

Quels sont les systèmes saisonniers de stockage d'énergie dont la Suisse a besoin ?



SCIENCE ET POLITIQUE
à table!

Programme

- **Stockage saisonnier d'énergie – Aperçu des options technologiques dans le contexte des systèmes énergétiques**

Jonas Schnidrig, enseignant et chercheur en planification des systèmes énergétiques (HES-SO / EPFL Valais-Wallis)

- **Le potentiel sous-estimé du stockage saisonnier de chaleur**

Luca Baldini, directeur, Institut des technologies de construction et des processus, ZHAW

- **De quels systèmes de stockage d'énergie la Suisse a-t-elle besoin pour garantir un approvisionnement énergétique sûr et économiquement efficace ?**

Ingmar Schlecht, expert, chercheur associé, École de gestion et de droit, Centre pour l'énergie et l'environnement, ZHAW

- **Discussion**



Situation de départ

une question d'équilibre



Été

Surplus d'énergie
renouvelable



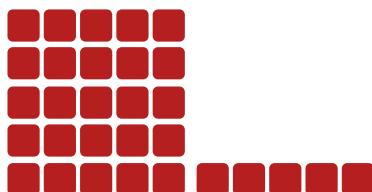
Hiver

Demande plus haute que la
production

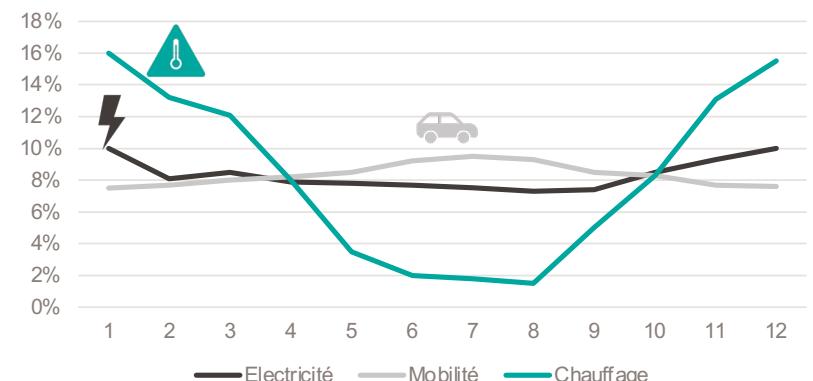
→ Déficit structurel d'approvisionnement

- Déficit saisonnier d'environ 20-35 TWh

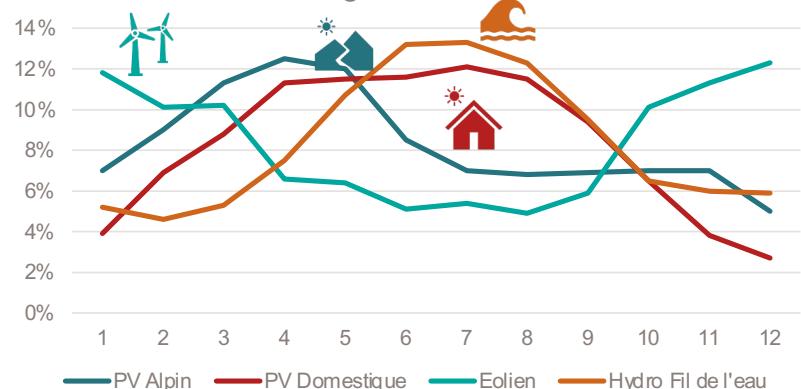
Il ne s'agit pas seulement d'électricité, mais des besoins quotidiens.



Demande énergétique normalisée au cours des saisons



Production d'électricité normalisée de technologies non-régulables



Pourquoi des stockages saisonniers ?

Comment couvrir le «déficit hivernal» ?

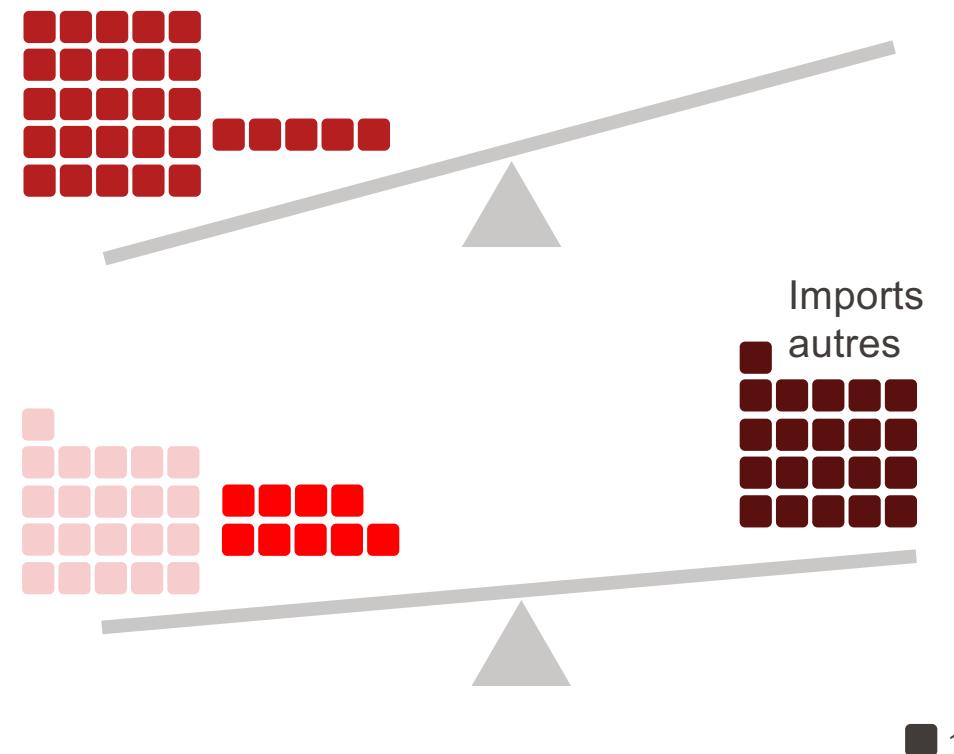
→ déficit saisonnier d'environ **20-35 TWh**

Imports en tant que partie de l'approvisionnement :

- **pertinentes** pour **l'électricité**
6-9 TWh en hiver avec accord UE
- **indispensables** pour les **vecteurs d'énergie chimiques**

Le stockage saisonnier

- prennent de la **valeur qu'en hiver**
- déterminants pour la **sécurité d'approvisionnement**
- **Résilience du système énergétique.**



Les stockages saisonniers ? Les quatre piliers

peu de cycles annuels, rentabilité par usage hivernal



Stockage d'eau par accumulation

Epine dorsale de l'approvisionnement hivernal

8.9 TWh aujourd'hui → ~10 TWh 2050

Possibilités d'extension limités

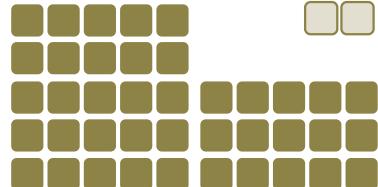


Stockages dans le sol, bassins de chaleur, aquifères

Réduction de la demande d'électricité hivernale (**2-4 TWh**)

Couplage sectoriel, réduction des pointes et production flexible

Coûts faibles grâce aux grandes quantités d'énergie



Vecteurs d'énergie chimiques

H_2 , Biométhane, vecteurs synthétiques

Précieux là où l'électricité ne suffit pas

Forte densité énergétique, ! pertes de conversion

Stockages gazeux : cavernes rocheuses (**1-2 TWh** pas encore réalisés)

