



« Le stockage souterrain dans le contexte de la transition énergétique »

Maîtrise des risques et impacts

Principaux contributeurs : Franz LAHAIE, Philippe GOMBERT, Céline BOUDET.



maîtriser le risque
pour un développement durable

Plan de la présentation

1. Introduction : la transition énergétique et le rôle du stockage souterrain
2. Les formes actuelles de stockage souterrain et les produits stockés
3. Les solutions techniques envisagées pour le stockage souterrain de l'énergie
4. Les verrous scientifiques et technologiques à lever et les besoins en R&D
5. L'expérience de l'INERIS dans le domaine des stockages souterrains et son rôle dans l'accompagnement de la filière stockage de l'énergie
6. Conclusion

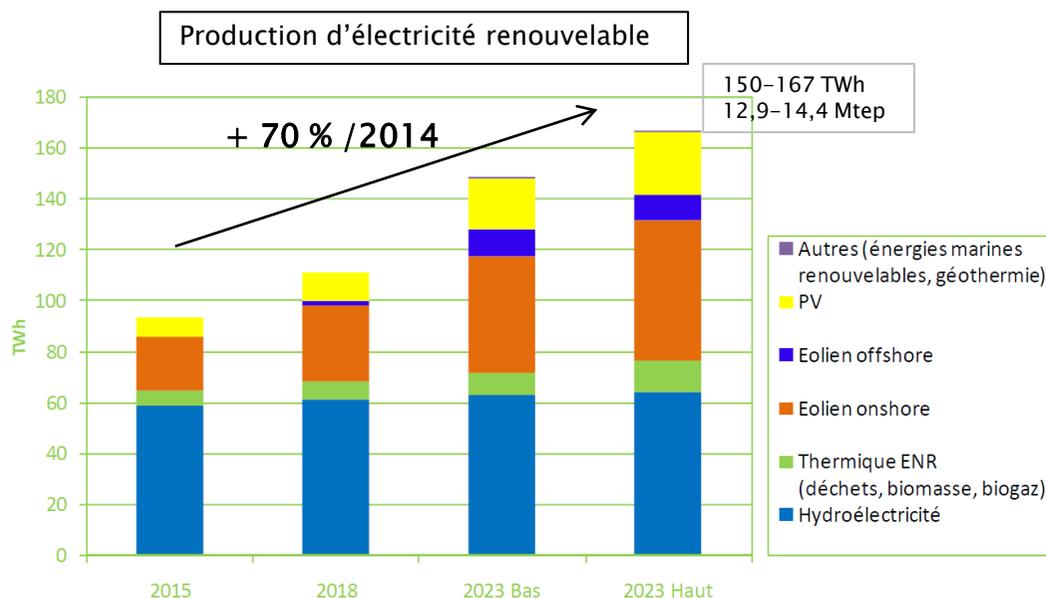
- 1 -

Introduction : La transition énergétique et l'intérêt du stockage souterrain de l'énergie

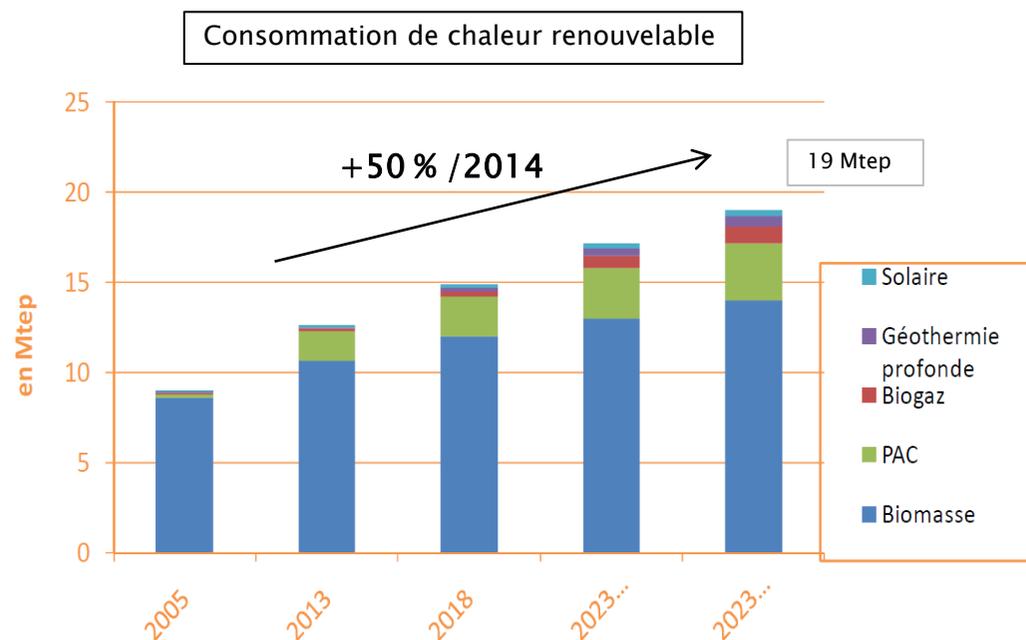
- Rappel des principaux objectifs de la loi de transition énergétique
- En quoi le stockage souterrain peut-il offrir une opportunité intéressante

Les principaux objectifs de la LTECV* du 17 août 2015

- ❑ Réduire la consommation énergétique (-20% d'ici 2030 /2012, 50% d'ici 2050)
- ❑ Réduire les émissions de gaz à effet de serre (-40% d'ici 2030 /1990, /4 d'ici 2050)
- ❑ Réduire la consommation d'énergies fossiles (-30% en 2030 /2012)
- ❑ Augmenter la part des renouvelables (32% de la consommation d'ici 2030, 15% en 2014)



Programmation Pluriannuelle de l'énergie (2016)



