

Stockage de solaire thermique au Danemark

Retour d'expérience

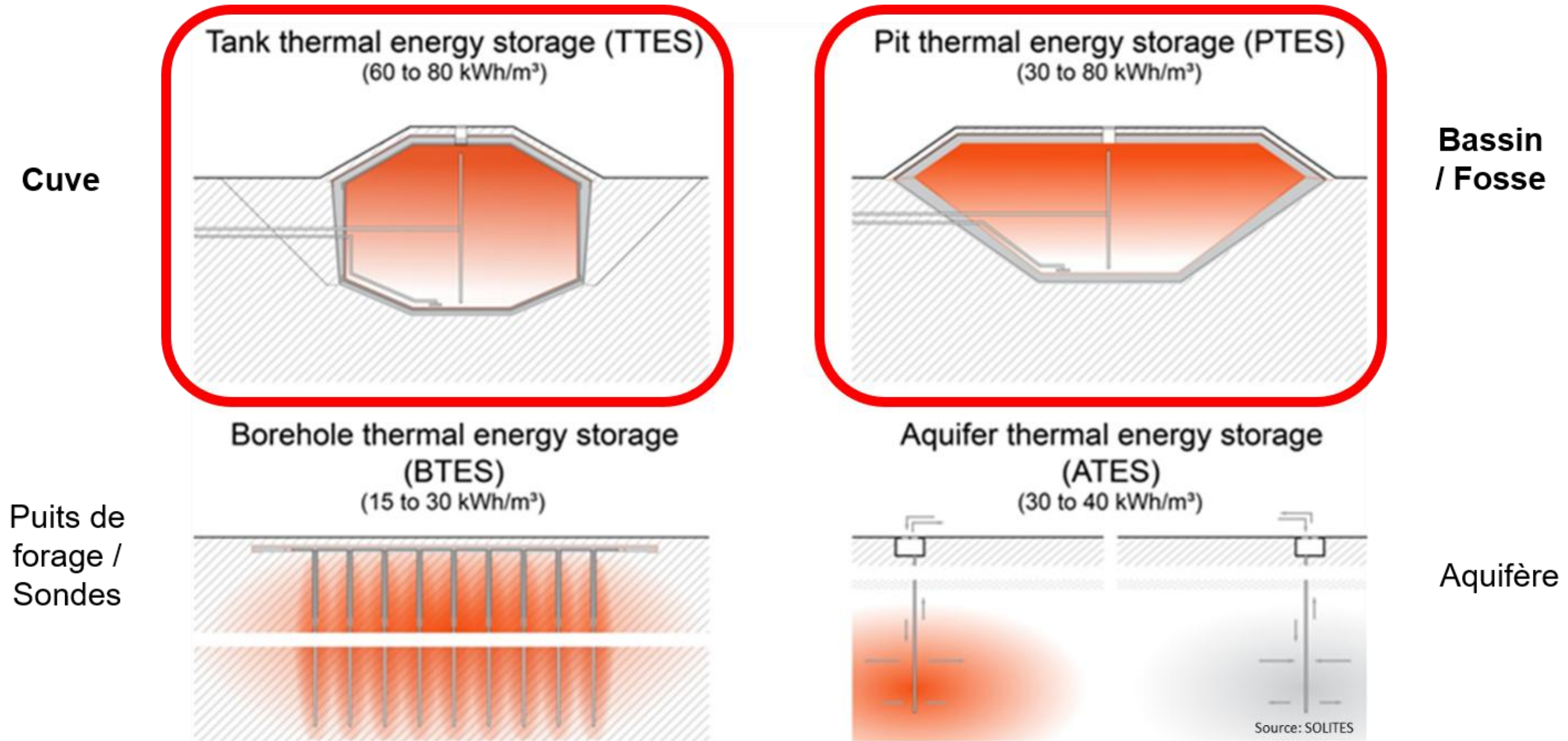
Geoffroy Gauthier

gg@planenergi.dk

Juin 2026

Différents types de stockage journaliers existent

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Un TTES est un thermos géant

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

1. Construire les fondations de la cuve



2. Construire le toit de la cuve*, puis construire de haut en bas, étage par étage



3. Construire les diffuseurs, à chaque étage correspondant



4. Installer l'isolant autour de la cuve et sur le toit une fois la construction de la cuve terminée



* Il est également possible de faire l'inverse, de bas en haut, en commençant par les parois et terminant par le toit

Photos d'un projet de TTES de 4 500 m³ de F.W. Rørteknik au Chili. Voir: <https://www.fw.dk/references/4500-m3-heat-storage-tank-chile/> pour plus d'information

Exemple de TTES journalier : Berlin

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Photo : BEW

- Mise en service : 2023
- Volume : 52'000 m³
- Connection au réseau de Berlin
- Capacité de charge/décharge: 200 MW_{thermique}
- Capacité de stockage : 2'750 MWh
- Diamètre : 43 m
- Hauteur : 38 m
- Pression atmosphérique

Autre exemple de TTES journalier au DK

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



TTES de 6.000 m³ à Slagelse, Danemark (SK Varme)
Photo: Steeltank A/S

Couplage :

- Chaudière biomasse & cogénération
- Incinérateurs déchets & cogénération
- Cogénération gaz (historiquement)

Autres exemples de TTES journaliers : peut être décoré selon les besoins

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



TTES à Karup (Danemark) – 3'600 m³. Photo: Karup district heating



TTES à Detmold (Allemagne) – Stadtwerke Detmold, 1'850 m³



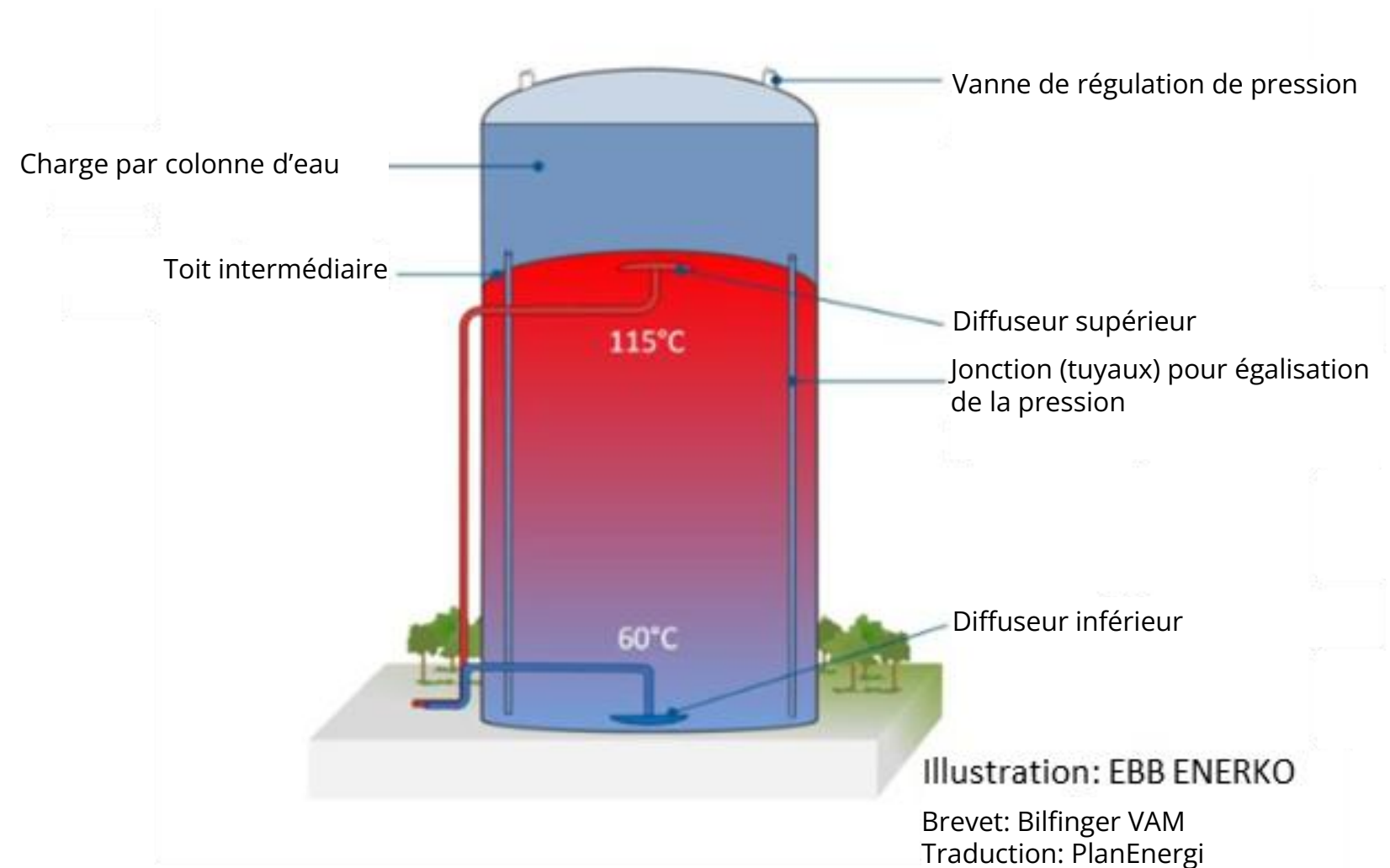
TTES à Brest – éco chaleur de brest, 1'000 m³

Un TTES peut également stocker à plus de 100°C

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



TTES de Stadtwerke Heidelberg (DE)
19'980 m³ (stockage en deux-zones [*])



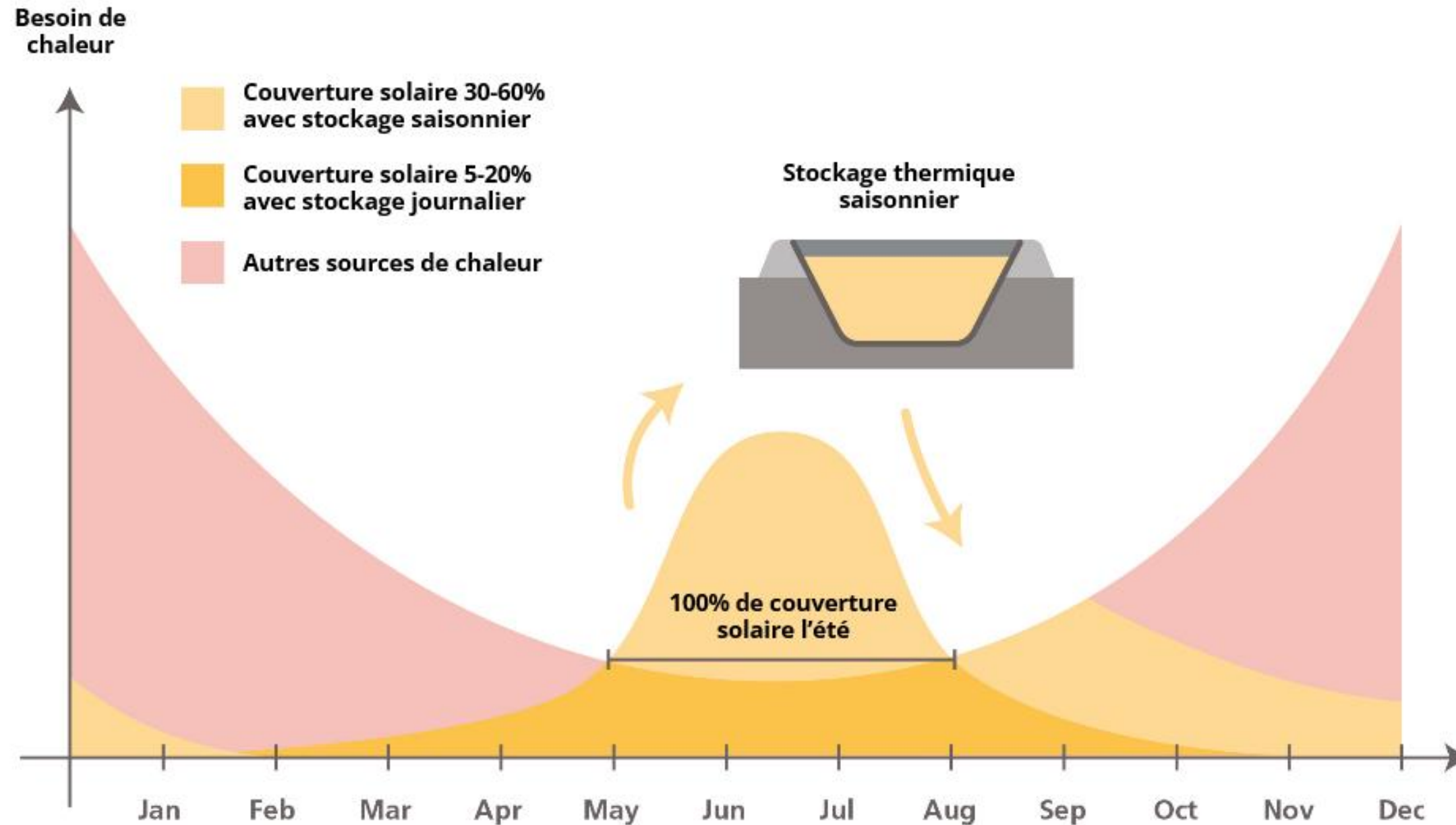
[*] Une cuve en deux-zones est un TTES qui fonctionne à pressions atmosphériques, mais est divisé en deux parties: une partie supérieure utilisée pour augmenter la pression d'une deuxième partie, la zone inférieure, qui agit comme un TTES standard (cf. schéma ci-dessus)

Extrait des livrables de l'IEA-ES Task 39:



Le stockage permet d'améliorer l'équilibre entre production et demande de chaleur