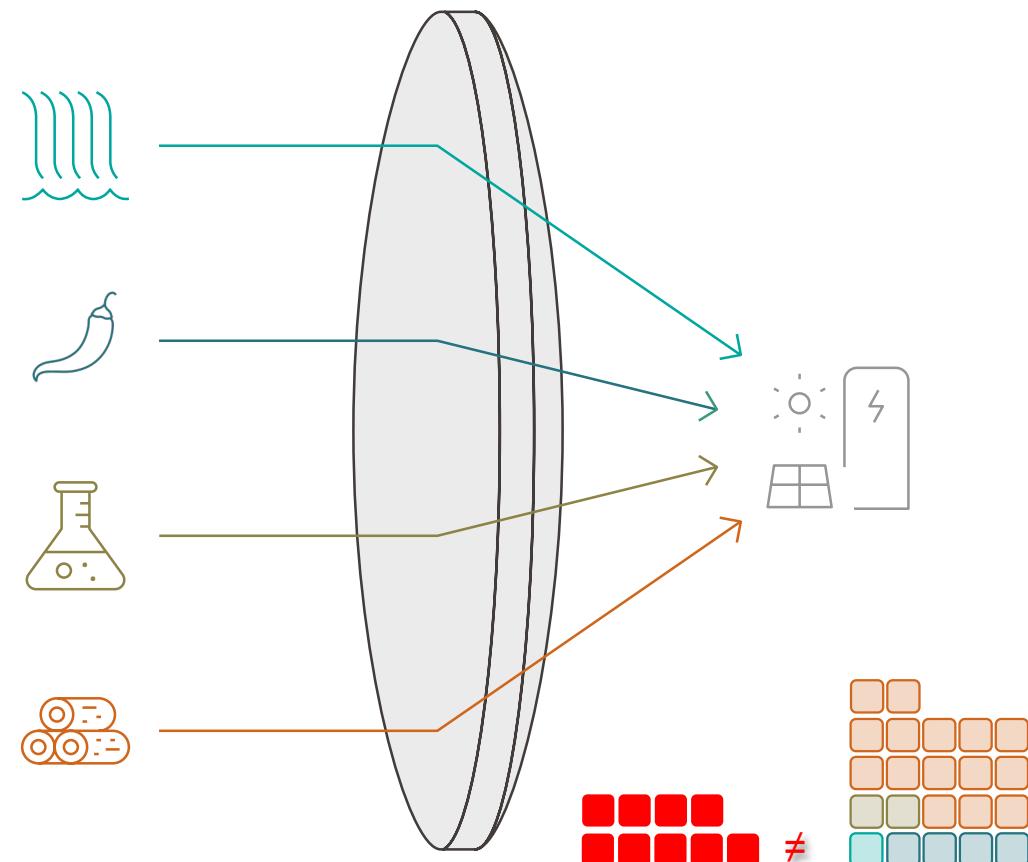
Réservoirs de combustibles liquides: ~40 TWh adj (mazout, futurs e-fuels/biocarburants)



Biomasse

13-15 TWh de bois stockable

Ressource limitée, utilisation en cascade importante

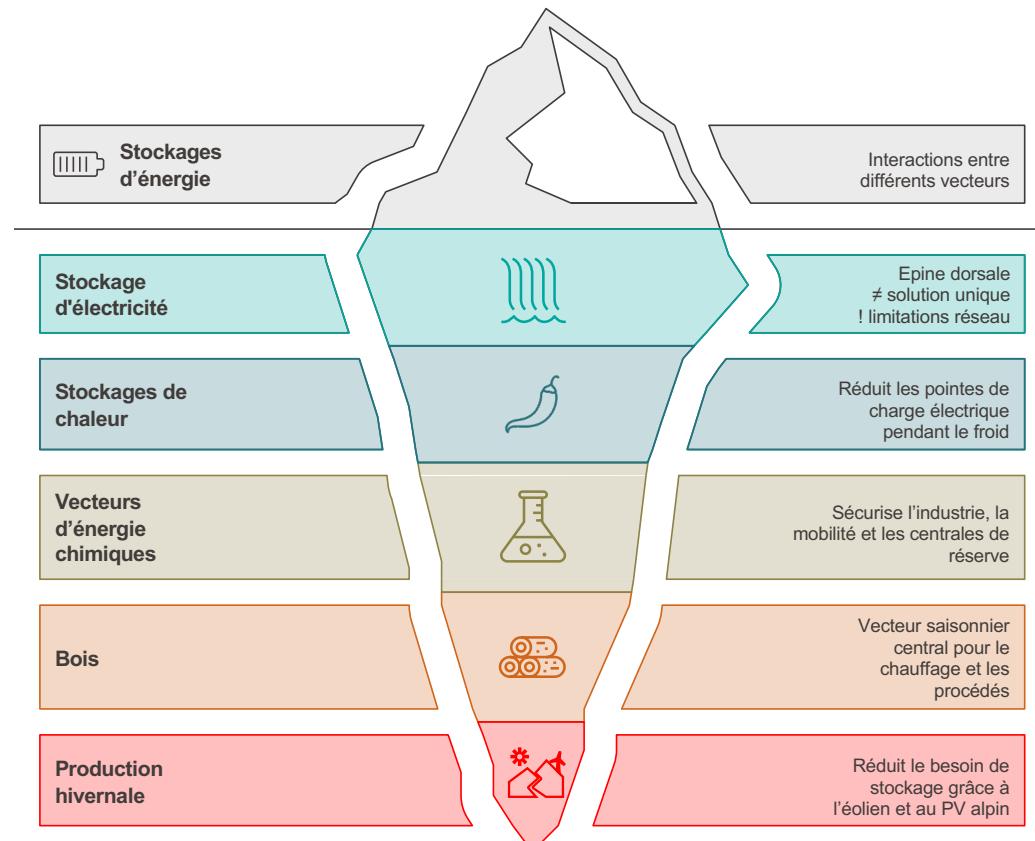


■ 1 TWh

Le système énergétique dans son ensemble

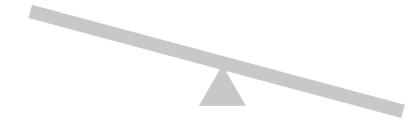
un jeu d'interactions entre électricité, chaleur, mobilité et industrie

- **Stockages d'électricité** ≠ solution unique
→ effet hivernal d'origine systémique & ! réseau
- **Stockages de chaleur** réduisent les pointes de charge électrique
→ *soulagement lors des périodes de froid.*
- **Vecteurs d'énergie chimiques** sécurisent l'industrie + mobilité + centrales de réserve
→ *là où l'électricité ne suffit plus*
- **Bois** vecteur saisonnier central
→ *déplacer du chauffage des locaux vers procédés à haute température*
- **Plus de production hivernale** (éolien, PV alpin)
→ *réduction du besoin de stockage*



Options d'action pour la Suisse

Scénarios d'approvisionnement et défis



▪ De nombreuses possibilités

Le besoin de stockage résulte de la discordance structurelle hiver–été : seul un mix de technologies peut la résoudre.

▪ Techniquement réalisable, mais...

chacune implique des conflits d'objectifs entre coûts, indépendance et acceptation.

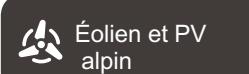
Conditions politiques

Définir dès maintenant des objectifs d'extension, des conditions-cadres et des incitations à l'investissement.

si

alors

mais



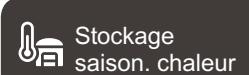
Éolien et PV alpin



Demande stockage saisonnier baisse



Limitation réseaux, Acceptation et besoin de surfaces



Stockage saison. chaleur



Demande hivernale baisse



Grands investissements et installations



Stockage gaz (cavernes)



Résilience contre black-outs



Coûts conséquents et temps de réalisation longs



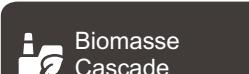
Imports-UE



Réduction de la demande de stockage



Dépendance étrangère augmente



Biomasse Cascade



Potentiel saisonnier augmente



Concurrents d'utilisation



Power-to-X Technologies



Mise à disposition de surproduction estivale



Efficacité générale limitée

...

4 points en résumé

Les technologies existent – les décisions politiques et le cadre économique définissent le chemin

Plus de production hivernale

- Mettre l'accent sur production hivernale que des stockages supplémentaires
 - L'éolien et le photovoltaïque alpin réduisent fortement le besoin de stockage

Créer des conditions-cadres

- Chaque technologie de stockage requiert des incitations réglementaires ciblées
- Des stockages de chaleur aux stockages gazeux en passant par le Power-to-X



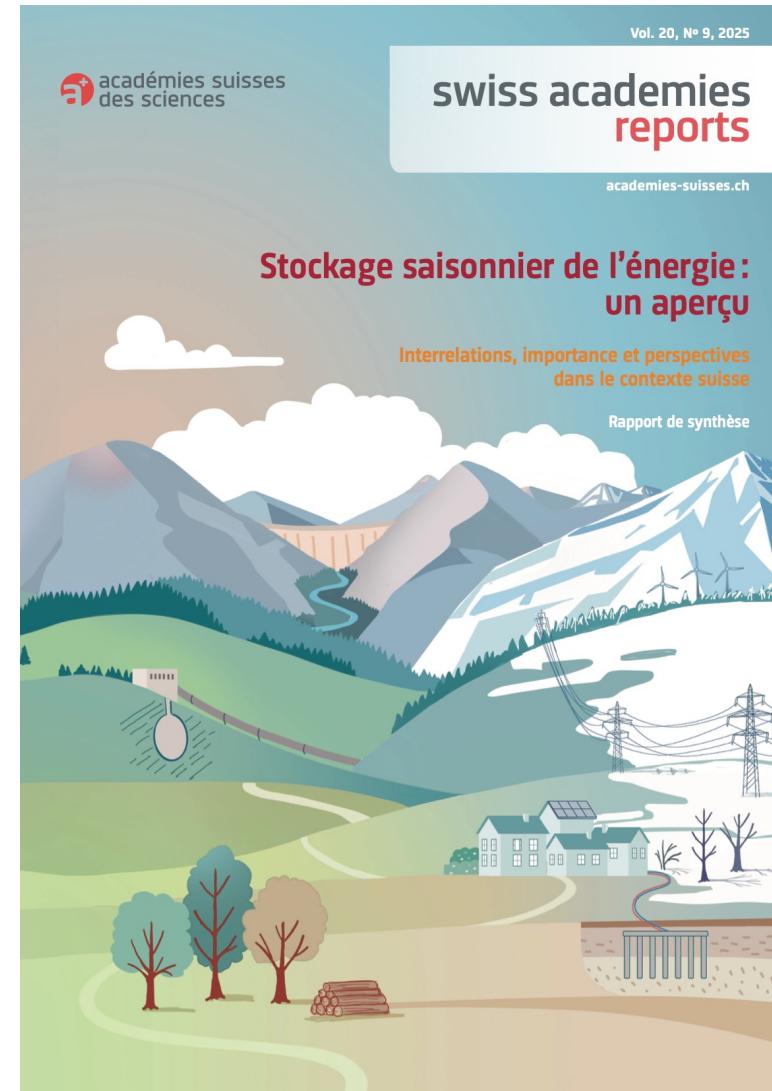
Bon vecteur énergétique

- Couplage sectoriel réduit le besoin de stockages d'électricité coûteux
- Stocker de la chaleur plutôt que de l'électricité ; gaz pour l'industrie ; électricité pour la mobilité

Importations + stockage = résilience

- Importations restent centrales, mais stockages nationaux renforcent robustesse
- Stockages amortissent les interruptions de livraison et renforcent la sécurité d'approvisionnement

Pour plus d'informations



La Suisse est un pays hivernal...

