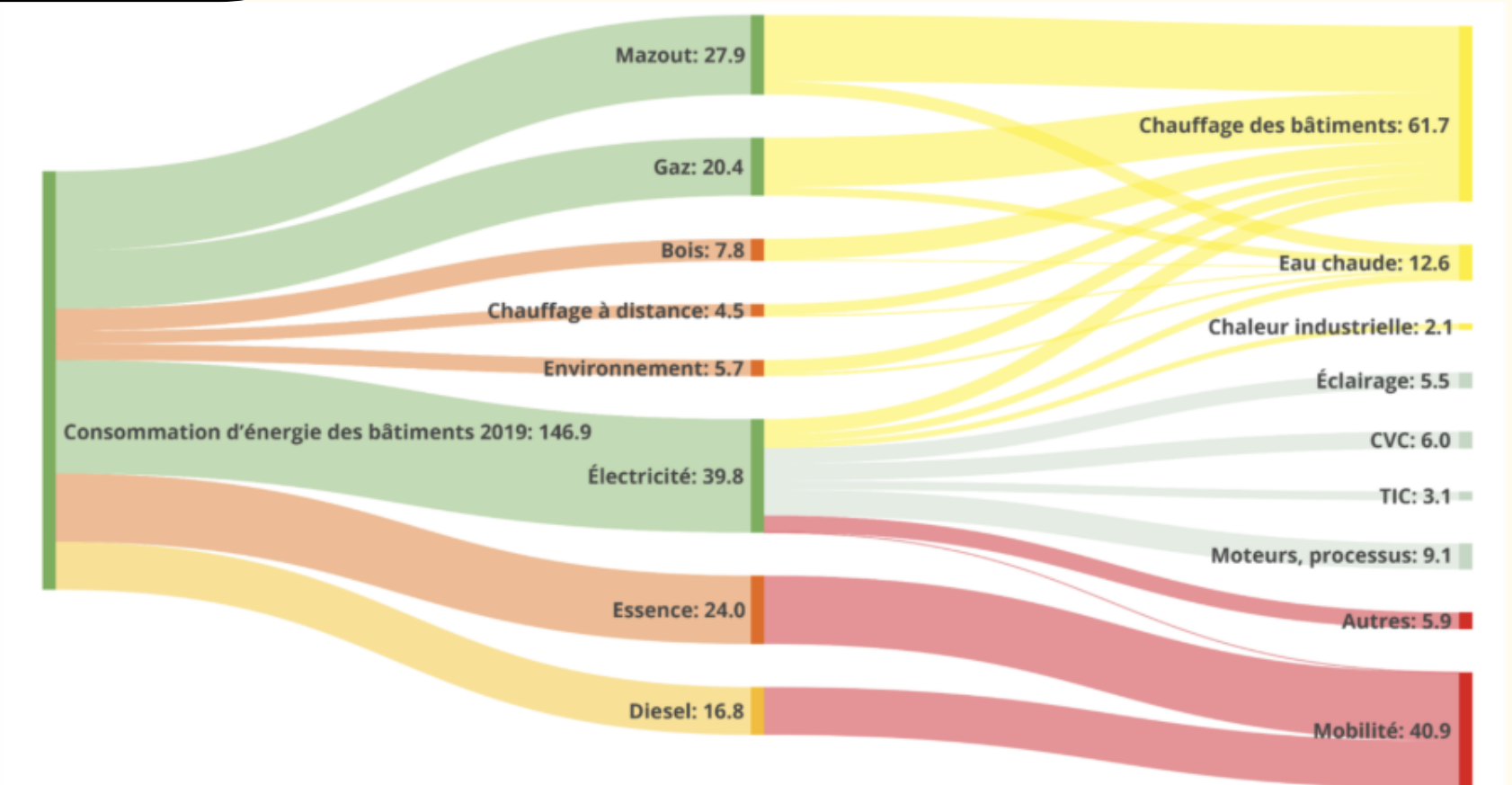




1.Introduction

- Les **bâtiments** constituent aujourd'hui l'un des principaux postes de **consommation d'énergie** et d'émissions de gaz à effet de serre. En Suisse, ils représentent **40% de la consommation nationale**,^[9] dont **42% consacrés au chauffage**.



Consommation d'énergie des bâtiments en fonction de l'utilisation et des agents énergétiques. Etat en 2019 (TWh) [Analyse de la consommation d'énergie suisse 2000-2019 par type d'utilisation, OFEN, 30.10.2020.]