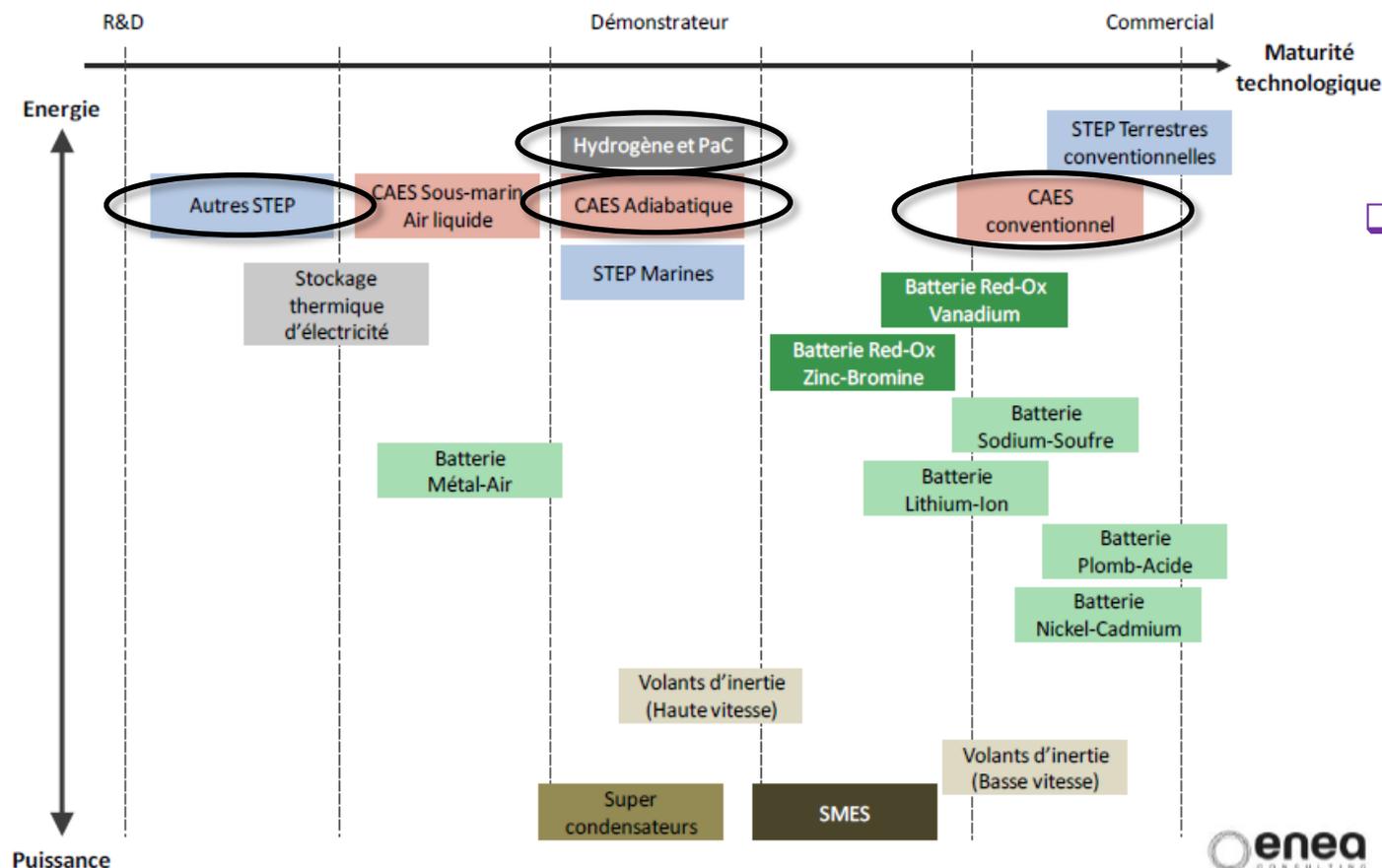
* LTECV = Loi relative à la Transition Energétique pour la Croissance Verte

Un besoin accru de stockage d'énergie

❑ Effets attendus d'un développement important des énergies renouvelables :

- Une décentralisation de la production d'énergie
- Des fluctuations plus importantes de la production d'électricité → besoin accru de stockage

❑ Un grand nombre de technologies de stockage existent ou sont à l'étude :



❑ Exemples :

- Batteries
- Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)
- Stockage souterrain

Les atouts du stockage souterrain

☐ Avantages :

- Grands volumes (plusieurs centaines de milliers de m³)
- Fortes pressions (quelques centaines de bar)
- Capacité à stocker la chaleur
- Sécurité favorisée / stockage de surface
- Faible emprise au sol
- Expérience acquise dans le domaine des stockages de gaz et d'hydrocarbures (plus de 600 sites dans le monde)

☐ Inconvénients :

- Perturbations du milieu souterrain (chaleur, pression, interactions géochimiques)
- Vulnérabilité des ouvrages d'accès
- Difficultés d'accès et d'intervention au fond en cas de problème
- Risques liés aux pressions plus élevées en sous-sol

- 2 -

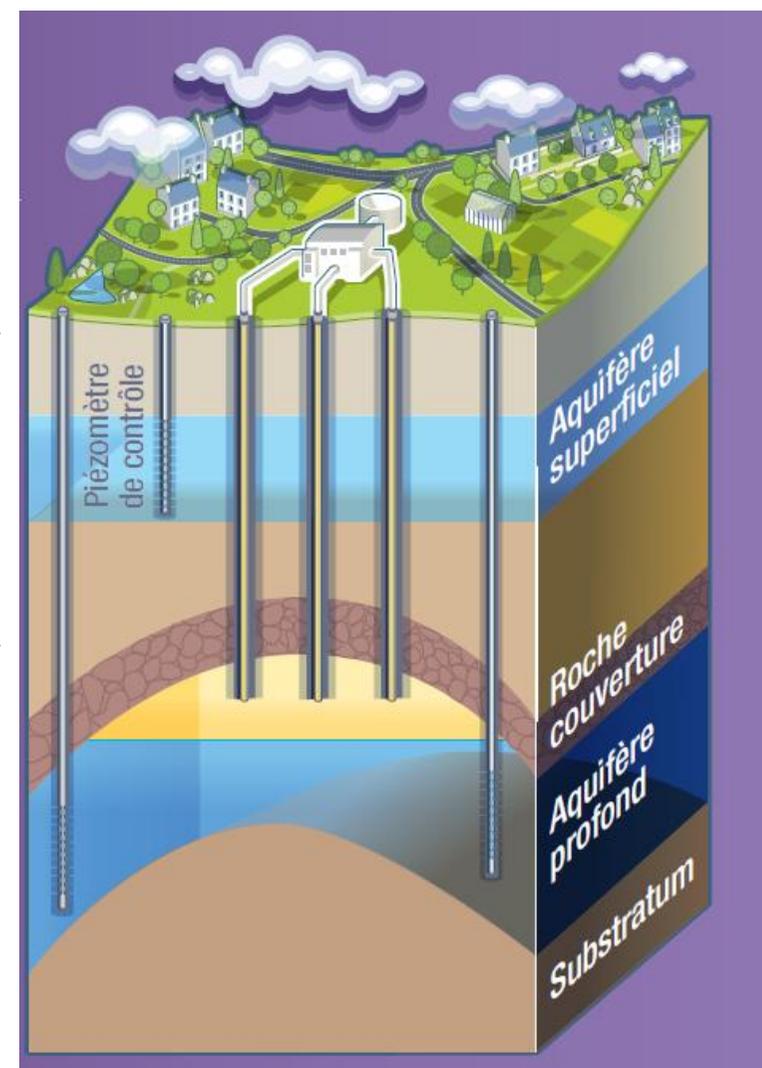
Les formes de stockage souterrain et les produits stockés