...son système énergétique doit l'être aussi.

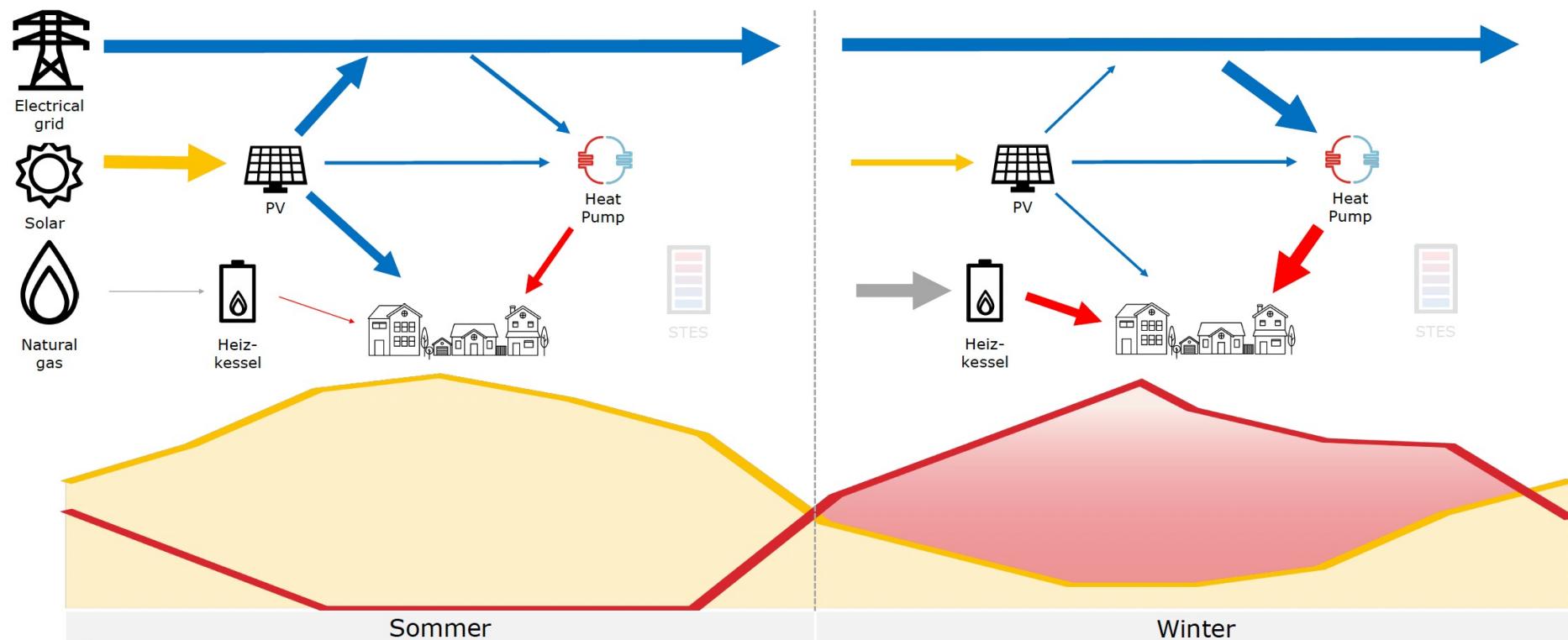
Source : solmax.com

Le potentiel sous-estimé du stockage saisonnier de chaleur

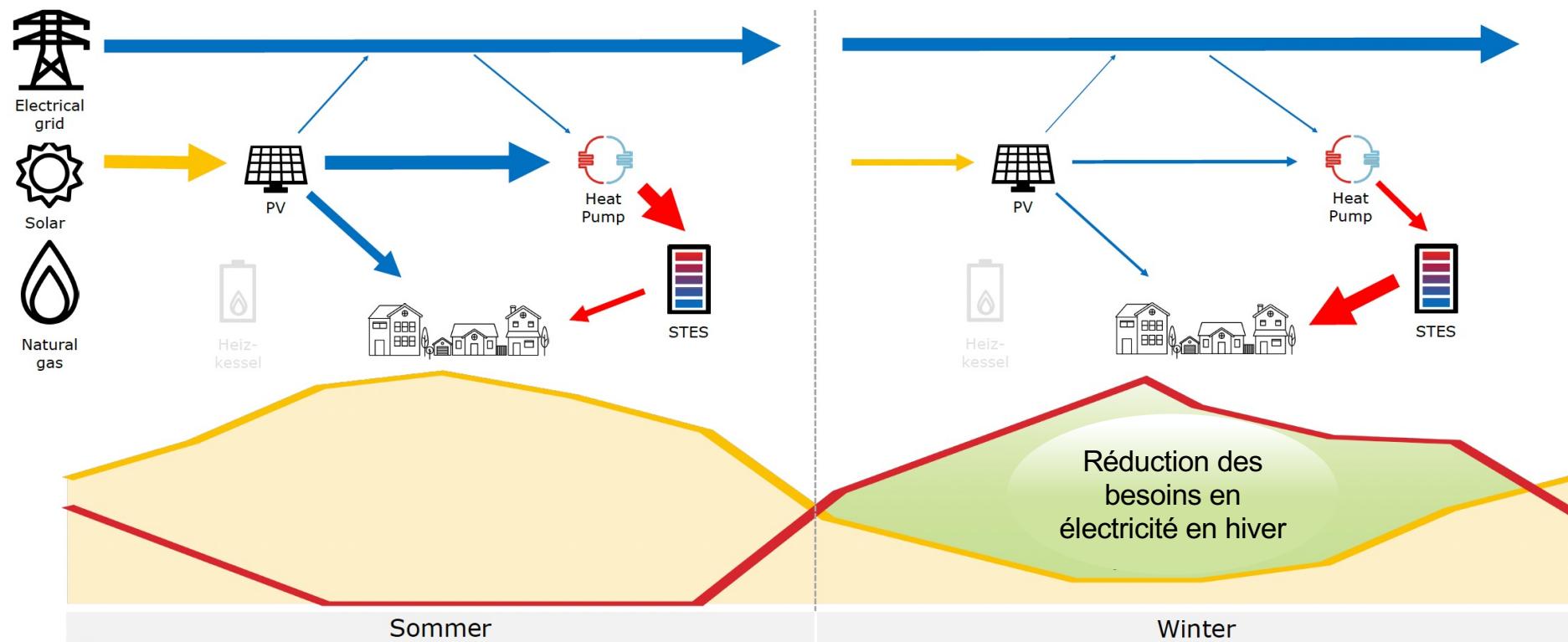
Prof. Luca Baldini
Institut ZHAW Technologie et processus de construction

Science et Politique à table
2 décembre 2025, Berne

Système énergétique sans stockage saisonnier de chaleur (STES)



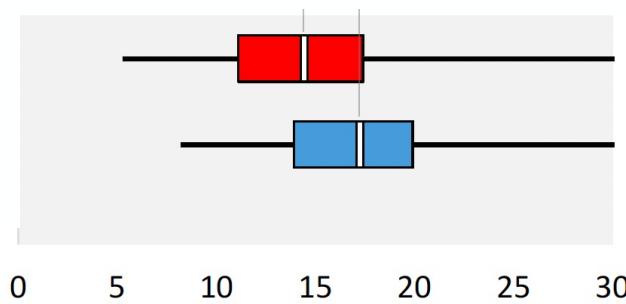
Système énergétique avec stockage saisonnier de chaleur (STES)



La valeur des stockages de chaleur saisonniers

Objectif 2050, scénario zéro émission nette à $-6 \text{ Mt}_{\text{CO}_2}/\text{a}$