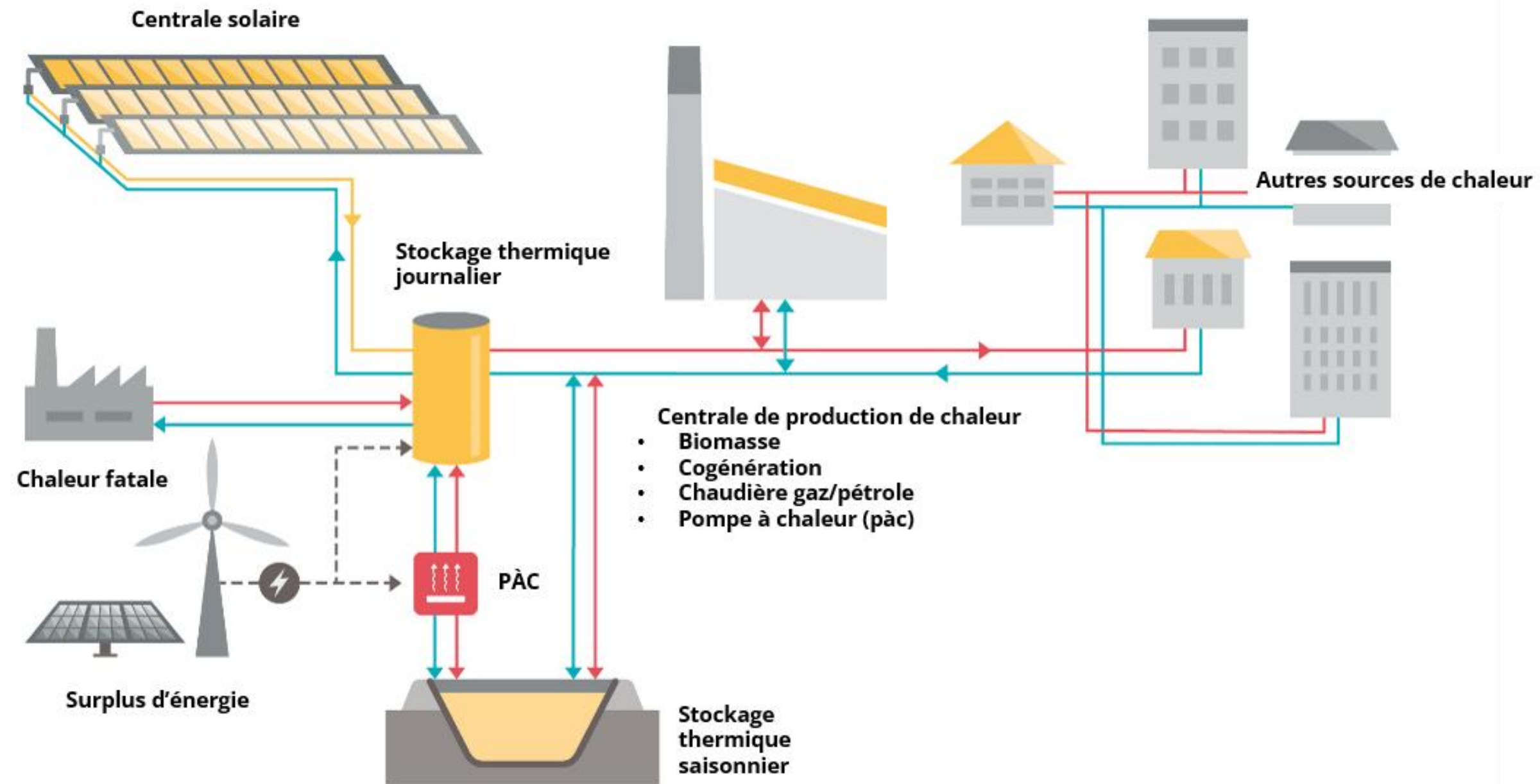
4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



IEA SHC TASK 55

Le stockage permet d'améliorer l'équilibre entre production et demande de chaleur

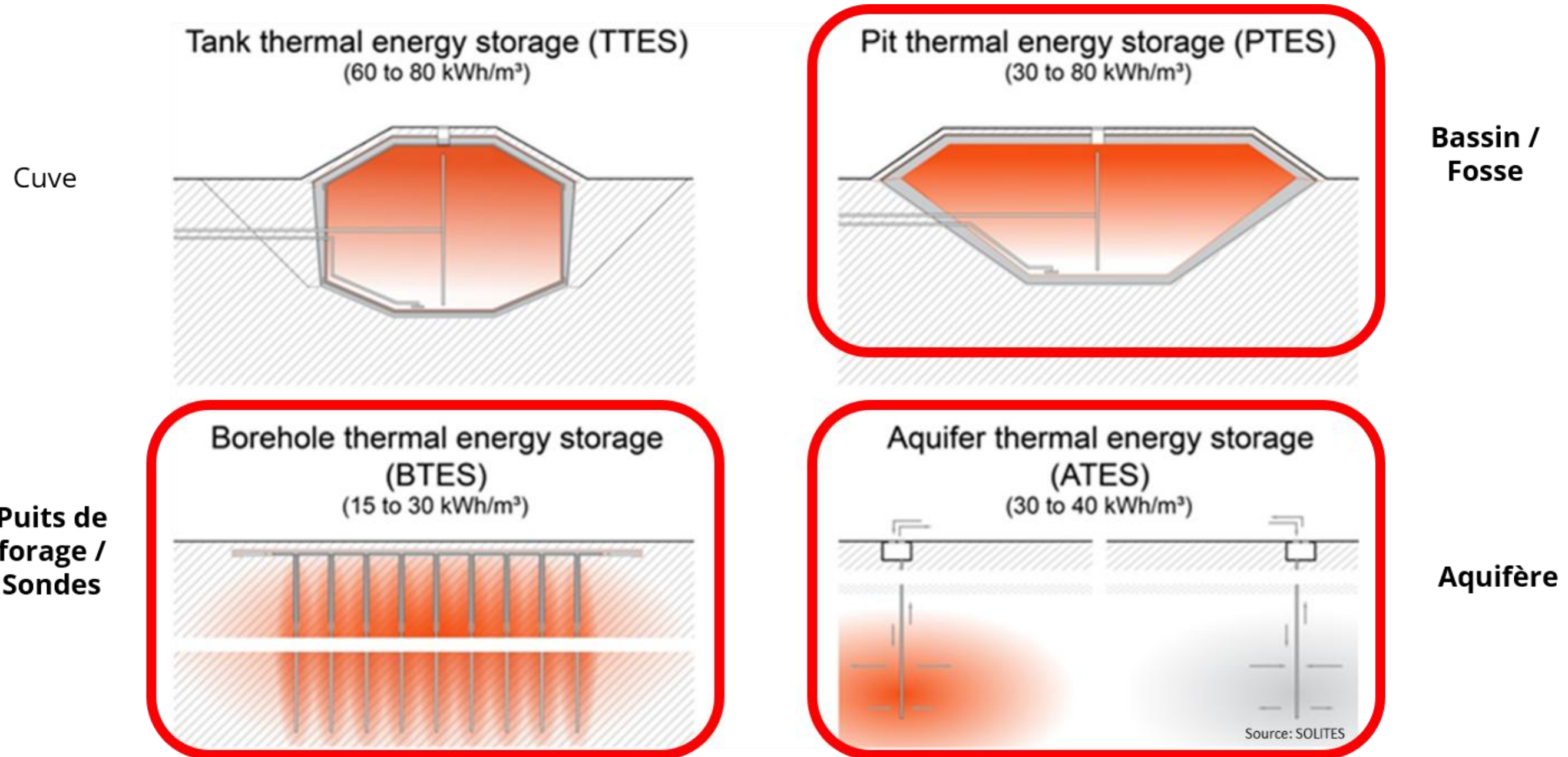
4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



IEA SHC TASK 55

Différents types de stockage saisonniers existent

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



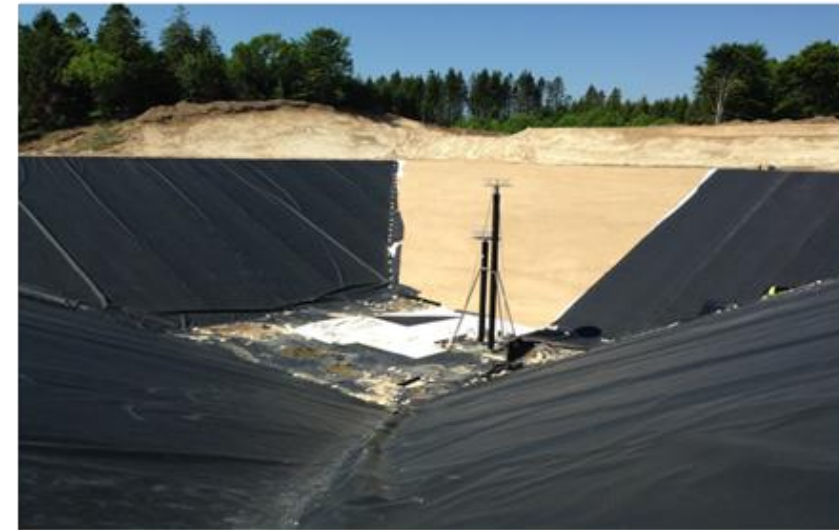
Un PTES est un gigantesque bassin

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

1. **Excaver un bassin et réutiliser la terre pour rehausser les bords.**



2. **Ajouter une bâche étanche au fond et sur les bords du bassin.**



3. **Remplir d'eau.**



4. **Recouvrir d'une couverture flottante et isolante.**



PTES de Dronninglund. Photos : PlanEnergi

Un PTES est un gigantesque bassin

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

1. Excaver un bassin et réutiliser la terre pour rehausser les bords.

Forme et réutilisation du sol

Le PTES peut être conçu de différentes formes, mais la plus simple est une excavation en forme de pyramide tronquée placée à l'envers dans le sol, comme le montre la figure 2. Afin de réduire les coûts de manutention et de transport du sol à leur minimum, l'excavation se fait avec réutilisation du sol, ce qui signifie que le sol excavé de la partie inférieure du PTES est utilisé comme remblais autour de la partie supérieure du PTES. Le volume du stockage thermique nécessaire dépend du système global auquel il est connecté et il est nécessaire de faire des calculs sur l'ensemble du système pour trouver le volume optimal.

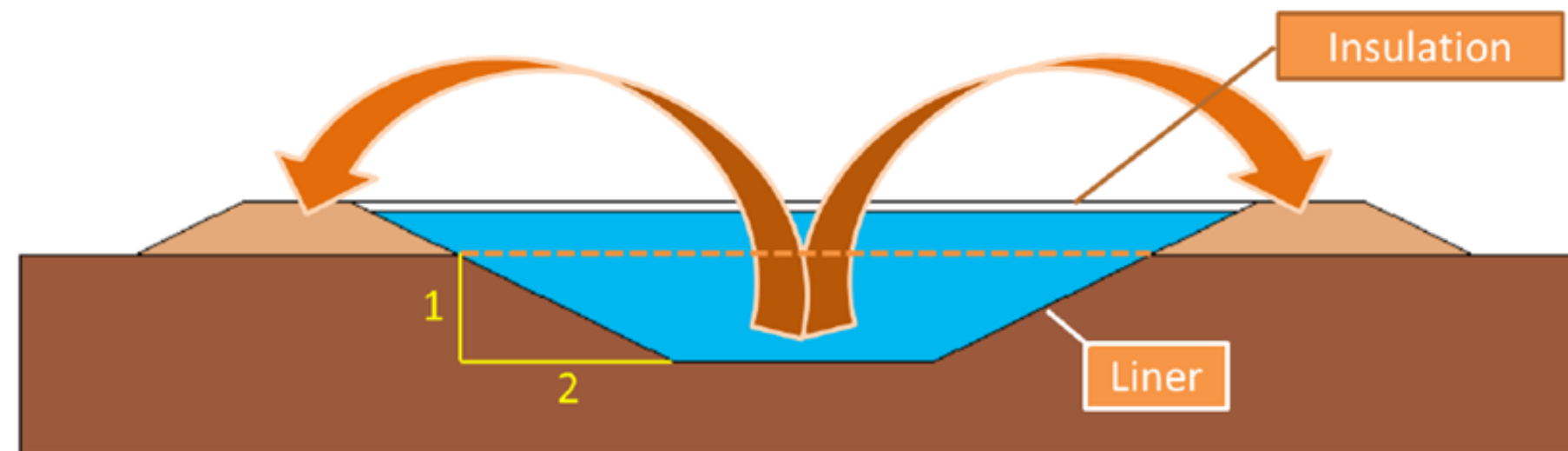


Figure 2. Schéma de principe de PTES, vue en coupe

Exemple de PTES : Dronninglund (2013)

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Capteurs solaires	37 500 m²
PTES (fosse d'eau)	60 000 m³
Capacité charge/décharge	27 MW
Pompe à chaleur air-eau	5,5 MW chaud
Couverture solaire	41%
Appoint	Chaud. huile 10 MW + turbine gaz 3,6 MW + chaud. gaz 11 MW



Photo aérienne de la centrale solaire et du PTES de Dronninglund Fjernvarme - PlanEnergi

Un BTES est un ensemble de puits de forage (sondes)

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

1. Creuser les puits de forage.



2. Insérer et joindre les échangeurs de chaleur.



3. Recouvrir la zone forée d'un matériau isolant puis de terre.



BTES de Brædstrup. Photos : PlanEnergi

Exemple de BTES : Brædstrup (2012)

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Capteurs solaires thermiques **18 600 m²**

BTES (sondes géothermiques) **19 000 m³
de terre**

Cuves de stockage **7 500 m³ (5
500 + 2 000)**

Pompe à chaleur **1,2 MW froid
(électrique)**

Couverture solaire **19%**

Apport PàC air-eau **67%**

Appoint **Turbine à gaz
7,3 MW + PàC
air-eau 5,5 MW**



Photo aérienne de la centrale solaire et du stockage thermique - Brædstrup Fjernvarme



Un ATES utilise un aquifère comme réservoir thermique

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

1. Forer la paire de puits



2. Installer les tubes dans les puits



3. Installer les pompes électriques submersibles



4. Installer les têtes de puits avec unités d'injection



HT-ATES de Middenmeer. Photos : IF Technology

Exemple d'ATES : Middenmeer

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Aquifer Thermal Energy Storage Use Case HT-ATES Middenmeer (NL)

À propos de l'ATES

Technologie: ATES (Milieu de stockage : eau-sable)
Type d'usage : stockage saisonnier de chaleur
Mise en service : 2021
Source primaire de chaleur : géothermie profonde (90°C)
Propriétaire : Ennatuurlijk Aardwarmte