- Trois types de stockages :
 - ✓ en milieux poreux
 - ✓ en cavités salines
 - ✓ en cavités minées

Le stockage en milieux poreux

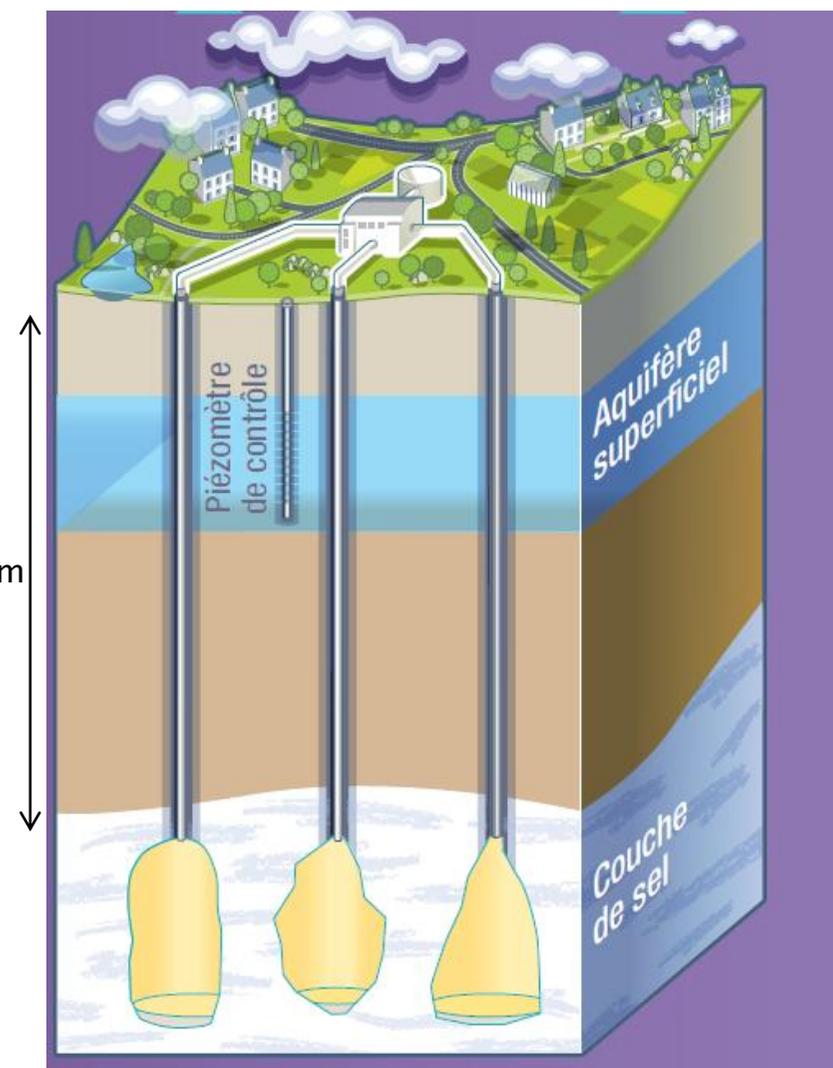
- ❑ Principe : utiliser l'espace poreux naturel présent dans des roches poreuses et perméables
- ❑ Etanchéité assurée par une roche imperméable (couverture)
- ❑ Deux types :
 - Aquifères profonds
 - Anciens gisements d'hydrocarbures
- ❑ Produits stockés :
 - Gaz naturel
 - CO₂ (R&D essentiellement)
- ❑ Forme de stockage prédominante dans le monde (56% en France)
- ❑ Avantages :
 - Grands volumes (plusieurs milliards de m³)
 - Retour d'expérience ancien : 1956 en France
- ❑ Inconvénients :
 - Forte inertie (stockage saisonnier)

500-2000 m



Le stockage en cavités salines

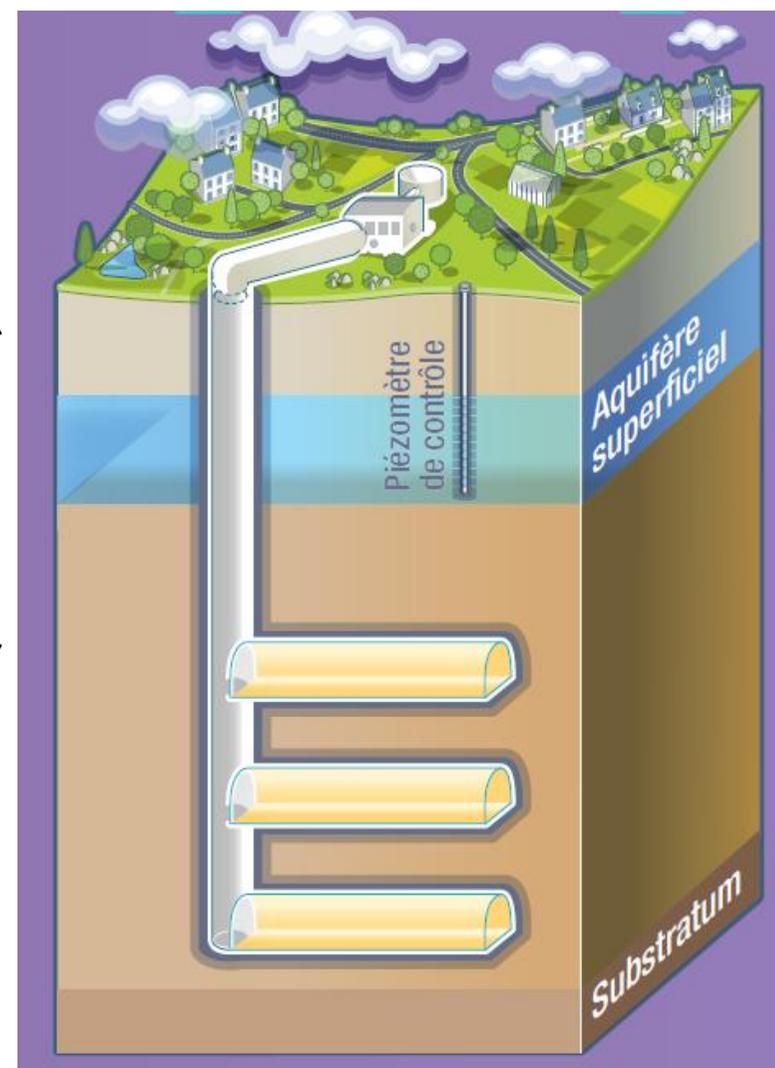
- ❑ Principe : créer des cavités par dissolution au sein d'un massif de sel
- ❑ Etanchéité assurée par le sel (roche imperméable)
- ❑ Produits stockés :
 - Gaz naturel
 - Hydrocarbures liquides ou liquéfiés (GPL)
 - Produits chimiques (éthylène, propylène)
 - Hydrogène, air comprimé
- ❑ 2^{ème} forme de stockage la plus utilisée dans le monde (26% en France)
- ❑ Avantages :
 - Tous types de produits inertes vis-à-vis du sel
 - Grands volumes (jusqu'à 1 Mm³/cavité)
 - Réactivité (adapté aux pics de demande)
- ❑ Inconvénients :
 - Gisements de sels pas présents partout
 - Solubilité du sel en cas de communication avec des eaux souterraines (scénario accidentel)