Réduction des besoins en électricité en hiver pouvant atteindre 3 TWh



Électricité hivernale provenant des importations et des centrales thermiques (TWh/a)

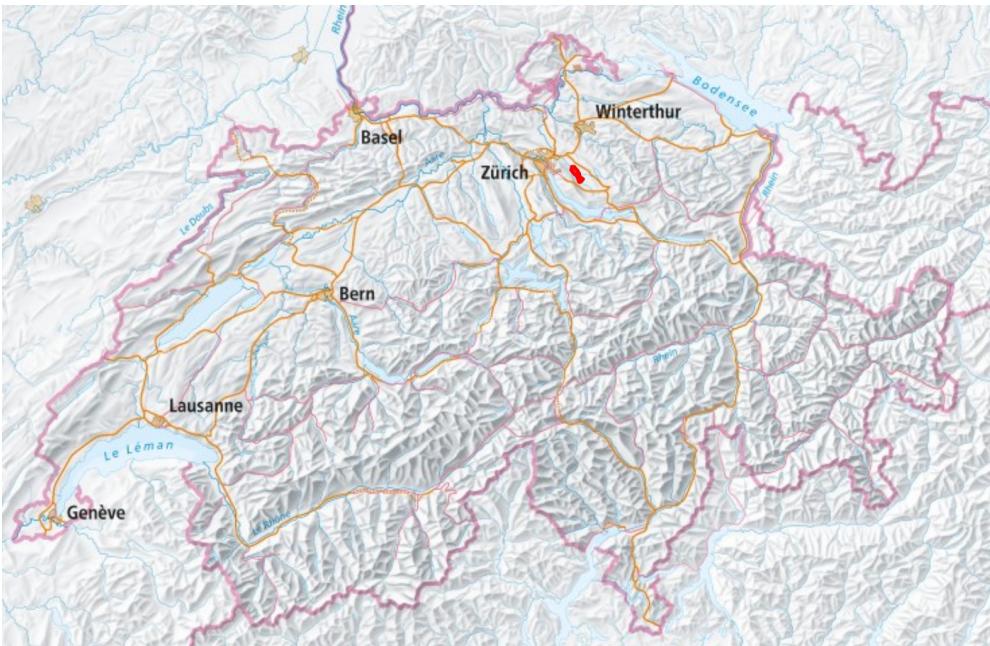
Économies annuelles de 300 à 400 millions de CHF



Coûts annuels totaux du système (bCHF/a)

Source : ETH Zurich, Dr Gianfranco Guidati, Energy Science Center

Capacité de stockage / surface nécessaire

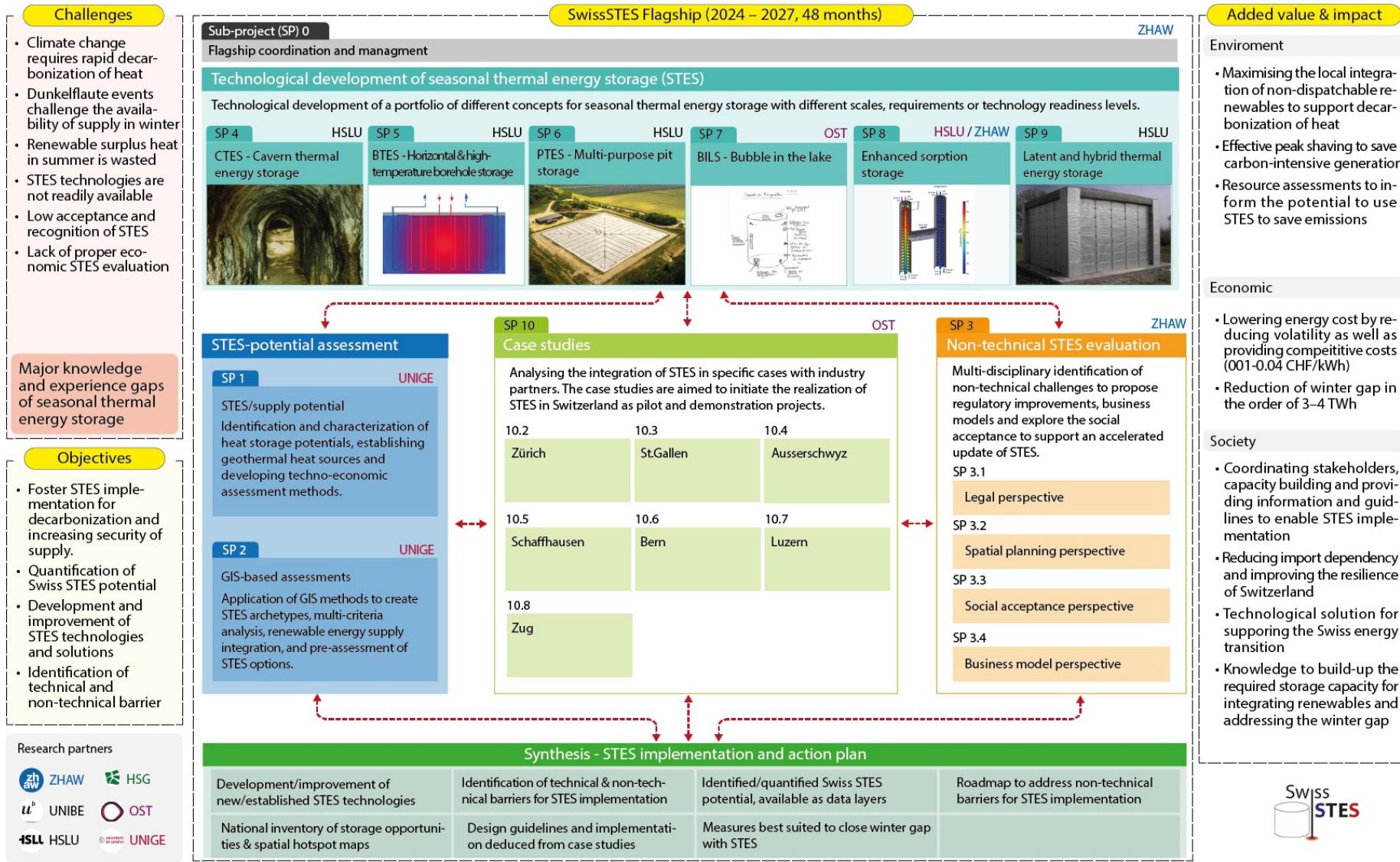


Source : map.geo.admin.ch

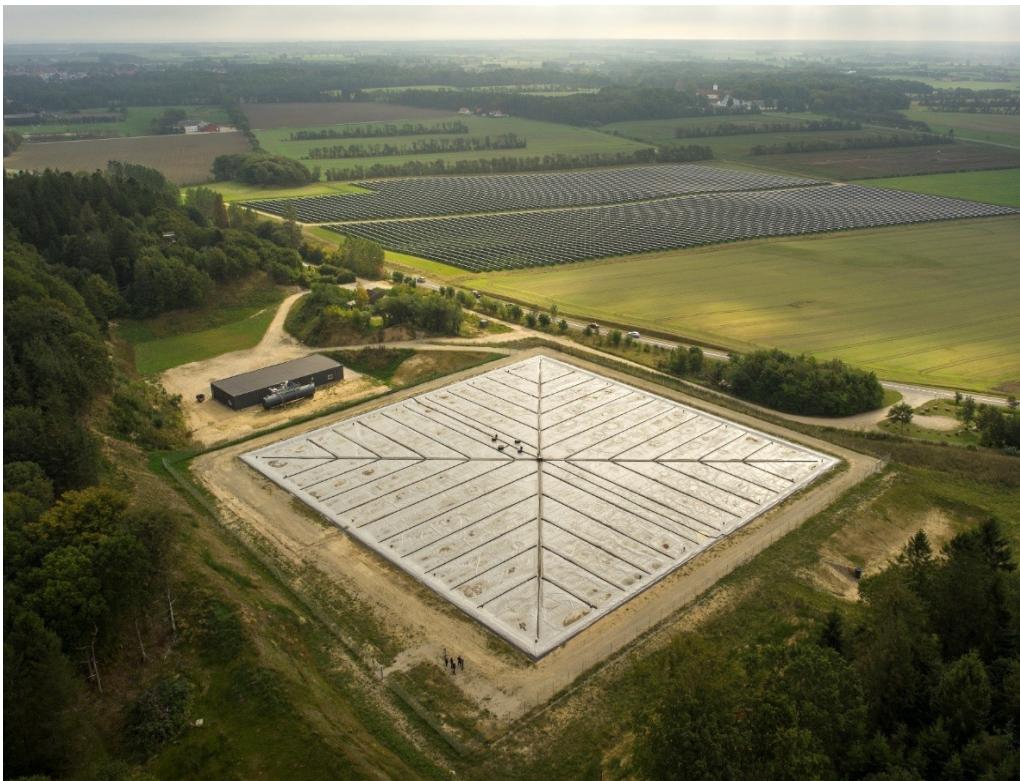
- Des volumes de stockage de l'ordre de 5 à 10 TWh_{th} peuvent réduire les besoins en électricité en hiver jusqu'à 3 TWh_{el} /a.
- Avec des réservoirs souterrains, cela nécessiterait une superficie de 5 à 10 km² (Les lacs de retenue suisses couvrent une superficie de 100 km² pour 8 TWh_{el})
- Cela nécessiterait une superficie de 8,45 km² (par exemple Greifensee ZH)

Défis actuels liés aux STES en Suisse

- **Le potentiel durable** (technique + économique) **des STES** en Suisse n'est que vaguement défini.
- **Exploration insuffisante du sous-sol** : les réservoirs aquifères (ATES) et les cavités artificielles (CTES) pouvant être utilisés pour les STES
- **Les modèles de systèmes énergétiques** ne prennent en compte que partiellement les STES
- **Concurrence entre les technologies de stockage** (PtX) – avec des coûts de capacité de 0,4 EUR/kWh et des coûts moyens de stockage de chaleur de 0,02 EUR/kWh, les STES sont extrêmement rentables
- **Absence de réglementations nationales** en matière d'utilisation rationnelle des ressources et de l'énergie qui encouragent le STES, par exemple dans le chauffage à distance (au lieu du bois)
- **Incertitude juridique** et questions d'acceptation sociale liées aux STES à grande échelle
- ...