Détails techniques

Volume d'eau : 440'000 m³
Capacité : 28 GWh
Capacité de charge-décharge : 12-10 MW_{th}
1 cycle de charge/décharge par an
Température max. opérationnelle : 90 °C (injection)
Température d'extraction : 85-50 °C

Équipement auxiliaire

L'ATES est relié à 2 échangeurs de chaleur
L'eau est traitée par dosage de CO₂ pour éviter les précipitations de calcite
Les têtes de puits sont anertées à l'azote pour empêcher l'oxygène de rentrer dans les puits
La chaleur est réutilisée directement par la serre (pas de pompe à chaleur)

Un ATES peut s'utiliser comme un stockage de chaleur ou comme une source géothermique

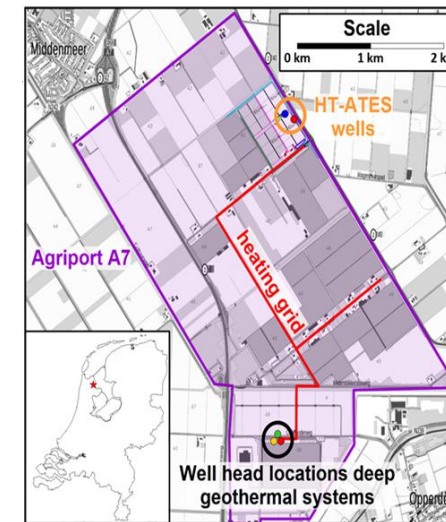


Figure ci-contre: vue de dessus montrant l'emplacement des puits du HT-ATES (points bleus et rouges en haut du croquis) et des puits de géothermie profonde (points jaunes, verts et rouges en bas du croquis) d'ECW, ainsi que l'emplacement de la serre aux Pays-Bas (coin inférieur gauche du croquis), dans la ville Middenmeer

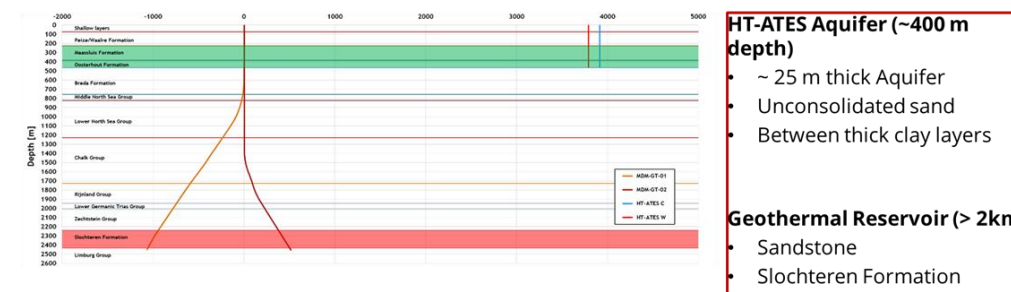


Figure ci-dessous: coupe transversale présentant les puits des HT-ATES (lignes bleues et rouges en haut à droite du croquis) ainsi que les puits géothermiques profonds (lignes orange et rouge à gauche du croquis)

À propos de l'utilisateur

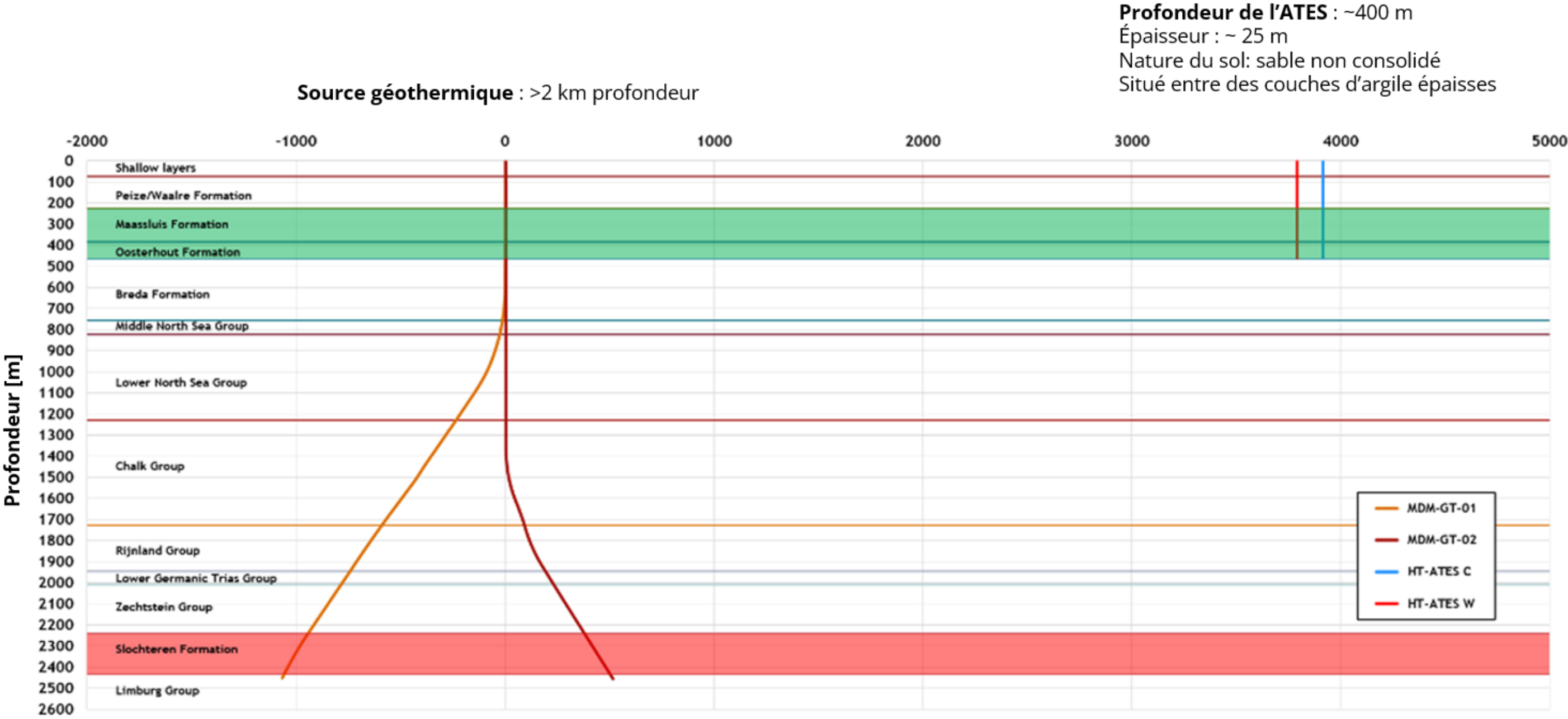
Nom : Helderman
Type de client : serre agricole
Longueur du réseau de chaleur : connexion directe
Consommateur connecté : serre de paprika

Extrait des livrables de l'IEA-ES Task 39:



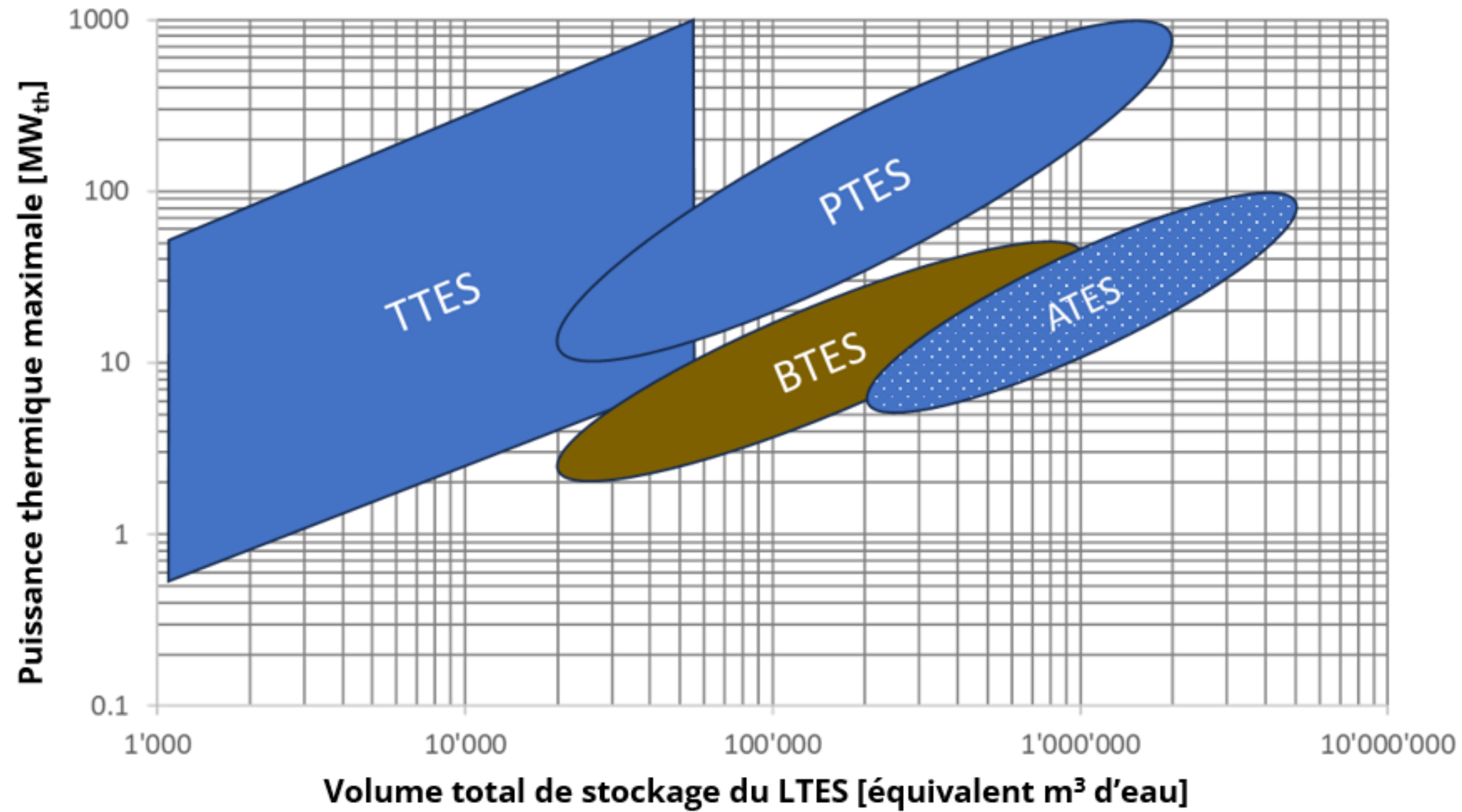
Exemple d'ATES : Middenmeer

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Chaque technologie de stockage peut couvrir une vaste plage d'opérations

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

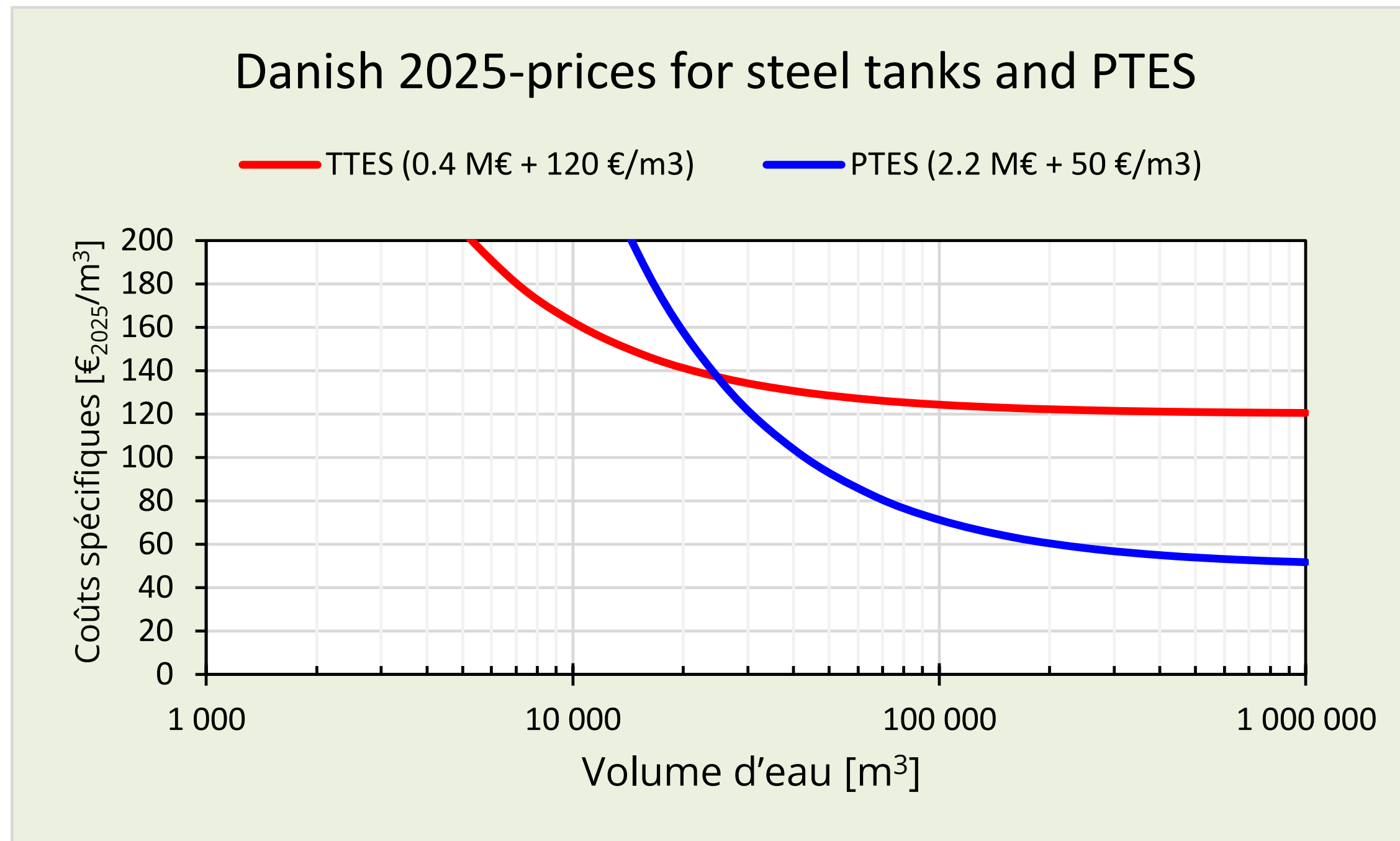


Extrait des livrables de l'IEA-ES Task 39:



TTES and PTES costs in dependence of the Water Volume

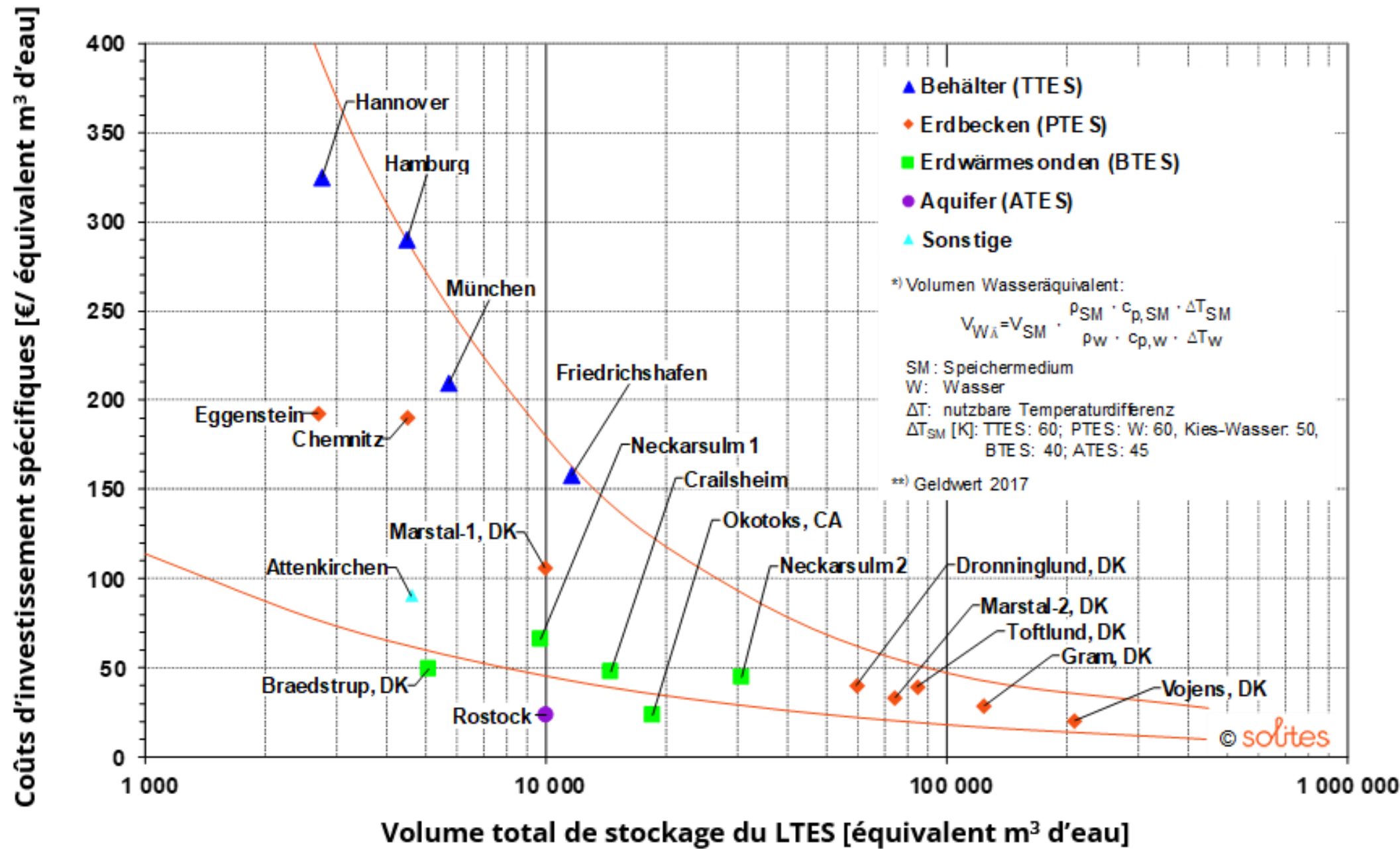
4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Comparaison des coûts d'un TTES et d'un PTES en fonction du volume d'eau, extrait de la présentation "Danish Case on Large-scale Thermal Storage to enable a Flexible Energy System"

Intérêt du stockage sur réseaux de chaleur

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

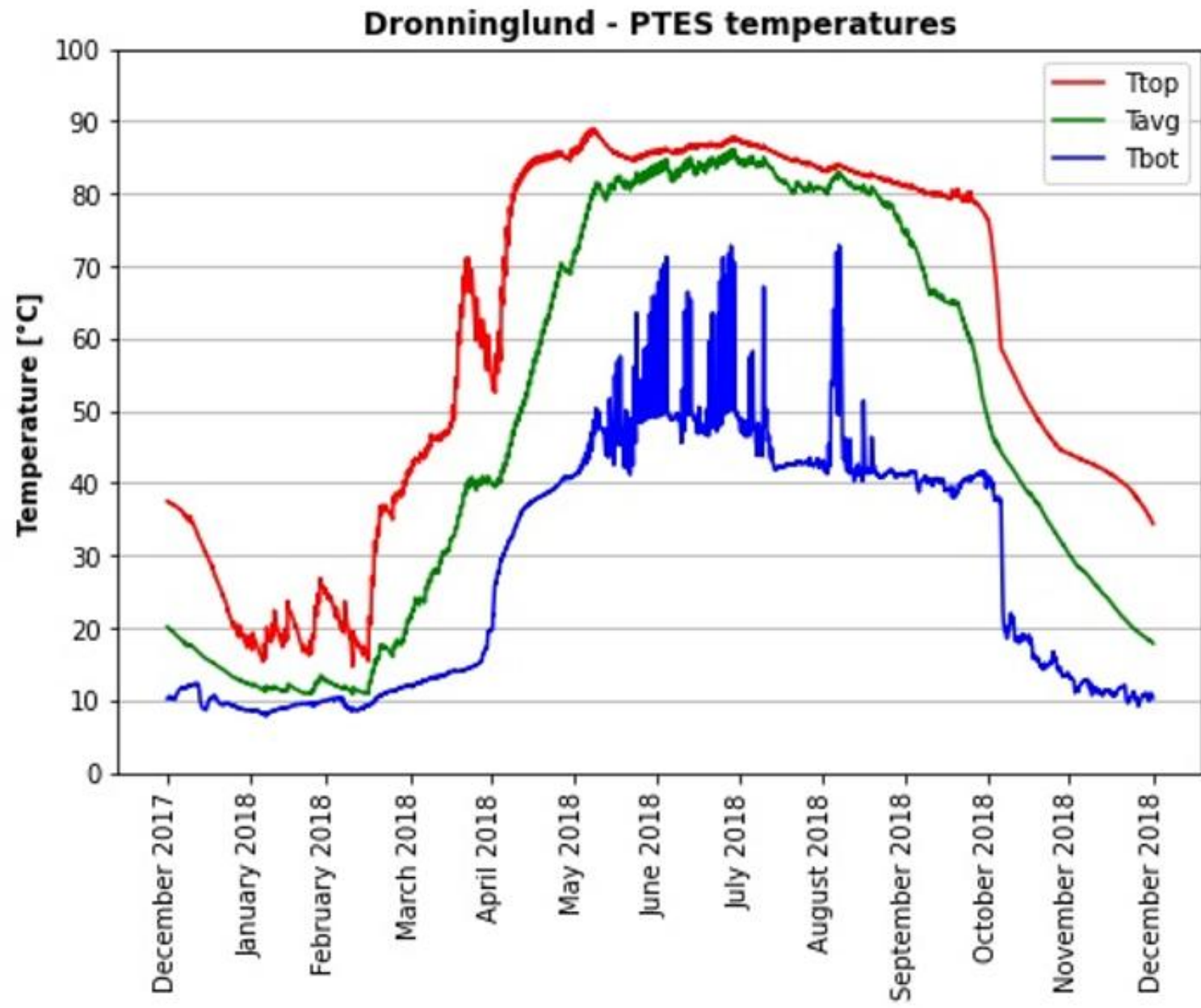


Intérêt principal:
économies d'échelle

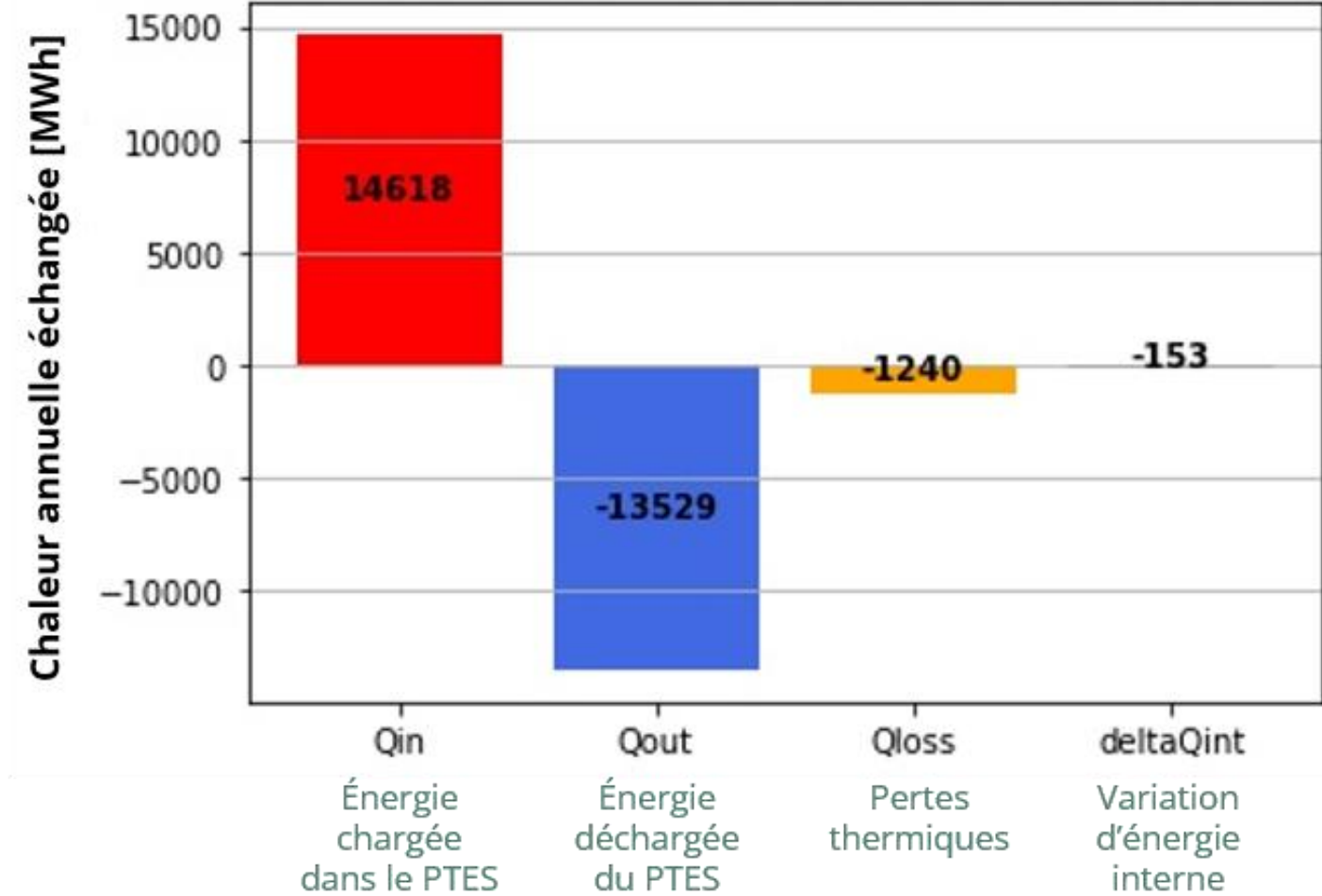
Intérêt supplémentaire :
en augmentant le volume, les pertes thermiques diminuent grâce au ratio Surface/Volume qui réduit

Données techniques : temp. & bilan d'énergie PTES

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Dronninglund - Yearly energy balance - January 2018-December 2018