Le stockage en cavités minées

- ❑ **Principe : créer des cavités par creusement mécanique au sein de roches peu profondes (<200 m)**
- ❑ **Deux types :**
 - Revêtues : étanchéité assurée par un revêtement
 - Non revêtues : étanchéité assurée par la roche encaissante et en maintenant la pression dans la cavité en dessous de la pression hydraulique environnante
- ❑ **Produits stockés :**
 - Hydrocarbures liquides ou liquéfiés (GPL)
 - Gaz naturel (cavités revêtues)
 - Air comprimé
- ❑ **3^{ème} forme de stockage la plus utilisée dans le monde (18% des sites en France)**
- ❑ **Avantages :**
 - Réactivité (adapté aux pics de demande)
- ❑ **Inconvénients :**
 - Volumes relativement faibles / aux autres formes de stockage
 - Coût de creusement (ouvrages d'accès de dimensions importantes)

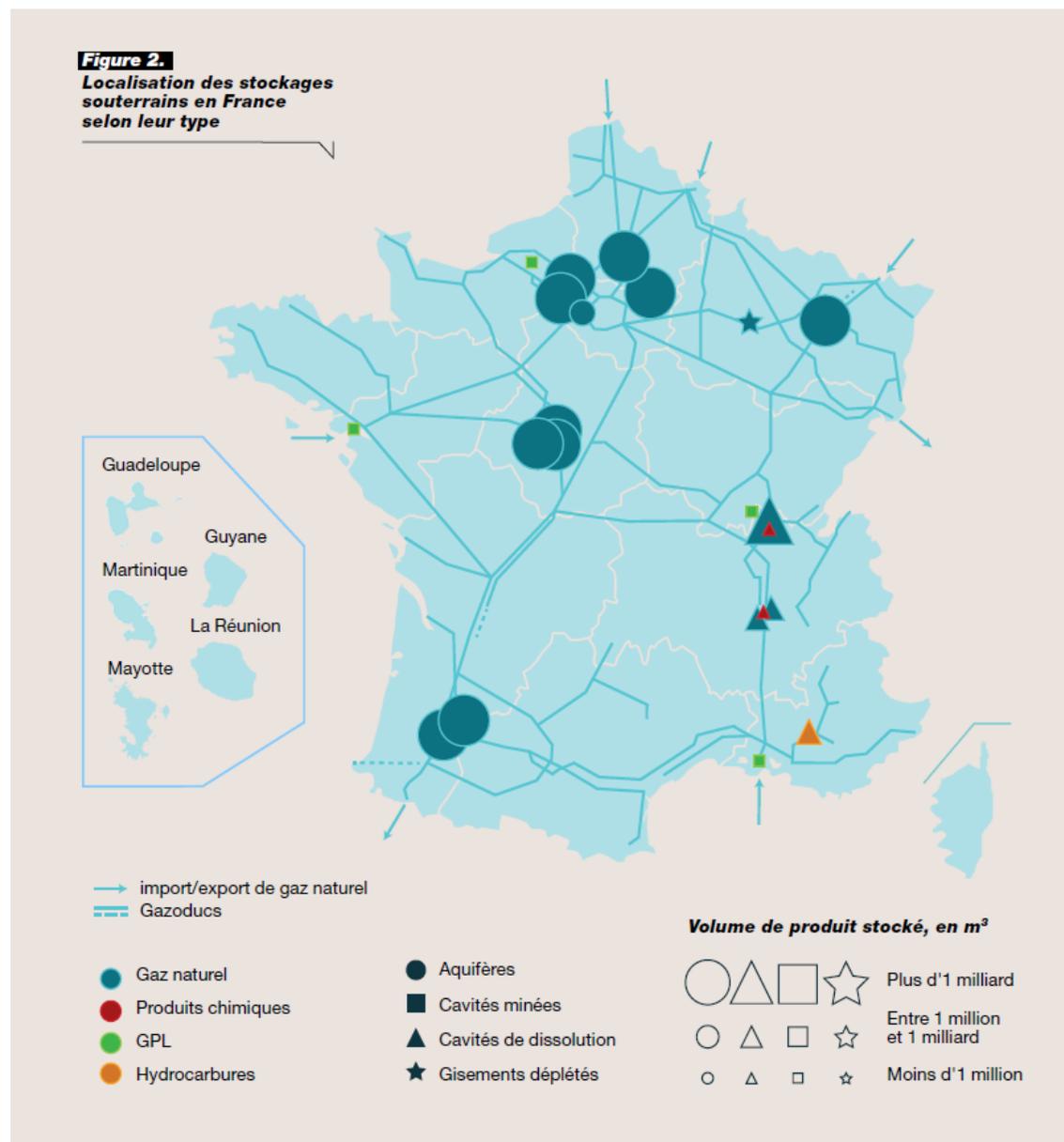
80-150 m



Situation des stockages souterrains en France

□ 23 sites opérationnels :