Case study Ville de Zurich – Recherche d'emplacements pour des réservoirs souterrains (PTES)



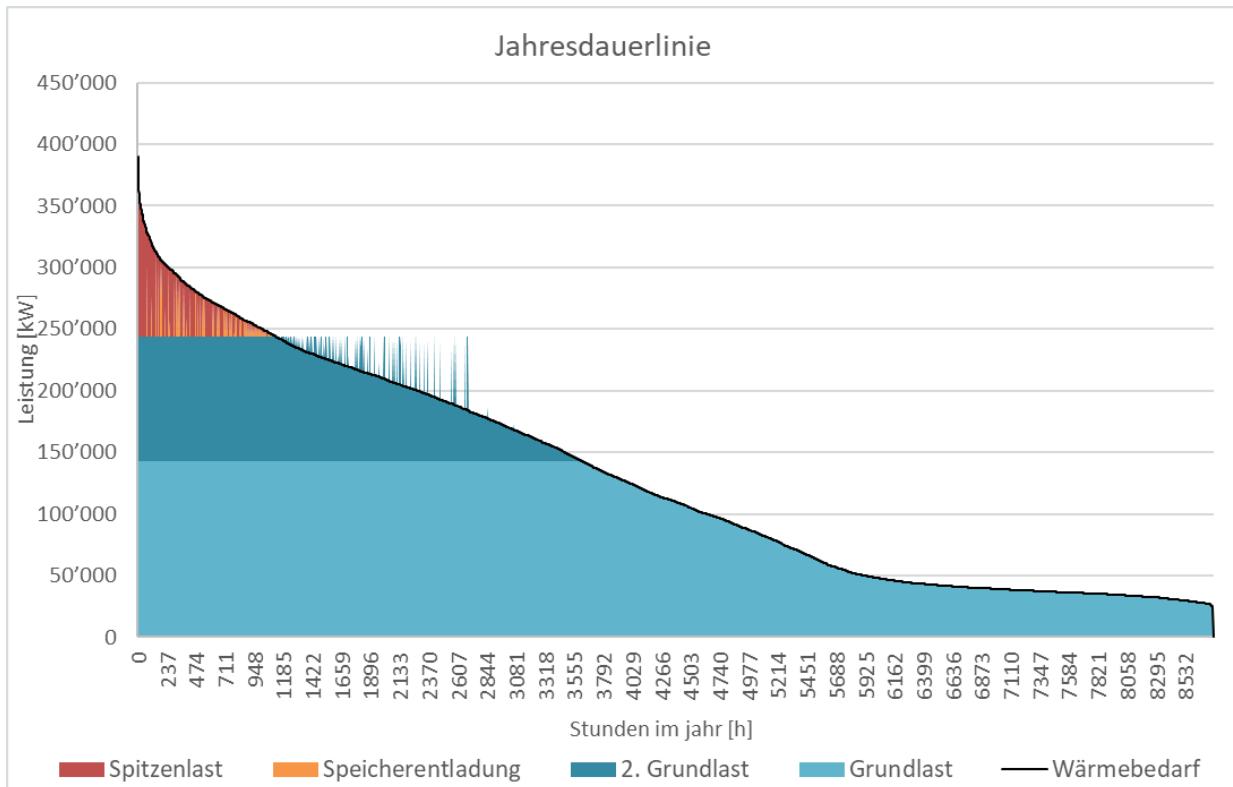
Source : PlanEnergi

Principales questions :

- **Quel est l'effet** de l'intégration de grands réservoirs thermiques dans le réseau de chauffage à distance ?
- **Quelle** devrait être **la taille** d'un réservoir ?
- **Quels sont les coûts supplémentaires** liés à l'intégration des réservoirs ?
- **Où** un tel réservoir pourrait-il être réalisé ?

Case study Ville de Zurich – Stockage journalier

12 000 m³, 3,5 millions de CHF, 21 cycles

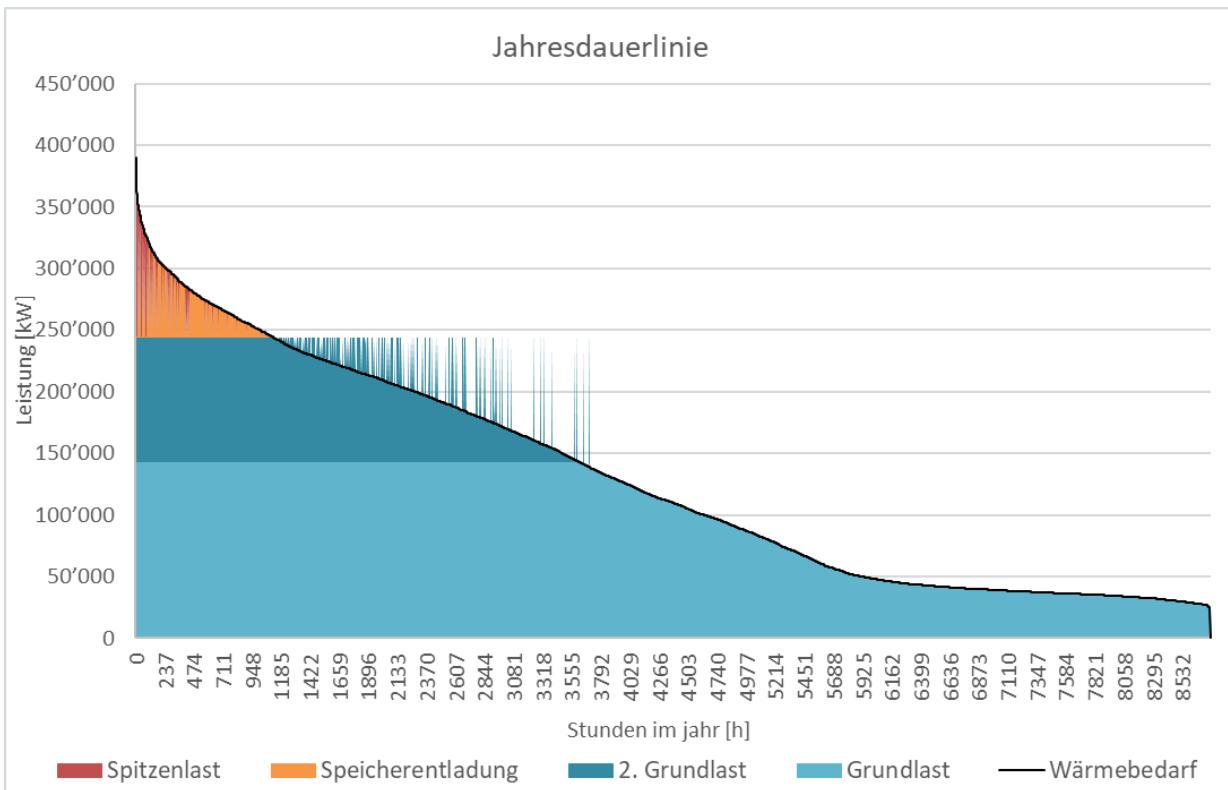


Coûts de stockage spécifiques :
1,4 ct./kWh

Un stockage journalier ne permet de couvrir qu'une petite partie de la charge de pointe fossile.