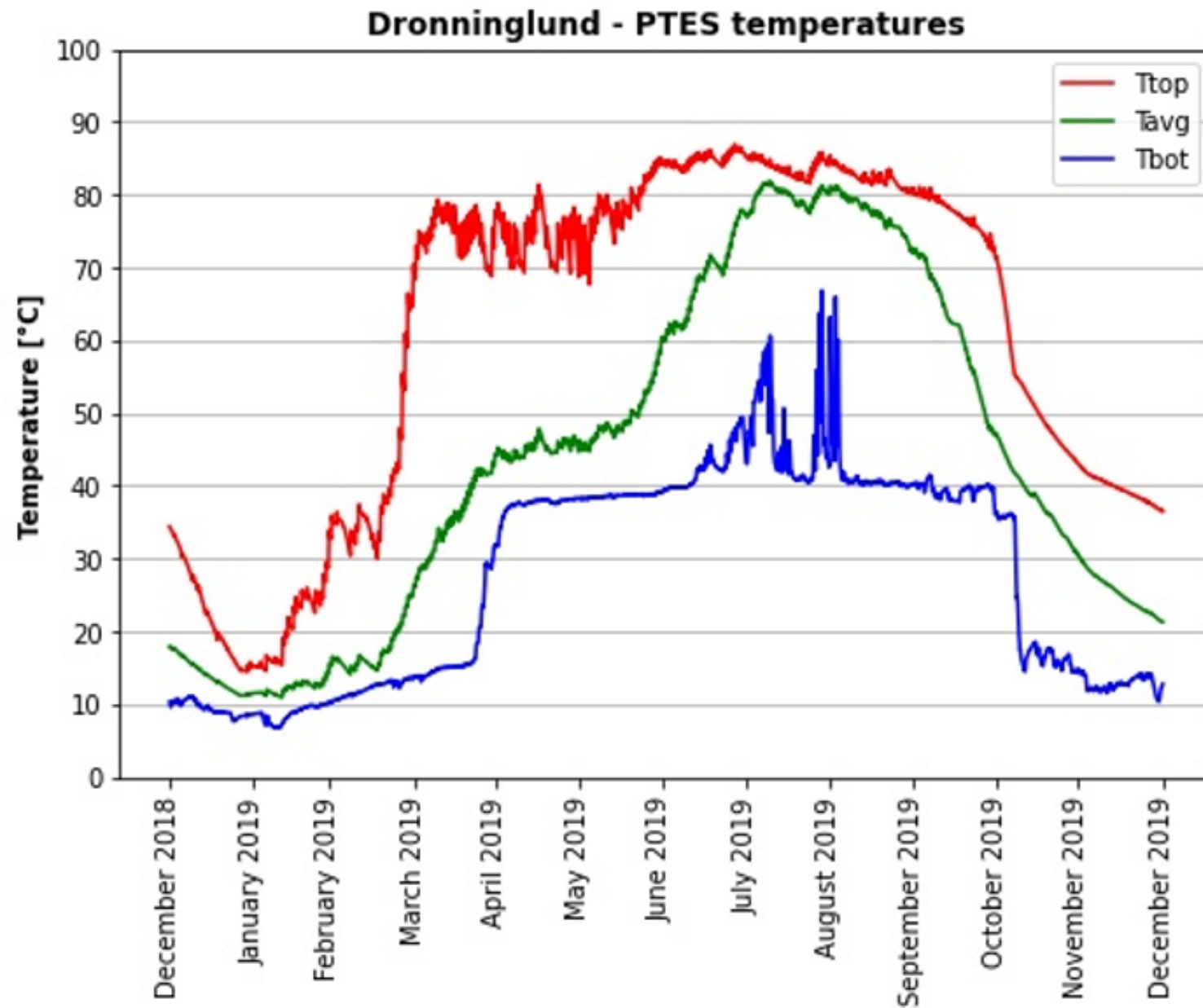


Tmax = 89.0°C Tmin = 7.8°C
 PTES capacité = 5500 MWh
 Nombre de cycles de stockage: 2.5

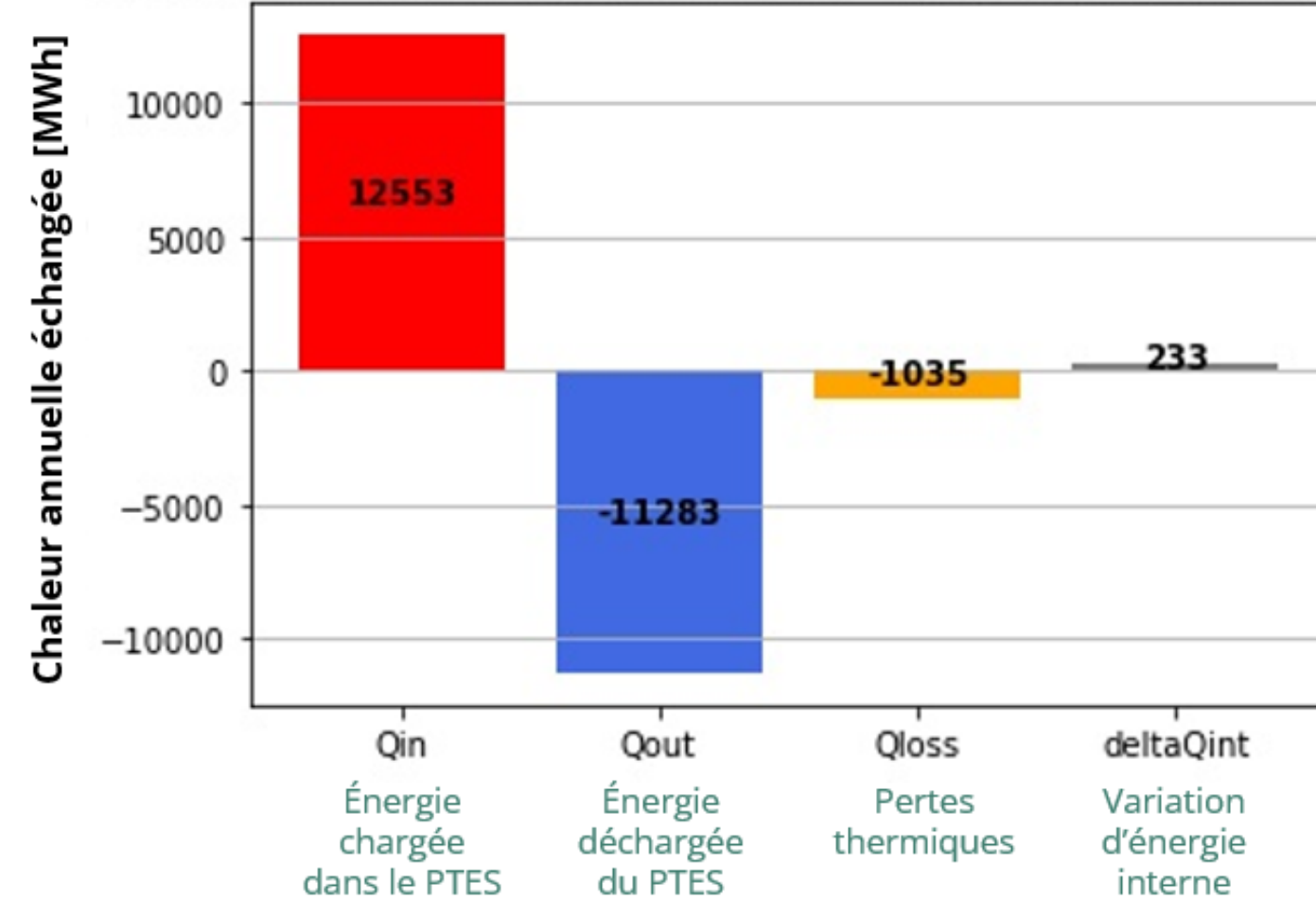
 8% pertes
 -2% énergie interne

Données techniques : temp. & bilan d'énergie PTES

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



Dronninglund - Yearly energy balance - January 2019-December 2019

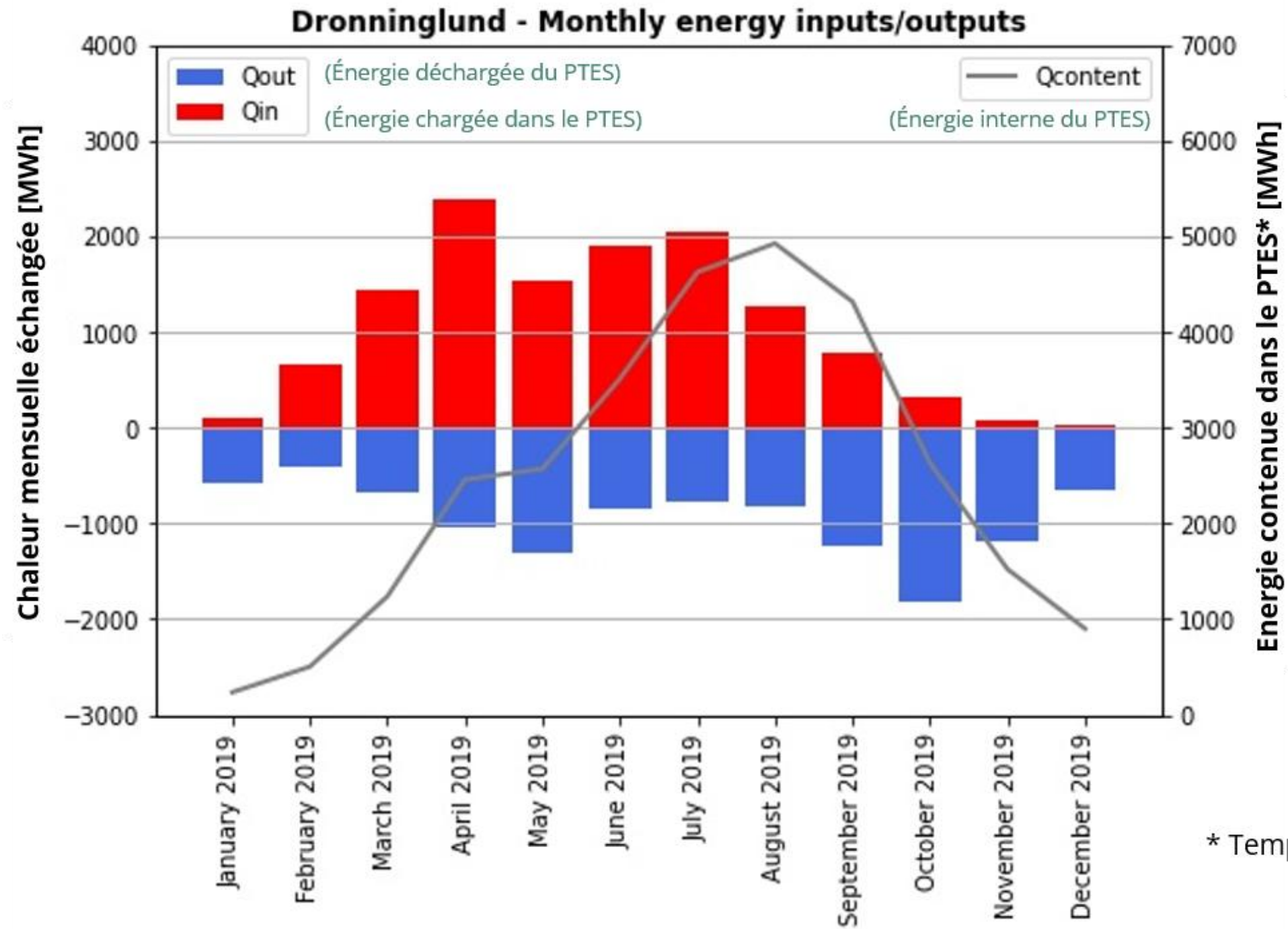


Tmax = 86.9°C Tmin = 6.7°C
 PTES capacité = 5430 MWh
 Nombre de cycles de stockage: 2.1

 8% pertes
 +4% énergie interne

Données techniques : bilan d'énergie mensuel PTES

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER



* Température de référence: 10°C

Développement historique de la technologie PTES : une technologie d'origine Danoise

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Pays	Projet	Taille	Capacité	Année
DK	DTU	500 m ³		1983
DK	Ottrupgaard	1'500 m ³	43.5 MWh	1995
DK	Marstal Sunstore 2	10'000 m ³	638 MWh	2003
DK	Marstal Sunstore 4	75'000 m ³	6'960 MWh	2012
DK	Dronninglund	60'000 m ³	5'500 MWh	2013
DK	Gram	122'000 m ³	11'300 MWh	2014
DK	Vojens	203'000 m ³	18'800 MWh	2015
DK	Toftlund	85'000 m ³	6'500 MWh	2017
CN	Tibet	15'000 m ³	1'000 MWh	2018
DK	Høje-Taastrup	70'000 m ³	3'300 MWh	2023

Exemple de PTES (journalier) : Høje Taastrup (2022)

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

PTES (fosse d'eau)	70 000 m³
Capacité charge/décharge	30 MW
Capacité de stockage	3 300 MWh
Température supérieure	90°C
Source de chaleur	Réseau de chaleur (transport)



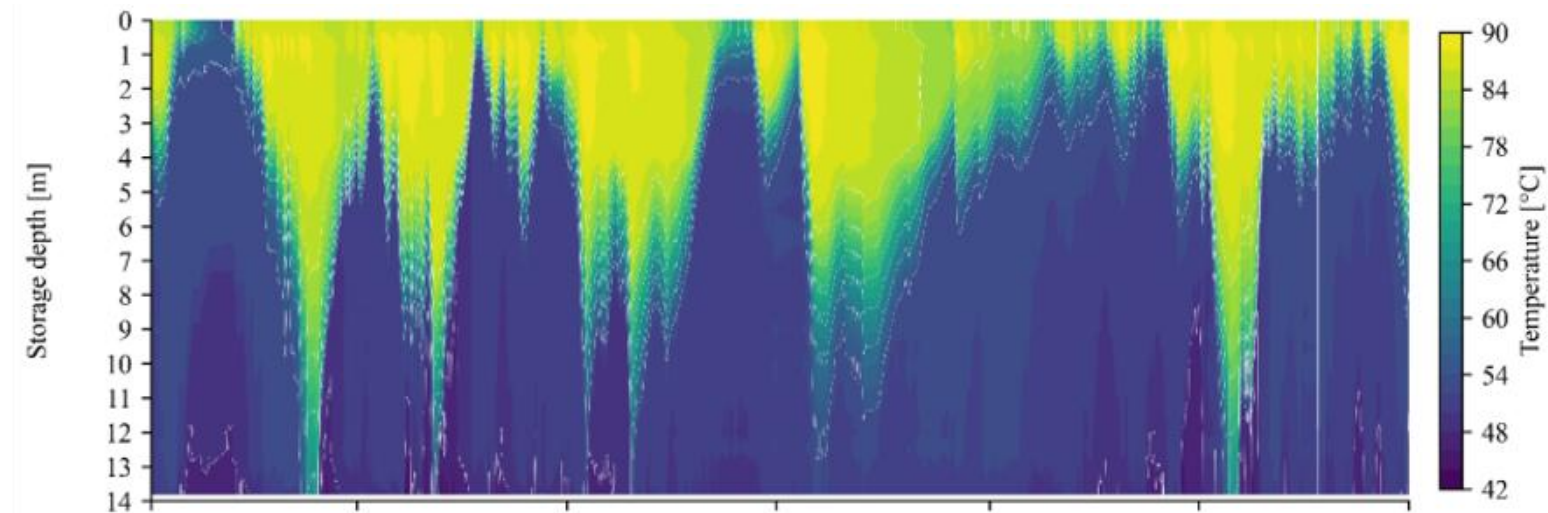
Photo: Aalborg CSP

Exemple de PTES (journalier) : Høje Taastrup (2022)