- 12 en aquifères
- 6 en cavités salines (78 cavités)
- 4 en cavités minées (9 cavités)



- 3 -

Les solutions potentielles de stockage souterrain de l'énergie

Plusieurs solutions sont à l'étude ou déjà opérationnelles :

- Stockage d'air comprimé
- Stockage d'hydrogène
- Stations de Transfert d'Énergie et de Pompage (STEP) souterraines
- Stockage sous forme thermique

Le stockage souterrain d'air comprimé

❑ Principe

- Utiliser l'électricité pour comprimer de l'air et le stocker dans un réservoir souterrain (cavité saline ou minée). L'air est ensuite libéré (détendu) entraînant une turbine qui régénère de l'électricité

❑ Deux types de procédés :

- Stockage conventionnel (CAES) : chaleur de compression non stockée → rendement : 40-50%
- Stockage adiabatique (AA-CAES) : chaleur de compression stockée → rendement théorique : 70%

❑ Réalisations :

- Huntorf (Allemagne) 290 MW, depuis 1979
- McIntosh (Etats-Unis) 110 MW, depuis 1991

❑ Avantages:

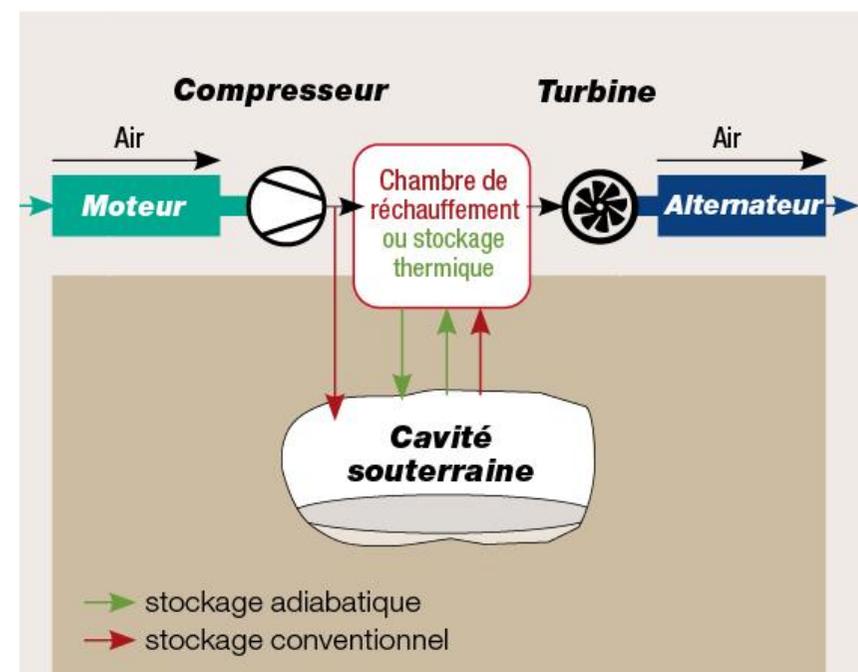
- Fortes puissances : plusieurs centaines de MW

❑ Inconvénients / difficultés :

- Pressions élevées (jusqu'à 200 bar)
- Stockage de la chaleur (600°C)

❑ Intérêt énergétique :

- Avec 100 cavités de 100 000 m³, 100 bar, 1 cycle/jour, rendement 50 % on peut stocker ~5 TWh/an, soit 1,5% de la production annuelle d'énergies renouvelables en 2020
- Solution adaptée pour un stockage à l'échelle locale ou régionale



Le stockage souterrain d'hydrogène

❑ Principe :

- Utiliser l'électricité pour produire de l'hydrogène (par électrolyse), qui est ensuite comprimé et stocké dans un réservoir souterrain (cavité saline). L'hydrogène est soutiré selon la demande

❑ Plusieurs utilisations possibles de l'hydrogène :

- Usage direct : industrie, mobilité
- Injection dans le réseau de gaz (jusqu'à 10%)
- Production de CH₄ (méthanation)
- Production d'électricité
- Rendement : 30-60% selon l'utilisation finale

❑ Réalisations :

- Aucune pour le stockage d'énergie
- 4 stockages en cavité salines pour l'industrie chimique (3 Etats-Unis, 1 Royaume-Uni)

❑ Avantages :

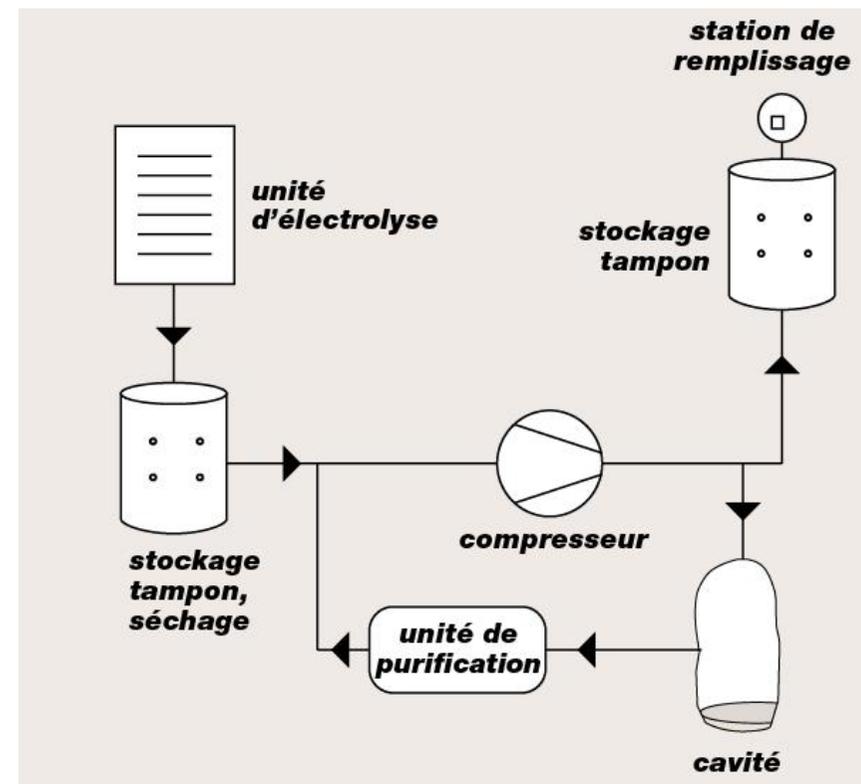
- Forte densité énergétique de l'hydrogène