- Face à ces enjeux, la **transition** vers des systèmes thermiques **plus efficaces** et moins polluants devient essentielle. Dans cette logique, la **récupération de chaleur** issue d'infrastructures existantes offre une piste prometteuse.
- Les **tunnels de métro** produisent en continu de la **chaleur** liée au déplacement des trains, au flux d'air et à la présence de nombreux passagers.
- Cette étude analyse le **potentiel** de cette ressource, sa **rentabilité**, sa **durabilité**, son **acceptation** sociale et **compare** cette solution à la géothermie profonde.

3.Aspects économiques

I - Estimation des coûts

Les coûts varient selon la longueur de l'installation. L'estimation présentée ici est réalisée pour une longueur de tunnel comprise entre **0,5 et 2 km**.

Les investissements (**CapEx**) varie selon le mode d'intégration du système dans le métro:

Connexion au bâtiment:

- travaux pour relier la chaleur récupérée au bâtiment
- conduites, tranchées et interface hydraulique.

Pompe à chaleur :

- Achat et installation de la pompe à chaleur

Installation en construction neuve

15%

~1.2 - 2.5 MCHF

25%

60%

Installation retrofit

8%

~1.8 - 4.0 MCHF

27%

65%

Système de récupération

- échangeurs thermiques et tuyauterie dans le tunnel
- installation pour capter la chaleur du métro.

Les coûts d'opérations annuel (**OpEx**) (~30'000 -100'000 CHF/an) comprennent:

- la maintenance des infrastructures
- les coûts d'électricité liés au fonctionnement des pompes à chaleur

Dans le meilleur des cas l'**amortissement** simple serait d'environ 20 ans en Suisse. Si l'on considère le cas actualisé le projet ne devient pas rentable selon nos hypothèses.

II - Aspect sociétal

Acceptabilité social: L'installation n'affecte pas le confort des usagers. Elle ne génère pas de nuisance sonores et s'intègre discrètement dans l'environnement de la station.

Investissements et impacts locaux: La récupération de chaleur est particulièrement efficace à proximité des zones bâties à chauffer. Cette valorisation d'une ressource locale renforce l'autonomie énergétique du quartier et constitue un investissement à l'échelle locale.

5.Mise en perspective

	Géothermie profonde (doublet) ^[1]	Métro thermoactif
Puissance d'une installation	3- 26 MW	Une station du projet Grand Paris, 522 kW ^[3]
Température de l'eau exploitable	30 - 90°C	8 - 12°C ^[15]
Durée de vie	30 - 50 ans	50 - 100 ans
Prix d'une installation	5 - 20 M€	1,2 - 4 M€
Profondeur	400 - 2000 m	5 - 50 m
Source de chaleur	Chaleur naturelle du réservoir aquifère	Pertes liées au réseau de métro
Echelle d'utilisation	Grands réseaux de chaleur (grande échelle)	Chauffage avec pompe à chaleur (petite échelle)
Puissance fournie	Très stable	Variable

Les **stations thermoactives** présentent donc l'avantage d'être **plus faciles et rapides** à mettre en place dans les espaces urbains. Cependant, on compare ici **deux technologies** qui répondent au même besoin (chauffage) mais dans des **proportions très différentes**. La puissance du système innovant reste limitée par rapport à un système éprouvé.