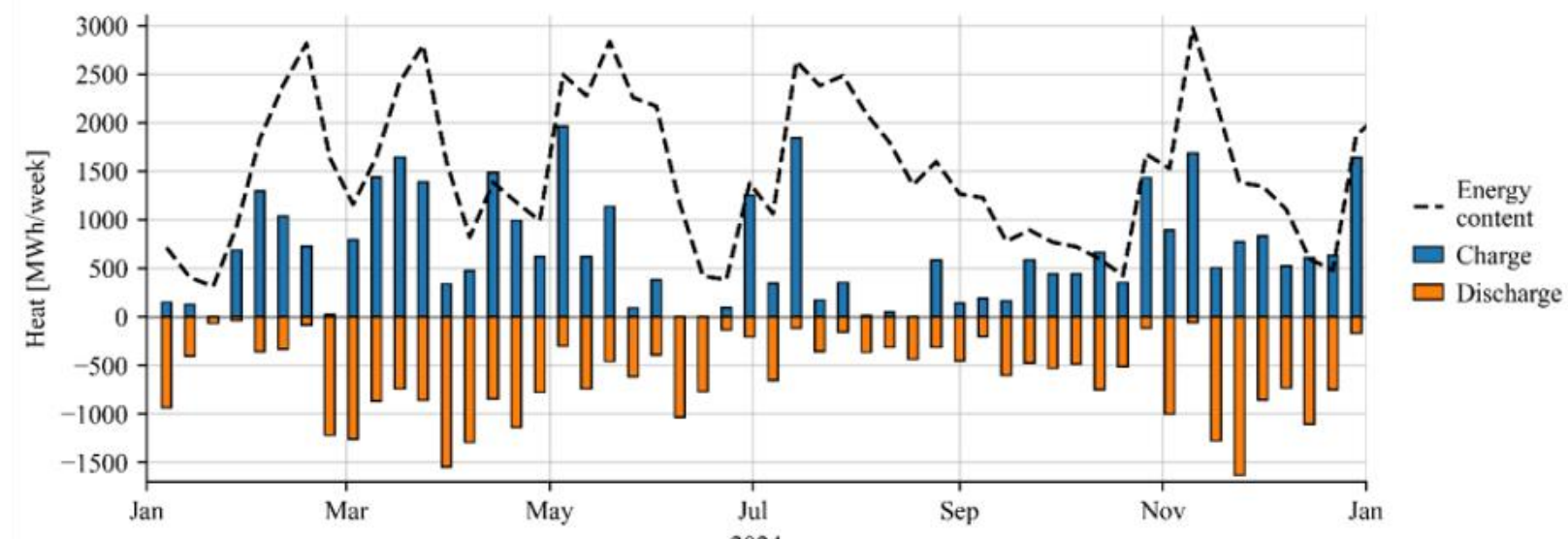
4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Mesures faites sur le PTES à Høje Taastrup, 2e année d'opération

Températures de l'eau
De haut (0m) en bas (14m)



Energie interne
Charge et décharges hebdomadaires



Source: [Sifnaios, I et al. Høje Taastrup Pit Thermal Energy Storage 2024 Measurement Report](#)

Merci de votre attention !

G **Geoffroy Gauthier**
PlanEnergi

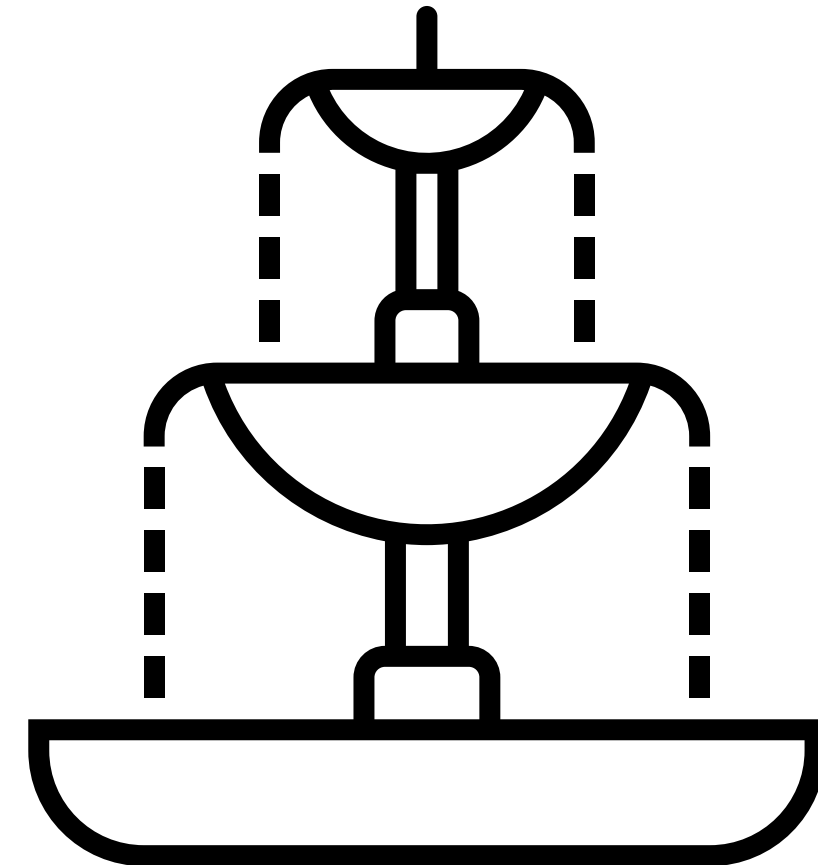
@ **gg@planenergi.dk**

Quels défis physiques peuvent survenir ?

Des défis peuvent survenir et doivent être compensés dans le fonctionnement du stockage

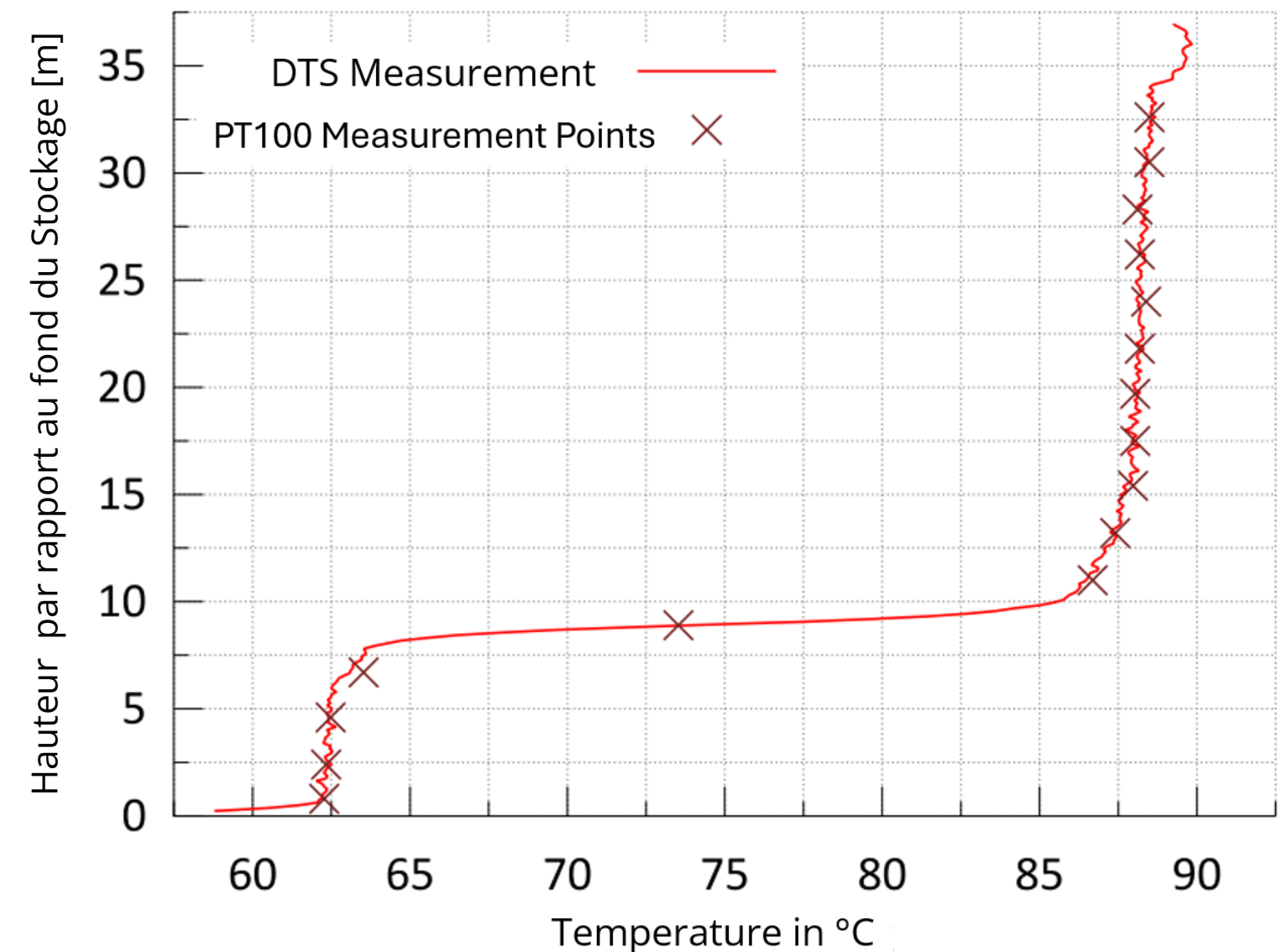
Exemples:

1. Thermodynamique : Mélange et séparation
2. Hydraulique : Fonctionnement parallèle de plusieurs TTES



1^{ère} difficulté : Thermodynamique

- Le stockage de chaleur dans l'eau est un stockage stratifié
 - Une coupe horizontale dans le stockage a (idéalement) une seule température
 - La stratification repose sur le fait que la densité de l'eau diminue lorsque l'eau est chauffée
- Il existe (au moins) 5 effets différents qui contribuent à agrandir la thermocline:
 - Conduction thermique dans l'eau (stagnante)
 - Mélange entre la charge et la décharge
 - Charge avec de l'eau plus froide que la couche haute
 - Décharge avec de l'eau plus chaude que la couche basse
 - Perte de chaleur
- Solutions possibles :
 - Charge du stockage 100%
 - Décharge le stockage 100%
 - Utilisation du diffuseur central

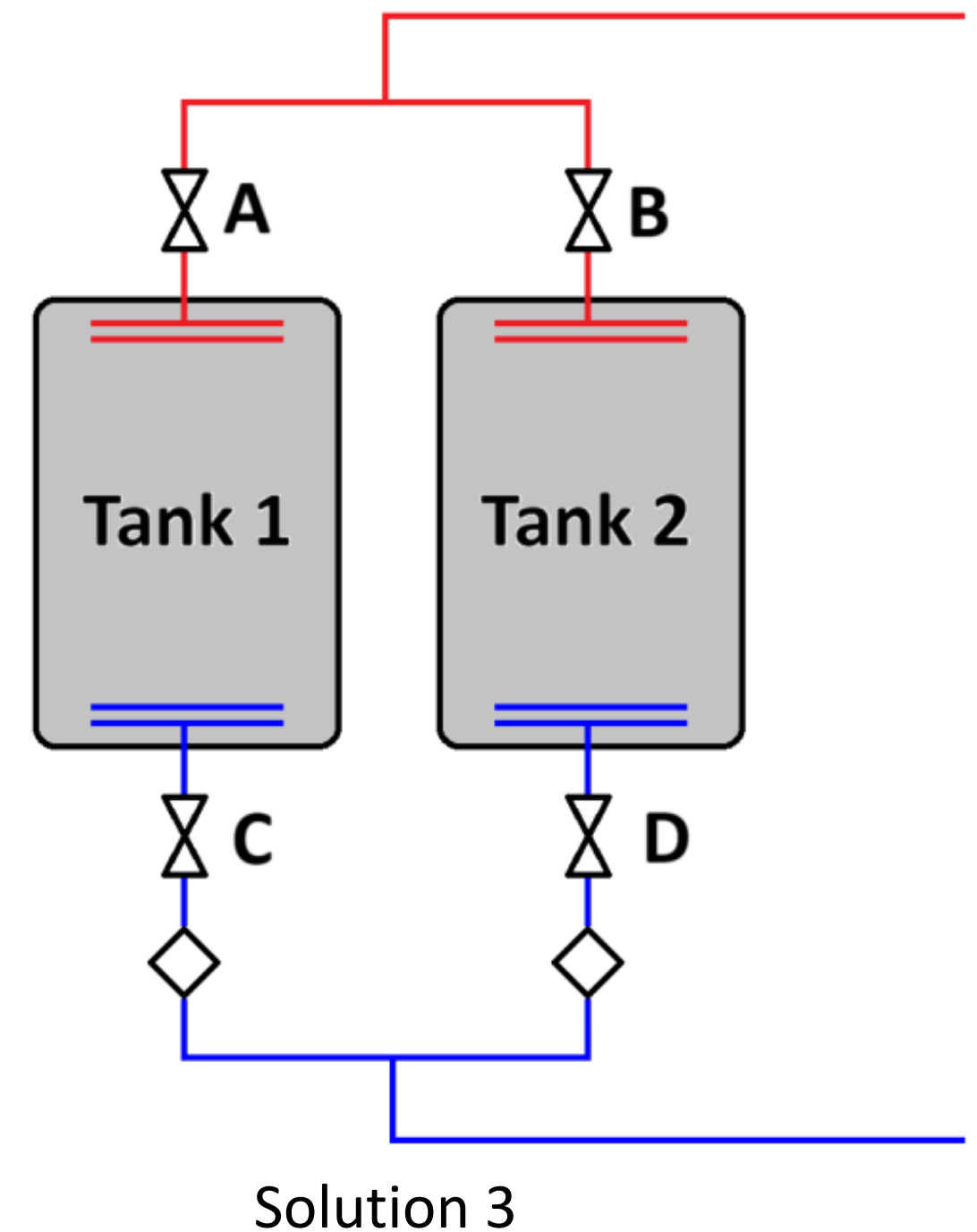


Exemple de profil de température avec thermocline

2^{ème} difficulté: Hydraulique

- Plus d'un seul stockage peut présenter un risque de*:
 - Répartition inégale de l'eau (et de la chaleur) dans les réservoirs
 - Débordement
 - Augmentation de la consommation d'azote
- 4 méthodes différentes de contrôle des niveaux d'eau:
 1. Fonctionnement d'un seul stockage à la fois
 2. Jonction des diffuseurs du bas ensemble par un tuyau avec une perte de pression très faible
 3. Installation de débitmètres et de vannes de contrôle
 4. Pompes d'ajustement