❑ Inconvénients / difficultés

- Maîtrise de l'étanchéité (molécule d'H₂ très petite)
- H₂ = gaz inflammable et explosible

❑ Intérêt énergétique :

- Avec 100 cavités de 500 000 m³, 200 bar, 2 cycles/mois, rendement 50 % on peut stocker ~360 TWh/an, soit la totalité de la production annuelle d'EnR en 2020
- Solution adaptée pour un stockage aux échelles locale, régionale ou nationale



Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

□ Principe :

- 2 réservoirs hydrauliques à 2 niveaux permettant des transferts de l'un vers l'autre
- apparu en 1976 en France

□ Réalisations :

- ~400 STEP de surface dans le monde
- 6 en France (dont la + grande d'Europe: 1800 MW)

CONCEPT DE STEP SOUTERRAINE :

⇒ 1 ou 2 réservoir(s) souterrain(s)

□ Avantages :

- impact environnemental faible à modéré
- réutilisation de cavités souterraines

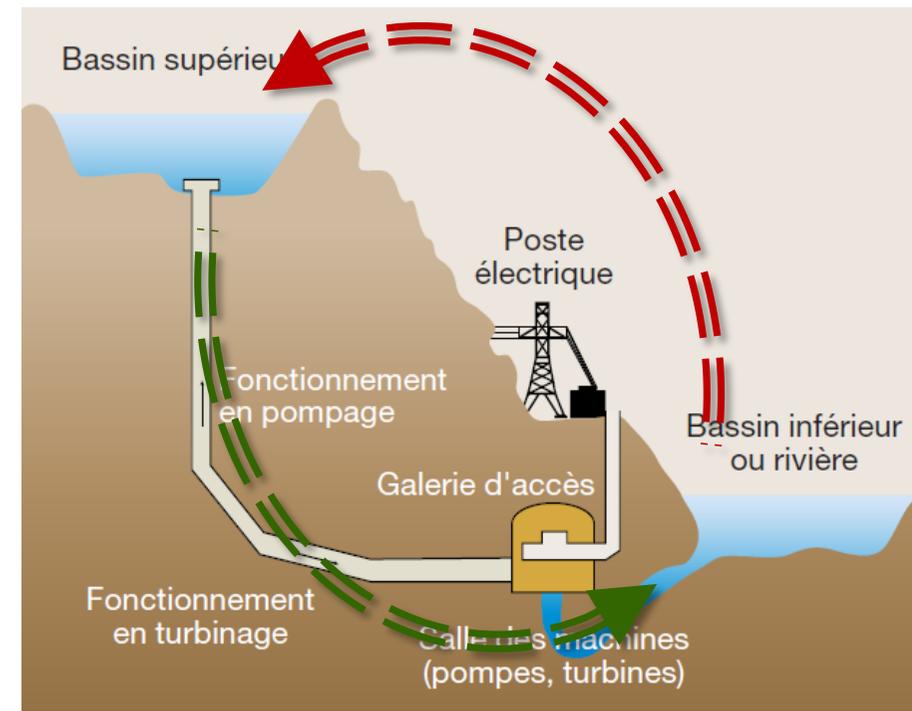
□ Inconvénients / difficultés :

- nécessite un accès sécurisé aux cavités souterraines
- pas encore de réalisation dans le monde

□ Intérêt énergétique :

- avec 100 STEP souterraines de 100 000 m³, dénivelé 500 m, 1 cycle/jour, rendement 70%, on peut stocker ~4 TWh/an, soit ~1% de la production d'énergies renouvelables en 2020
- solution adaptée pour un stockage à l'échelle locale ou régionale.

pompage en cas de surproduction d'énergie ou de sous-consommation



turbinage en cas de déficit de production d'énergie ou de pic de consommation

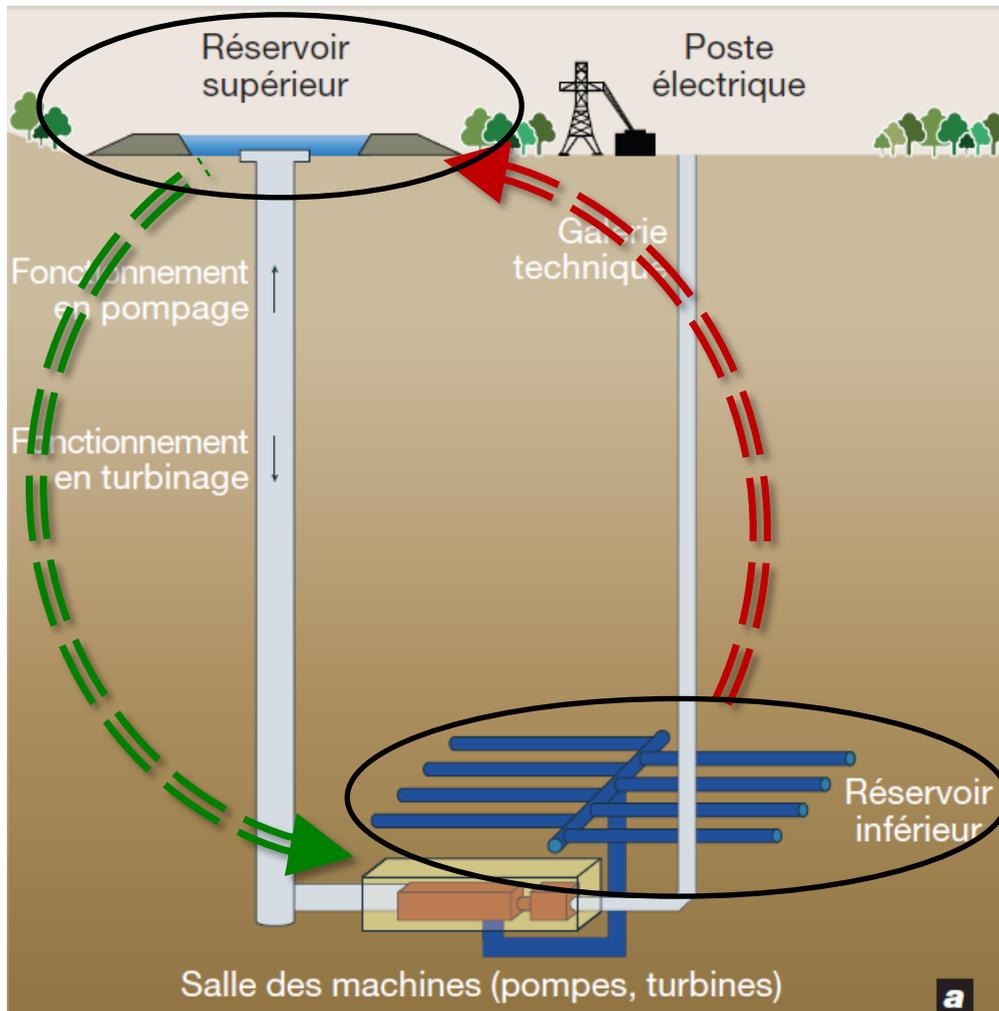
Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP)