Case study Zurich – Grand réservoir de 163 000 m³

163 000 m³, 6,7 millions de CHF, 3,5 cycles – couverture de la charge de pointe à 99 %



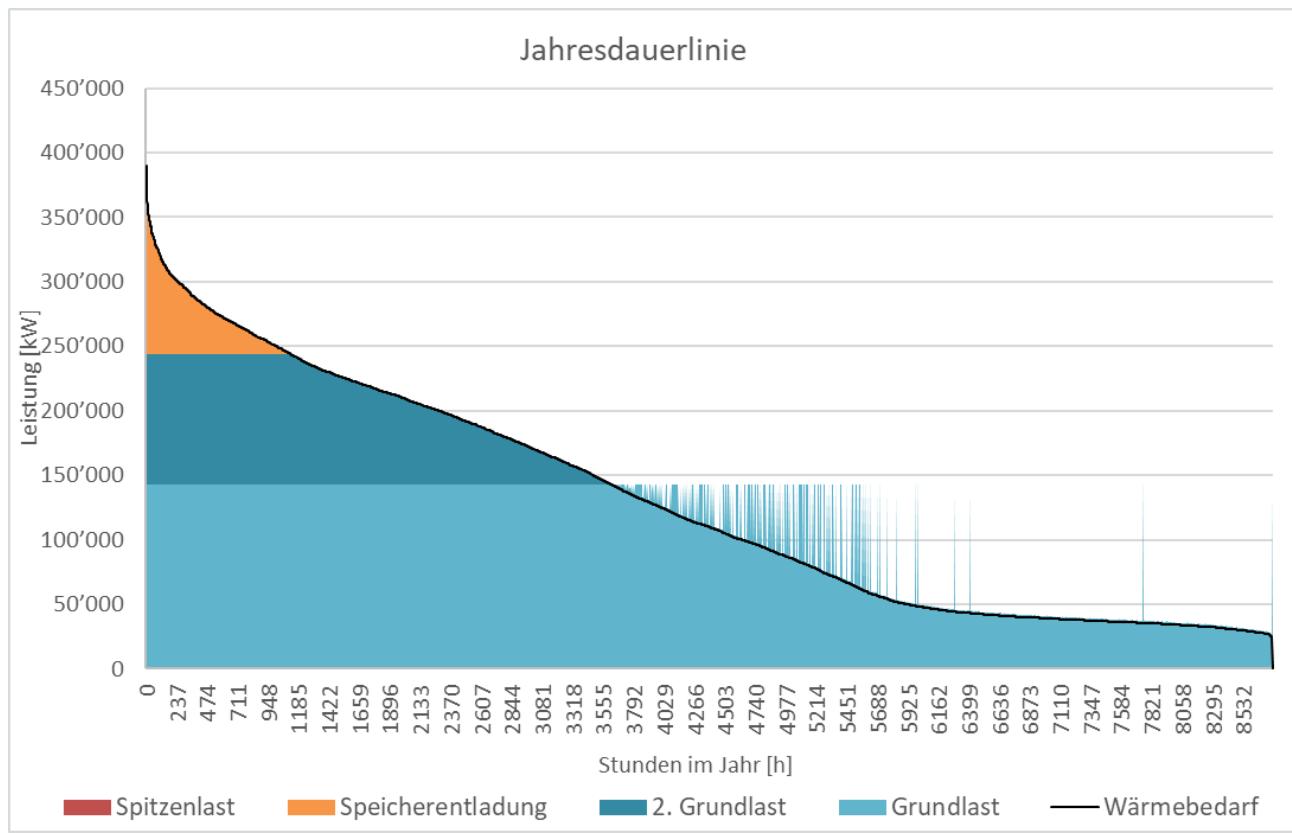
Coûts de stockage
spécifiques : 1,2 ct./kWh

Un grand réservoir de 160 000 m³ permet de couvrir 99 % de la charge de pointe fossile.

Les coûts de stockage spécifiques diminuent même légèrement

Case study Ville de Zurich – Grand réservoir 800 000 m³

800 000 m³, 20 millions de CHF, 1 cycle – couverture de la charge de pointe à 100 %

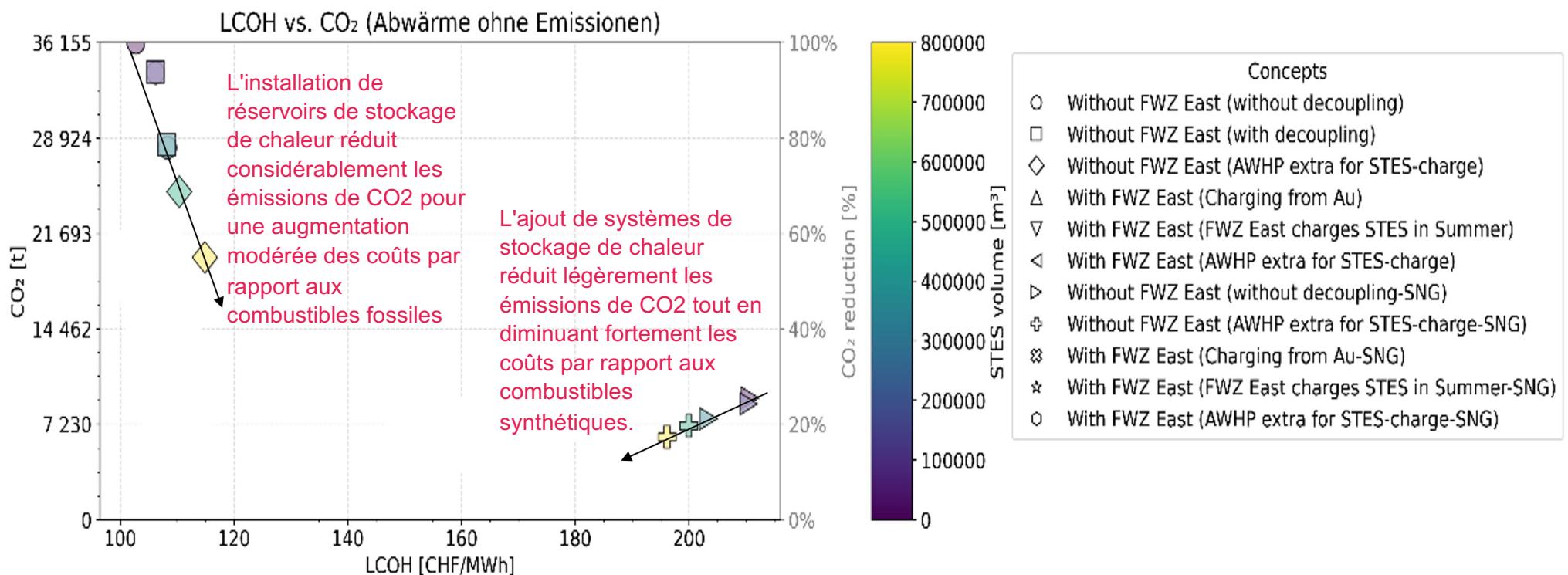


Coûts de stockage
spécifiques : 2,6 ct./kWh

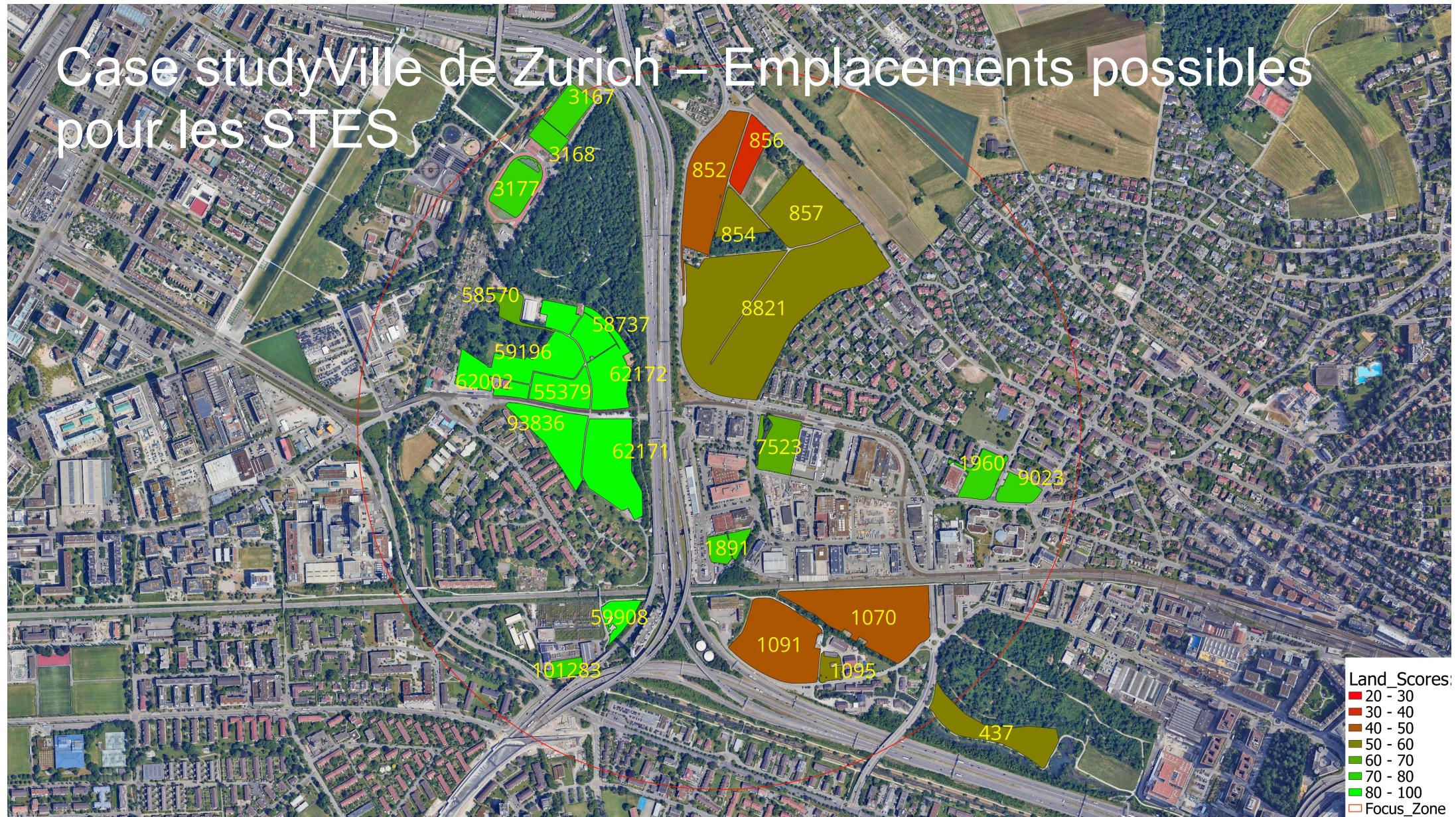
Avec un grand réservoir de 800 000 m³ , 100 % de la charge de pointe fossile peut être couverte uniquement par l'utilisation de la chaleur résiduelle (UIOM).