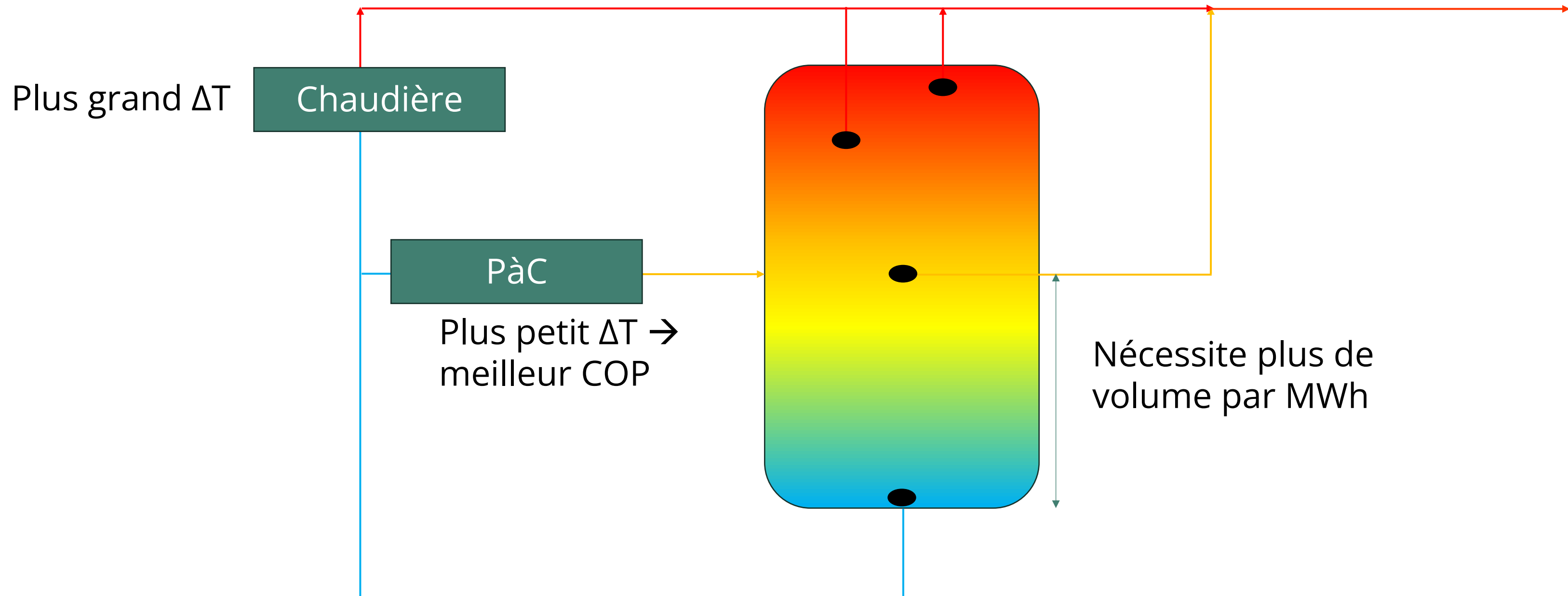
*Cas : Réservoirs non pressurisés, couplés parallèlement, avec surface d'eau au même niveau, et température de retour au fond des deux réservoirs



Comment intégrer les stockages au système ?

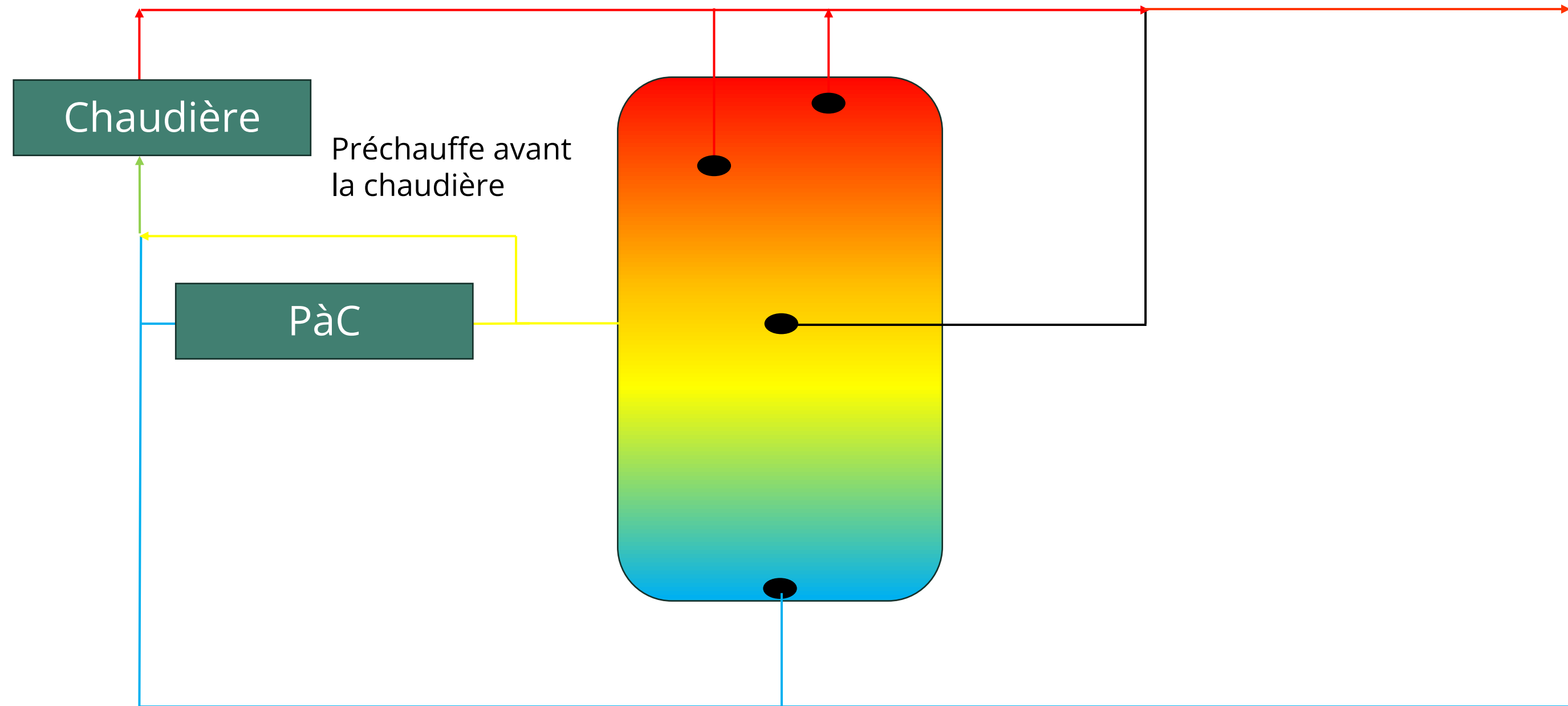
- Emplacement par rapport aux centrales de production :
 - S'intègre de manière à ce que les pompes à chaleur puissent fonctionner au niveau de température le plus bas possible (et les chaudières à haute température)
 - S'intègre afin que l'eau « tiède » puisse aussi être évacuée
 - Le placement décentralisé peut aider à augmenter la capacité du réseau de pipelines
 - mais cela peut réduire la possibilité de coproduction
- Entrée et sortie (diffuseurs) :
 - La quantité dépend du nombre d'unités de stockage et de production de chaleur
 - Doit être dimensionné selon le débit maximal (à faible ΔT)
 - Doit être conçu pour fournir une faible vitesse d'entrée à l'intérieur du stockage (pour conserver la stratification)
- Pour plusieurs stockages connectés, concentrez-vous sur:
 - Charge et décharge réparties uniformément
 - Éviter les débordement possibles des cuves

Comment les stockages seront-ils intégrés au système ?



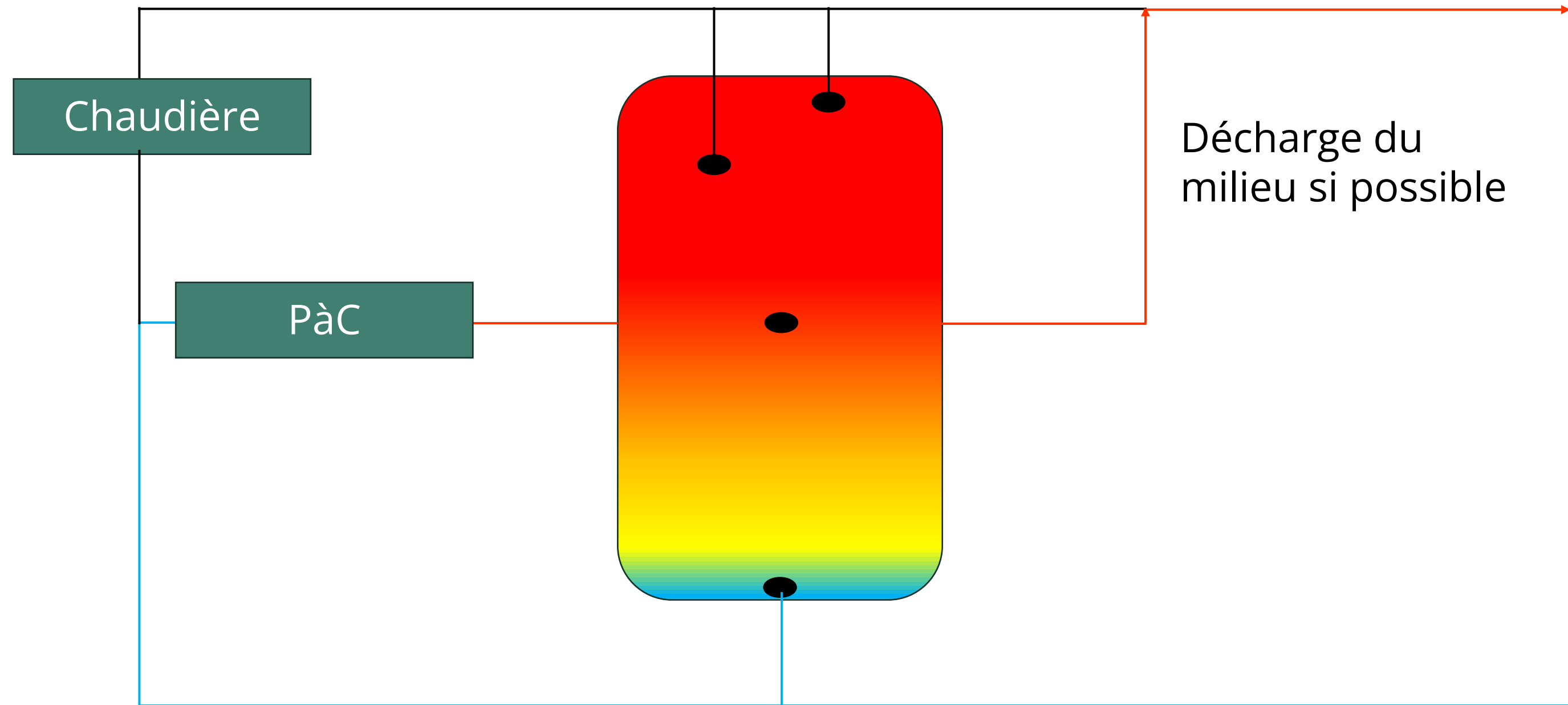
- Tout MWh peut avoir une valeur pour le système
- Efficacité de PàC plus élevée

Comment les stockages seront-ils intégrés au système ?



- Tout MWh peut avoir une valeur pour le système
- Efficacité de PàC plus élevée – Limitation de la part que la PàC peut fournir

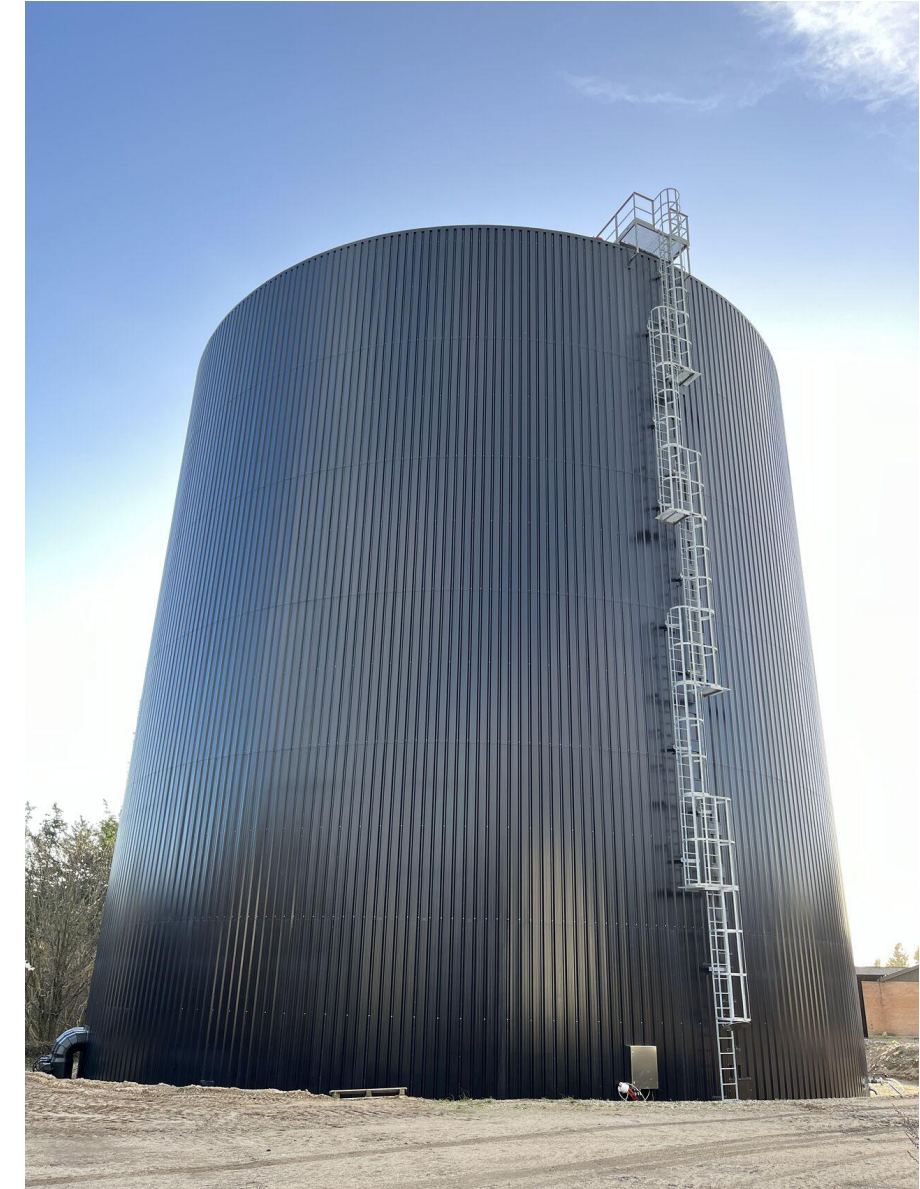
Comment les stockages seront-ils intégrés au système ?