Les STEP semi-souterraines et souterraines avec réutilisation de cavités

□ Deux types de procédés :

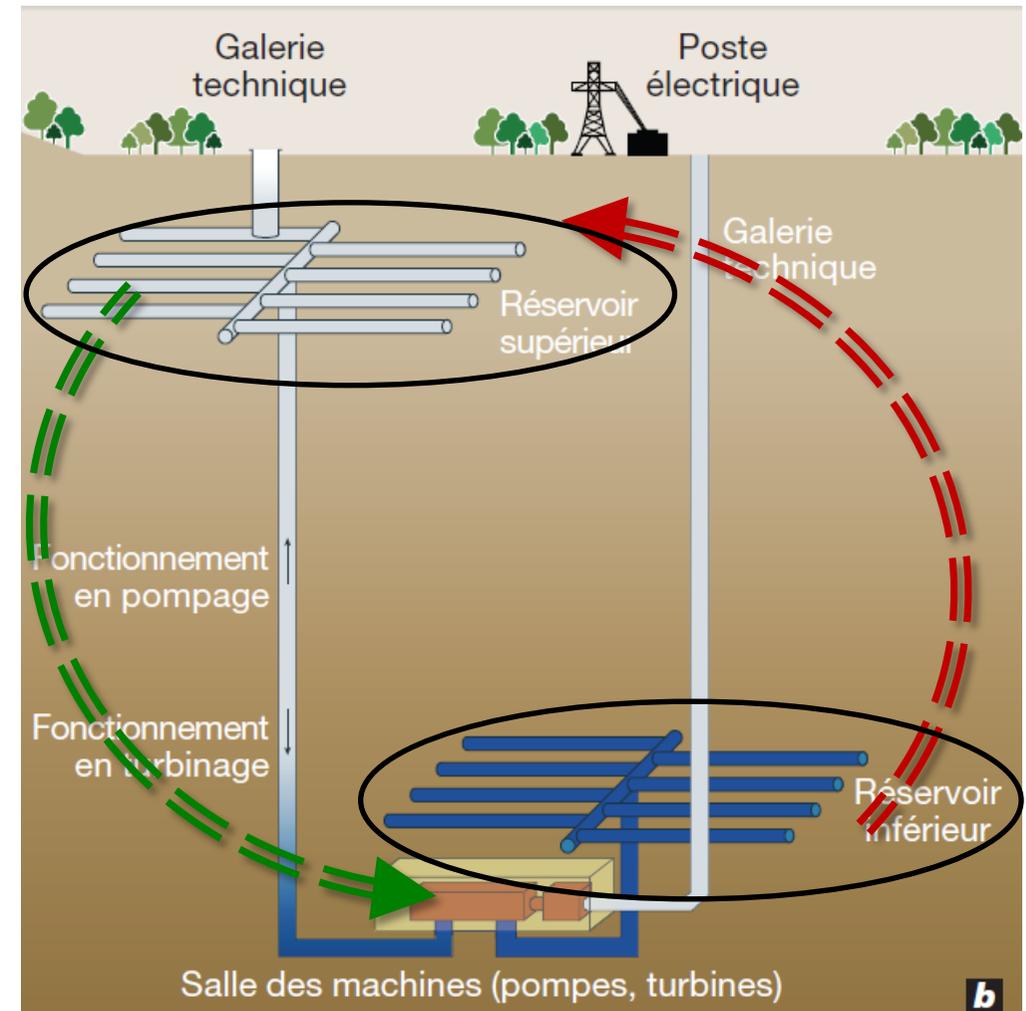
STEP semi-souterraine :

- un réservoir de surface + un réservoir souterrain
- emprise au sol modérée



STEP souterraine :

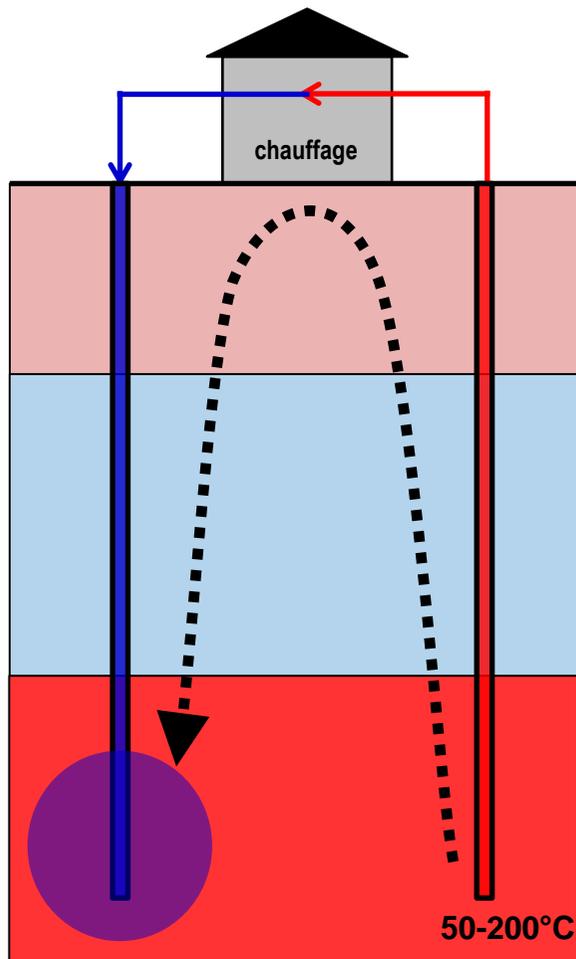
- deux réservoirs souterrains à différentes profondeurs
- emprise au sol faible .