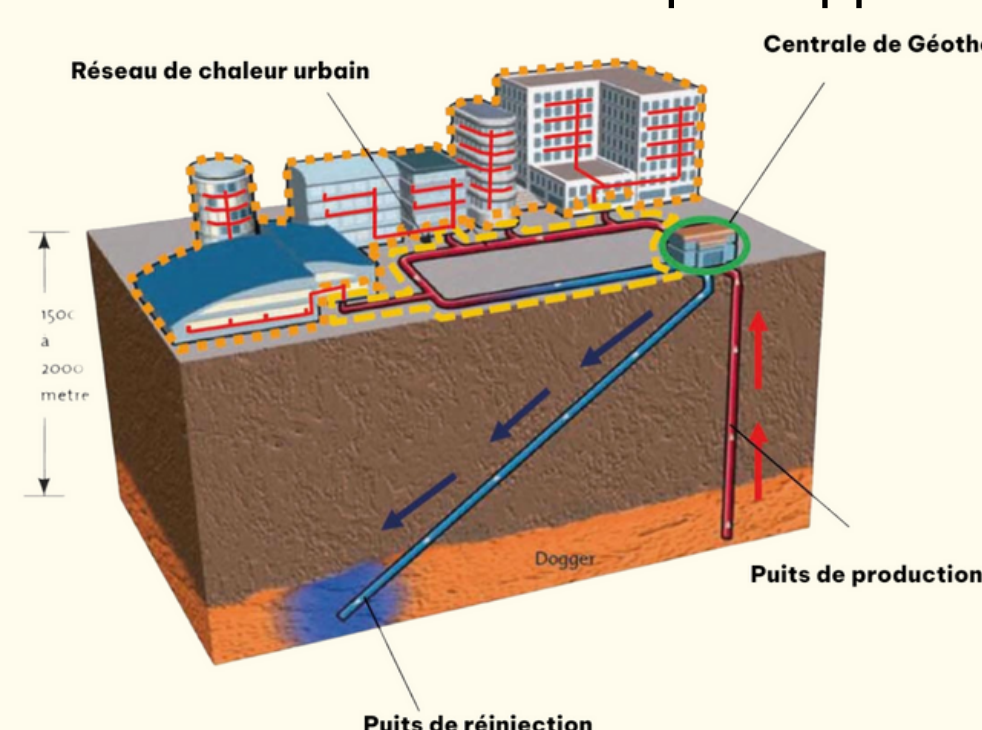


Schéma d'une centrale de géothermie profonde Source : BRGM © Unigéo

VS



Illustration du système de captage réalisée par le Laboratoire de mécanique des sols. © LMS / EPFL 2019

2.Aspects Techniques

Calculs du potentiel

Nous avons effectué une évaluation de la récupération de chaleur d'une station de métro en utilisant les données réelles d'une station équipée **geothermiquement** à Rennes, France.^[15]

La performance dépend fortement :

- de la **surface active** disponible,
- de la **distance au bâtiment**,
- des **pertes du réseau** de distribution.

EROI BRUT FAIBLE

Forte consommation électrique de la PAC

EROI MÉTRO ÉLEVÉ

Mesure clé pour juger la pertinence du système

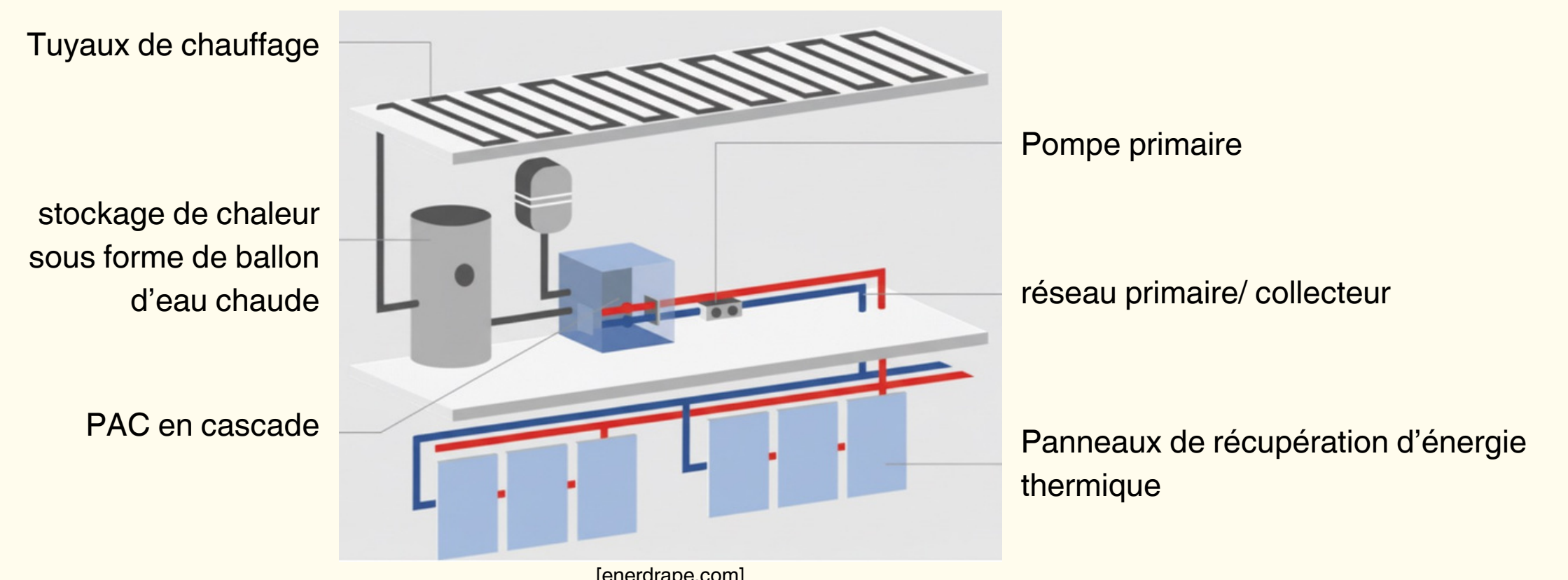
Paramètres	Scenario 1	Scenario 2	Description
Densité de chaleur [W/m²]	25	25	Valeur moyenne de la source [2,3,15]
Surface active [m²]	1545	2926	Proche du bâtiment (1) vs station entière (2)
EROI brut	3	3	Prise en compte de toute l'électricité consommée par la PAC
EROI métro	180	160	Prise en compte de l'énergie propre au système de récupération métro