- Optimisation des couches pour une meilleure utilisation du volume
- Exploitez d'abord « l'énergie la moins précieuse »

Quelle taille devrait avoir le stockage ?

- "Ça ne peut jamais être TROP GROS"
- Pour pompe à chaleur : environ 400-500 m³/MW
- Pour chaudière électrique : 300 à 1'000 m³/MW
- Cela dépend de nombreux facteurs :
 - Niveau de température (aller & retour)
 - Mix de production (unités de production de chaleur)
 - Capacité (MW)
 - Demande de chaleur (MW)
 - Évaluation des risques pour la centrale de chauffage
- Optimisation économique basée sur **simulations**
 - Par exemple, basé sur les prix « spot » de l'électricité avec un équilibre de la réduction de la puissance

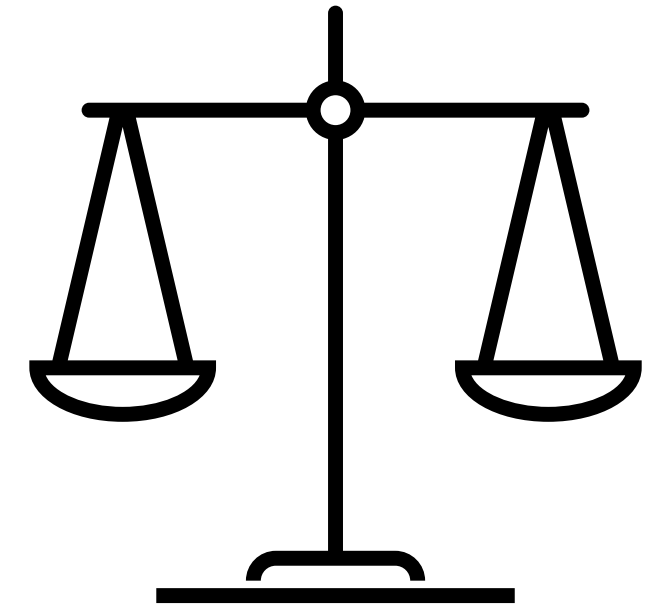


TTES à Ebeltoft

Équilibrage des risques

- Risque de « surinvestissement » vs. besoin de flexibilité et bénéfices
 - Équilibre dans la protection des consommateurs
 - Aucune certitude quant à l'économie opérationnelle future
 - À quel point pensez-vous être actif sur les marchés de l'électricité ?
 - Un très grand stockage peut être vu à la fois comme une assurance et un paris
- Les marchés de l'électricité du futur
 - Une capacité de régulation accrue sera nécessaire
 - Le stockage thermique est le moyen de moins cher d'en profiter
 - Planification d'effets de charge/décharge des batteries électriques jusqu'à 6,4 GW au Danemark (risque de concurrence sur certains marchés/services système similaires à l'avenir)

<https://klimamonitor.dk/nyheder/energi/article18429453.ece>



4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Pit Thermal Use Case Energy Storages Høje Taastrup (DK)

About the PTES

Technologie : PTES (Milieu de stockage: eau)
Type d'usage : Stockage hebdomadaire de chaleur
Mise en service : 2022
Source primaire de chaleur : réseau de transmission (chaleur)
Propriétaire : VEKS & Høje Taastrup, 50%/50%

Détails techniques

Volume d'eau : 70'000 m³
Dimensions de la couverture isolante : 180 m x 62 m
Capacité : 3'300 MWh
Capacité de charge-décharge capacity : 30 MW_{th}
25-30 cycles de charge/décharge par an (design)
Température opérationnelle max. : 90°C

A propos du réseau de transmission

Nom : VEKS
Type de propriété : détenue conjointement par l'autorité locale
Longueur du RdC : **135 km**
Consommateurs connectés : **150'000** foyers
Production totale de chaleur : **2'500 GWh/year**



Photo: Ioannis Sifnaios

About the distribution DHN

Nom : Høje Taastrup District Heating
Type de propriété : consumer-owned (& non-profit)
Longueur du RdC : **279 km**
Consommateurs connectés : **7'900** buildings & industries
Production totale de chaleur* : **350 GWh/year**
Chaleur totale vendue : **306 GWh/year**

Projet pionnier : il s'agit du premier PTES au monde à ne pas être couplé à du solaire thermique
Pour plus d'informations sur ce projet, veuillez consulter <https://www.veks.dk/en/publications>

*Y compris la chaleur achetée au réseau de transport et la production locale de Høje Taastrup District Heating



Extract from: IEA-ES
Task 39 deliverables

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Origine et contexte du projet – Optimisation quotidienne du PTES

L'utilisation du stockage de chaleur est optimisée par « Varmelast » (responsable de la répartition quotidienne de la production de chaleur dans la capitale)

L'optimisation opérationnelle aura lieu en interaction avec l'optimisation de la production de chaleur et des stockages de chaleur (quotidiens) existants

Comme Høje Taastrup est un stockage hebdomadaire de chaleur, les prévisions hebdomadaires doivent être utilisées pour la demande de chaleur, la capacité de production opérationnelle, les prix de l'électricité, les prix du carburant, etc.

La répartition de la production est organisée quotidiennement afin qu'elle soit toujours produite dans les centrales les moins chères

Le stockage reçoit la chaleur du réseau de transport (~ 95-110 °C)

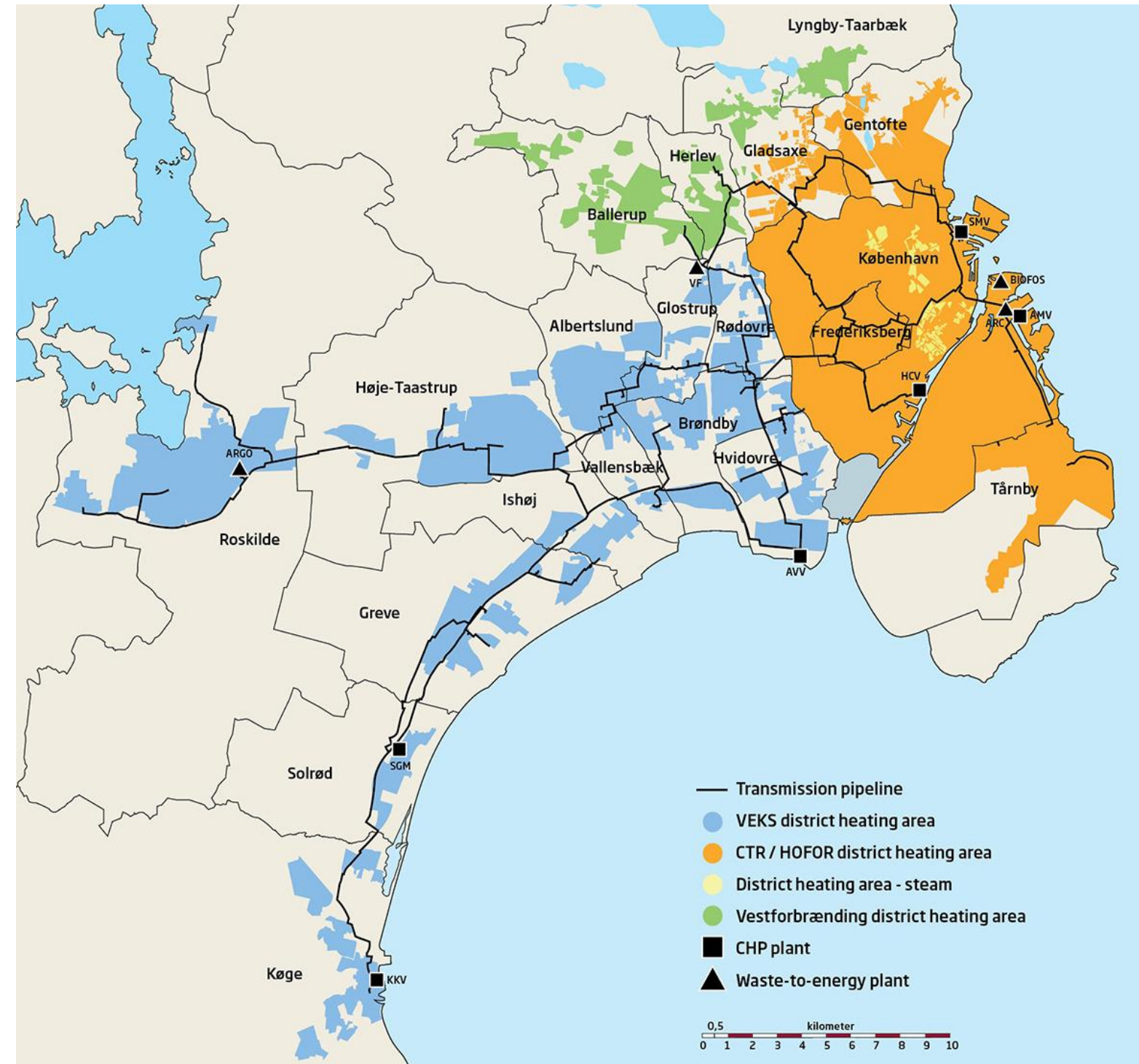
Le stockage fournit la chaleur au réseau de distribution de Høje Taastrup (~ 75 °C)

Etude de cas : PTES à Høje Taastrup

4 — STOCKAGE SAISONNIER ET JOURNALIER

Sources de chaleur pour le PTES

- 4 Centrales de cogénération
capacité totale 2'050 MW_{chaleur}
- 3 UVE
capacité totale 400 MW_{chaleur}
- Centrales électriques de reserve et de pic
capacité totale 1'900 MW_{chaleur}
- 3 TTES
capacité totale 960 MW_{chaleur}
- Pas de solaire thermique



Etude de cas : PTES à Høje Taastrup, données opérationnelles clés

Paramètre	Valeur
Chaleur chargée dans le PTES	34'044 MWh
Chaleur déchargée du PTES	29'917 MWh
Changement d'énergie interne	529 MWh
Pertes totales de chaleur	3'598 MWh
Efficacité annuelle	89%*

* 87% la première année

Etude de cas : PTES à Høje Taastrup, business case

Paramètre	Valeur
Investissement total	12.15 M€ ₂₀₂₃
Investissement PTES seul	6 M€ ₂₀₂₃
OPEX, avec 25 cycles/an	160'000 € ₂₀₂₃ /an
Temps de retour sur investissement	12 ans*
IRR	7.5 %
Subventions	1.745 M€ ₂₀₂₃ **
Bénéfice d'exploitation (estimés)	1.04 M€/an
Economies de CO ₂ (estimées)	6,200 tonnes/an

* Hors subvention

** De la part d'EUDP

Etude de cas : PTES à Høje Taastrup, répartition des bénéfices*

Source de chaleur	Cogénérations	UVE	Peak boilers
Propriétaires	Ørsted, HOFOR & VEKS	Communes	Opérateurs de transmission (VEKS & CTR/HOFOR)
Capacité totale	2,050 MW _{chaleur}	400 MW _{chaleur}	1'900 MW _{chaleur}
Part des bénéfices	30-35%	10-30%	35-60%

* Basé sur les calculs de design issus de l'analyse énergétique faite par Ea Energianalyse

Etude de cas : PTES à Høje Taastrup, propriété et répartition des responsabilités

Entreprise	Høje Taastrup Fjernvarme (HTF)	VEKS
Parts	50%	50%
Contrat	VEKS a acquis le droit à la part de la capacité de stockage de HTF pour 20 ans en versant une compensation annuelle. Les partenaires ont conclu un accord de coopération dans lequel il est indiqué que :	
Responsabilité de l'exploitation et de la maintenance	L'exploitation est gérée par HTF, à partir des données sur le profil charge-décharge fournies par Varmelast chaque jour	VEKS prend en charge les coûts de maintenance

Etude de cas : PTES à Høje Taastrup, propriété et répartition des responsabilités

Høje Taastrup Fjernvarme et VEKS ont pris en charge l'établissement et l'exploitation, et rendent le stockage disponible pour les bénéficiaires

Toutes les parties qui bénéficient financièrement du stockage sont incluses dans le financement en échange de la garantie que VEKS garantit que l'ensemble du stockage soit disponible dans la distribution quotidienne de la charge

VEKS a conclu des accords avec tous les propriétaires de centrales de cogénération, des UVE, qui versent un paiement annuel fixe pendant 20 ans pour cette disponibilité (selon le bénéfice opérationnel calculé en amont)

Le prêt pour l'investissement dans le PTES est garanti par la commune (Høje Taastrup)

Merci de votre attention !

G **Geoffroy Gauthier**
PlanEnergi

@ gg@planenergi.dk