Les coûts de stockage spécifiques doublent.

Intégration du stockage : coûts vs CO₂ (étude de cas Saint-Gall)



Case study Ville de Zurich – Emplacements possibles pour les STES



Les stockages thermiques sont indispensables, mais où les installer ?

Aspects juridiques liés à la placement de grands stockages thermiques

Les stockages thermiques ne nécessitent généralement pas d'inscription dans le **plan directeur**. Ils devraient toutefois être intégrés de manière proactive dans la planification directrice et la planification énergétique (communale) afin que les besoins en surface et les impacts environnementaux puissent être clarifiés à un stade précoce.

Si nécessaire, les stockages thermiques peuvent être construits **en dehors de la zone à bâtir**.

Actuellement, les stockages thermiques ne sont pas répertoriés comme une catégorie distincte soumise à une **étude d'impact sur l'environnement**. Il n'est pas clair s'ils sont soumis à cette obligation.

La limite de 3 degrés pour les variations de température des **eaux souterraines** protège les cycles écologiques et la qualité de l'eau. Elle a toutefois fait l'objet de peu d'études scientifiques et est peut-être trop restrictive pour les zones souterraines peu problématiques. Elle s'applique néanmoins actuellement aux stockages thermiques et limite leur champ d'application.

Résumé et remarques finales

- **Les STES offrent un potentiel important pour réduire les besoins en électricité en hiver** (- 3 TWh ou – 30 %) et pour couvrir les pics de consommation (substitution des combustibles fossiles) dans le domaine du chauffage à distance.
- **Les STES jouent également un rôle central dans l'intégration de la chaleur résiduelle** (UIOM, centres de données, industrie) et **des nouvelles énergies renouvelables** (solaire)
- L'intégration des STES pour la décarbonisation est moins coûteuse que la substitution des combustibles fossiles par le SNG (Synthetic Natural Gas). De plus, le SNG doit être stratégiquement réservé à d'autres secteurs que celui du chauffage.
- En Suisse, l'**extension du réseau de chauffage à distance** est fortement encouragée et offre une **occasion unique de promouvoir également la planification des STES dans ce contexte**.
- L'extension des STES nécessite **une sécurité juridique et une planification prévisionnelle**, par exemple dans le cadre de la planification directrice régionale.

Prof. Dr Luca Baldini
Directeur de l'Institut IBP pour la technologie et les processus de construction
Chef du groupe BEST – Building Energy Systems and Technologies

luca.baldini@zhaw.ch
<http://www.zhaw.ch/ibp>
<http://www.linkedin.com/company/zhaw-ibp>

De quels systèmes de stockage d'énergie la Suisse a-t-elle besoin pour garantir un approvisionnement énergétique sûr et économiquement efficace ?

2 décembre 2025, Science et Politique à table

Ingmar Schlecht, ZHAW Winterthur, Centre pour l'environnement et l'énergie

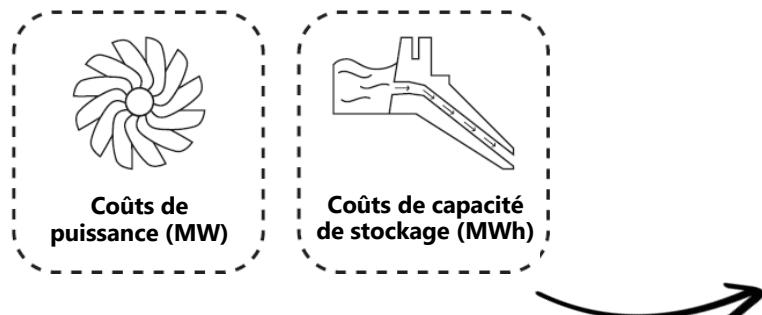
Zürcher Hochschule
für Angewandte Wissenschaften



Avec des contenus issus d'une étude menée avec la
HSLU et Consentec

Contexte : coûts des différentes technologies de stockage

Les systèmes de stockage comportent deux composantes de coûts



Chaque technologie a son « domaine de spécialité »

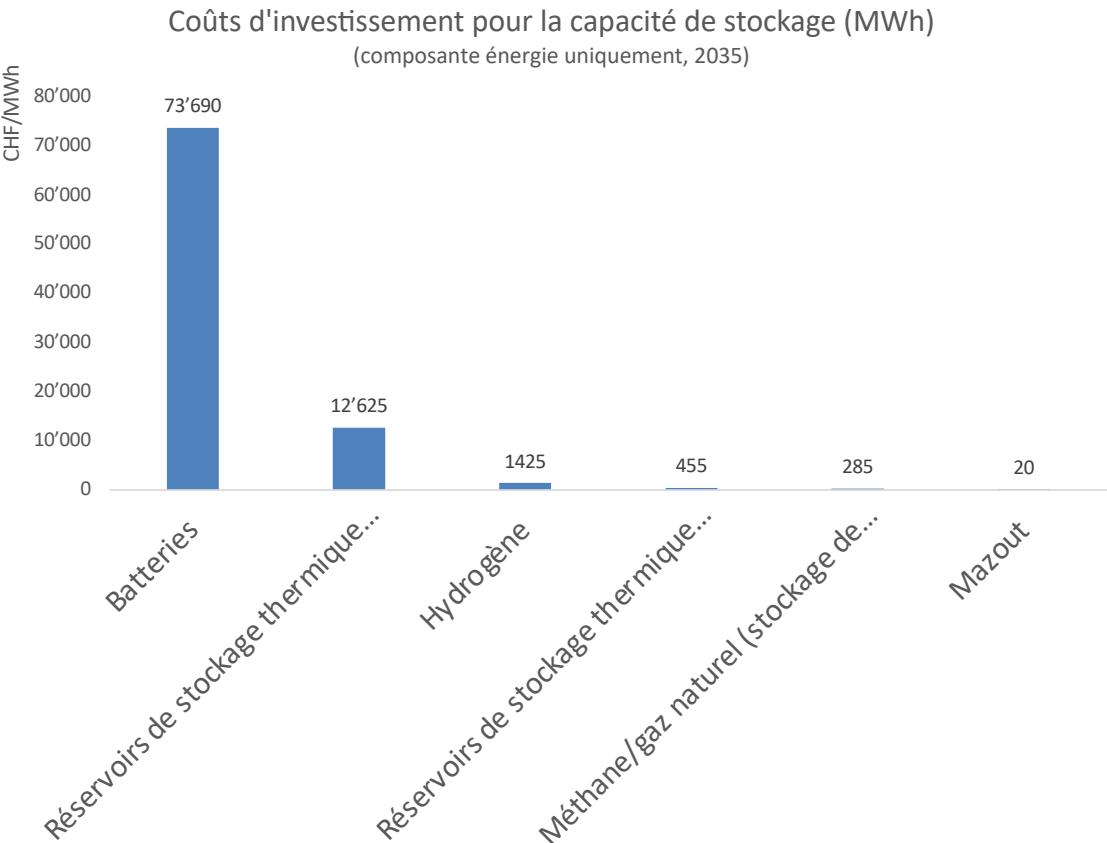
- Faible coût de capacité de stockage (p. ex. mazout)
- Faibles coûts de puissance (p. ex. batteries)

Stockage saisonnier = faibles coûts de capacité de stockage

- Gagner de l'argent grâce aux différences de prix saisonnières

Stockage à court terme = faibles coûts de puissance

- Gagner de l'argent grâce aux différences de prix horaires



Modélisation des besoins en stockage

De quels modèles a-t-on besoin ?