Pour la vérification de toutes les manipulations et calculs symboliques, veuillez vous référer aux annexes (voir QR code) contenant les étapes de calcul détaillées.

Comment exploiter cette chaleur ?

La solution la plus efficace est d'utiliser un **fluide caloporteur**, comme de l'eau simple ou un mélange eau+glycol (ce qui évite le gel en hiver).

On utilise une pompe pour faire circuler le liquide eau+glycol dans un premier cycle. En connectant avec un deuxième cycle qui contient un **fluide frigorigène**, on crée une **pompe à chaleur (PAC) en cascade**, ce qui augmente nettement le **coefficient de performance (COP)** du système d'extraction de chaleur.



En faisant des calculs théoriques, on pourrait, avec **10m² de panneaux**, réchauffer **350 m² de surface de plancher** (contruits après 2016 en suisse selon les normes SIA).

Il existe déjà une entreprise qui se spécialise dans la conception de panneaux de ce genre : Enerdrappe. Selon eux, et en pratique, **10 m² de panneaux** pourrait réchauffer **100 m² de surface de plancher**.^[4]

4.Durabilité

I - Energie

- Stockage de l'énergie** sous forme de chaleur et pas d'électricité.^[4]
- Energie renouvelable** pour faire fonctionner la pompe à chaleur.

II- Impact environnemental

- Choix du fluide caloporteur (dans les panneaux en sous-sol):**

Non toxique, biodégradable, non corrosif.

L'eau a une grande capacité calorifique mais gèle à 0°C donc ajout de glycol.^[17]

- Choix du fluide frigorigène (dans la pompe à chaleur):**

Bonnes propriétés thermodynamiques, potentiel de réchauffement global (PRG) ≈ 1, potentiel de Déplétion Ozone faible, sécurité.^[13]

- Choix des bâtiments à chauffer et refroidir:**

Pour ne pas déséquilibrer la température du sol : bâtiments publics privilégiés car demande en chauffage et en refroidissement au cours d'une année.^[7]

III - Empreinte carbone

- Cas d'étude: **Ajout d'isolation et d'une pompe à chaleur à un système de chauffage au mazout**:^[3]

Maison de 180 m2, sans étage, et dont on estime pas les pertes de chaleur par le sol. Le CO₂ **non émis par an** est de **13 tonnes** (par comparaison: c'est l'émission moyenne d'un habitant en Suisse), et passe à 97 kg par an.^[A3]

6.Conclusion

- Aujourd'hui, le **captage de chaleur des métros** est une **technologie jeune**, encore loin d'être implémentée à grande échelle.
- Pourtant, cette solution innovante s'inscrit dans une démarche d'**efficacité énergétique**, en focalisant sur la **limitation des pertes énergétique** dans la vie de tous les jours.
- La récupération de chaleur des métros présente des **défis majeurs** qui méritent réflexion :

- Rétrofit** les tunnels avec un système d'échange thermique
- Optimisation des **coûts d'installation**, notamment en cas de retrofit
- Gestion de la **variabilité du potentiel de chaleur** récupérable tout au long de la durée de vie