- Modèles de systèmes énergétiques : tout mettre dans la balance
- Techno-économiques : aucune politique ni préférence n'est représentée
- Haute résolution temporelle et spatiale

Deux objectifs d'optimisation possibles

1. Approvisionnement énergétique moins coûteux
2. Approvisionnement énergétique plus résilient
3. Décarbonisation de l'approvisionnement énergétique (\rightarrow *supposée dans tous les scénarios*)

... ou une combinaison de ces objectifs

Objectif 1 : Approvisionnement énergétique moins coûteux

Nouveaux systèmes de stockage à court terme (digression)

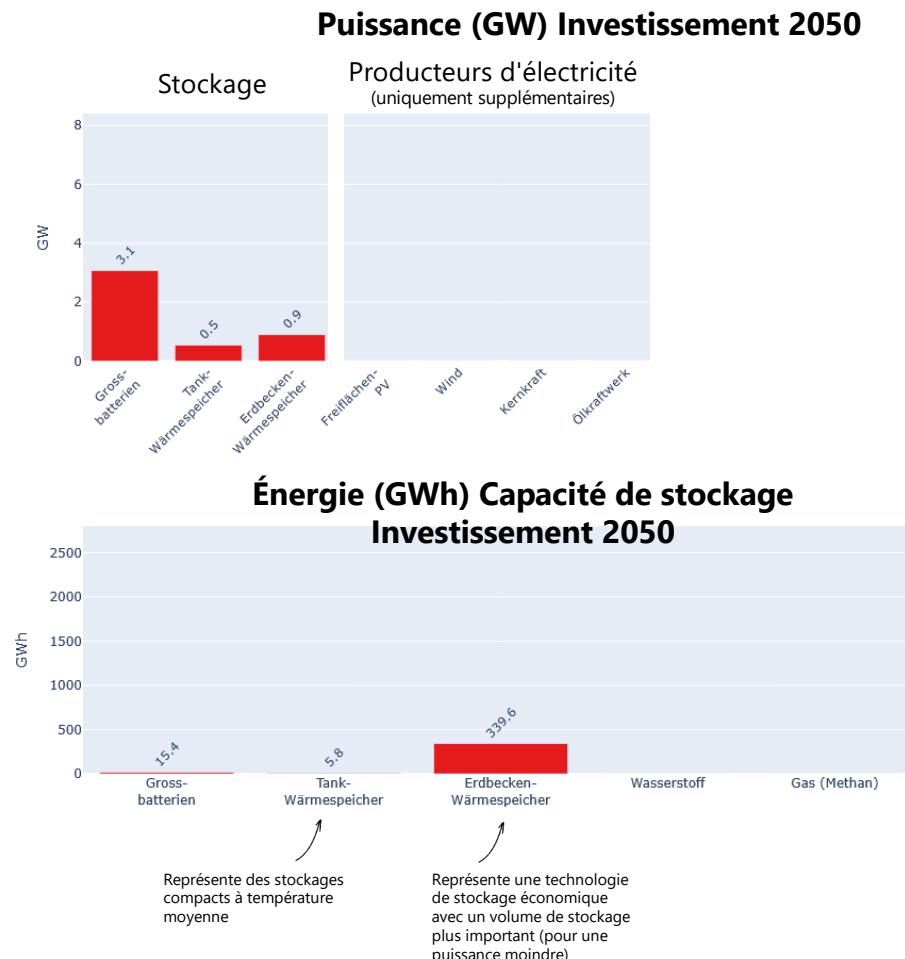
- **Les batteries de grande capacité** sont devenues très abordables et sont déjà rentables dans le cas de base.
- **Les systèmes de stockage domestiques sont inutilement coûteux** et sont dominés par les batteries de grande capacité. De plus, ils sont aujourd'hui utilisés de manière inefficace.

Stockage saisonnier

- **Les stockage de chaleur** (tels que les bassins souterrains et, le cas échéant, les aquifères) sont la seule technologie de construction neuve rentable
- Quantité toutefois modeste : correspond à la consommation électrique d'une demi-journée

Selon nos résultats, **le stockage de gaz et d'hydrogène n'est pas** pertinent pour la Suisse.

- L'énergie hydraulique couvre déjà bien les pics de consommation.
- Le défi de la Suisse réside dans le bilan énergétique saisonnier : les énergies renouvelables, les importations et les stockages thermiques suffisent pour cela, pour un système peu coûteux



Objectif 2 : un approvisionnement énergétique plus robuste

Scénario

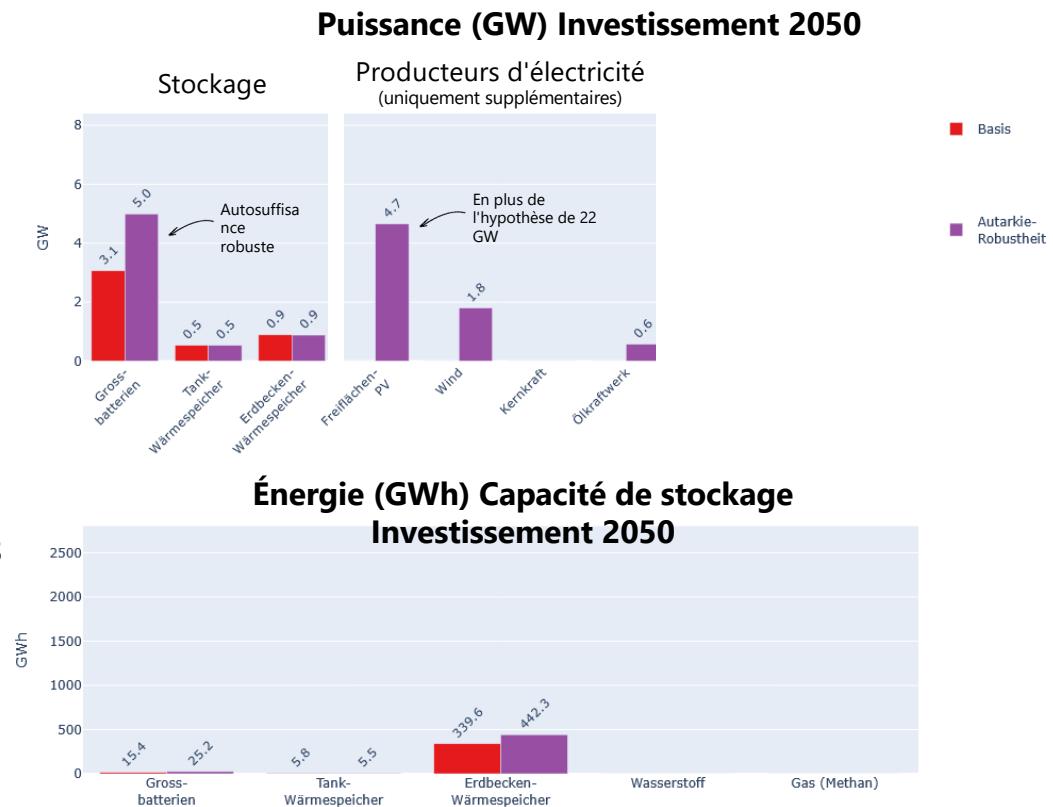
- Probabilité de 3 % que la Suisse doit être autosuffisante

Stockage à court terme

- Davantage de batteries de grande capacité, en combinaison avec le photovoltaïque et l'éolien

Stockage saisonnier

- Selon les résultats du modèle, **le stockage de gaz et d'hydrogène** reste *peu* rentable : il existe également des alternatives moins coûteuses pour la prévention des crises
- Besoins éventuellement faibles dans l'industrie – mais la majeure partie peut être électrifiée
- Les centrales à double combustible** peuvent être utiles pour faire face aux crises d'approvisionnement en gaz, avec les stocks obligatoires existants pour **le mazout** (éventuellement synthétique)



Instruments politiques pour le développement du stockage

Tarifs dynamiques

- Problème actuel : des prix artificiellement plats, car le stockage nécessite des différences de prix

Considérer le système énergétique dans son ensemble

- (Le levier le plus important pour la décarbonisation est l'électrification : **pompes à chaleur et mobilité électrique !**)
- Intégrer les stockages saisonniers dans la planification énergétique

Centrales électriques de réserve avec réservoirs de stockage de pétrole

- Les stocks obligatoires de pétrole ne seront maintenus que s'ils sont fixés de manière absolue à l'avenir, plutôt que de manière relative à la demande

Autres spécialistes (en plus des orateurs)



Bettina Schaefli,
Hydrologie, Université de
Berne ; Présidente
Commission d'hydrologie



Annette Zoller-Eckenstein,
Institut de la régulation et de
la concurrence, ZHAW



Tilman Schildhauer,
Sources d'énergie et des
processus durables, Institut
Paul Scherrer



Mario Paolone, Laboratoire
des systèmes électriques
distribués, EPFL