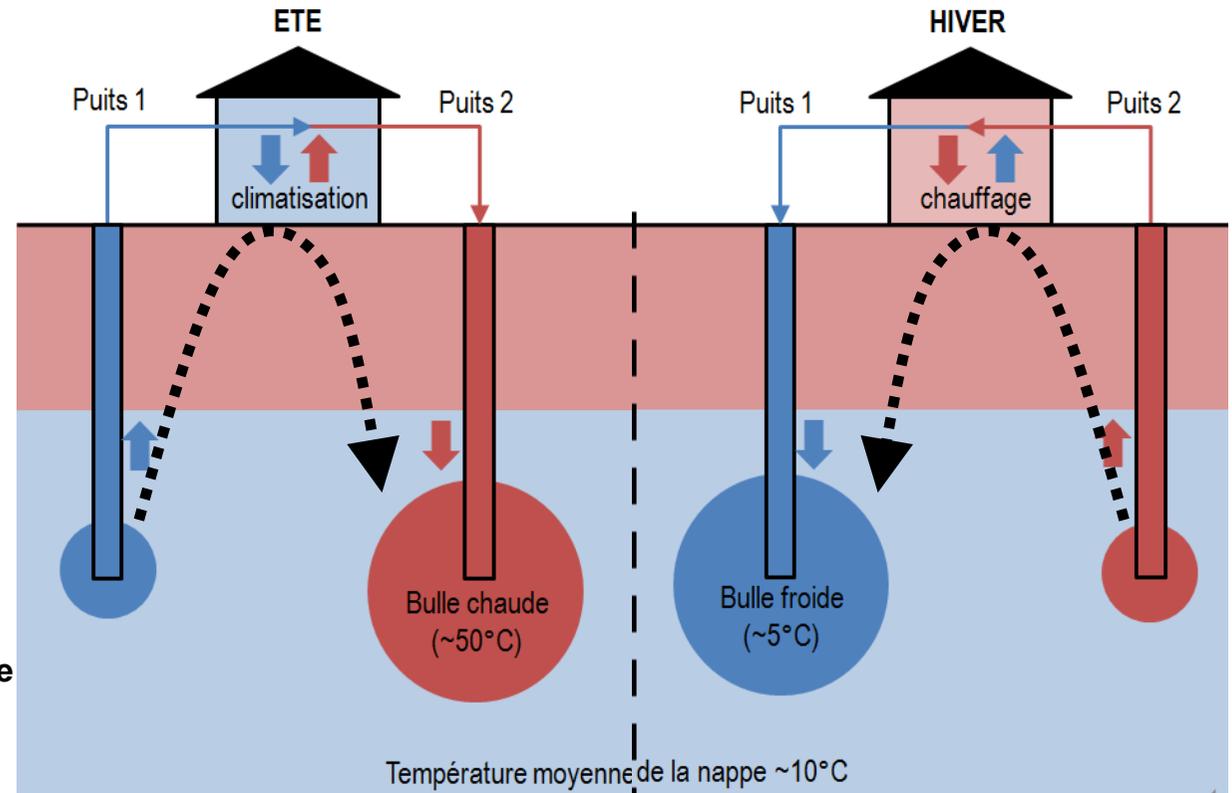
Le stockage souterrain d'énergie thermique

Principe et différence avec la géothermie

- ❑ **Géothermie** : utilisation de la chaleur naturelle renfermée dans le sous-sol
- ❑ **Stockage thermique** : utilisation du sous-sol pour y stocker de l'énergie thermique (chaleur/froid).



← Réservoir profond de chaleur



Réservoir superficiel de stockage →

Le stockage souterrain d'énergie thermique

Stockage en aquifère ou en cavité

❑ Deux types de procédés

- SETA : stockage d'énergie thermique en aquifère ;
- SETC : stockage d'énergie thermique en cavité

❑ Réalisations :

- SETA : un millier dans le monde (aucun en France)
- SETC : une dizaine dans le monde (Scandinavie)

❑ Avantages:

- SETA : réalisation simple (2 forages)
- SETC : réutilisation de cavités souterraines

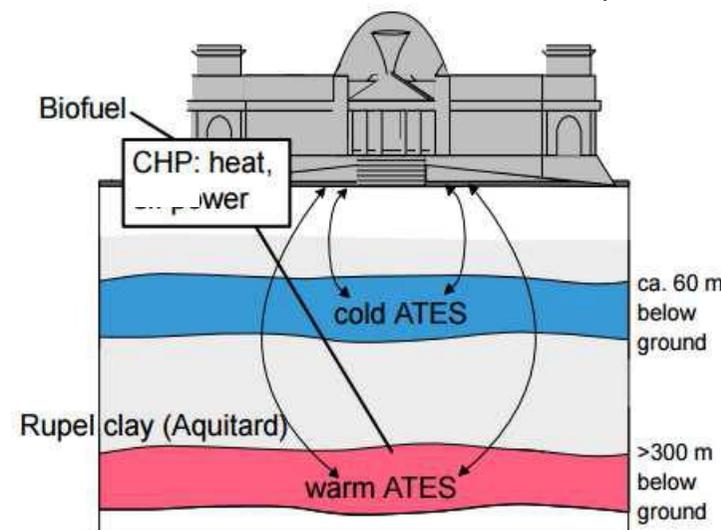
❑ Inconvénients / difficultés :

- SETA : nécessite forte perméabilité et faible gradient
- SETC : nécessite une géométrie spéciale de cavité

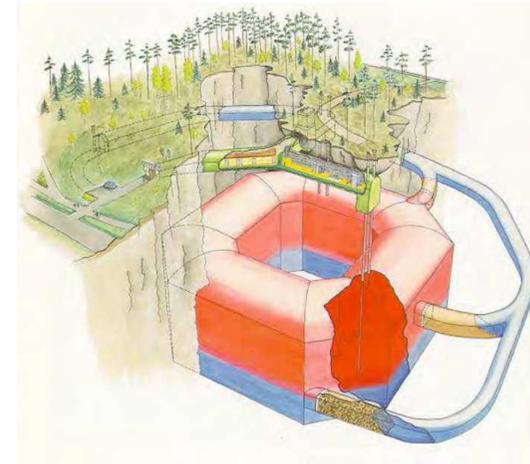
❑ Intérêt énergétique :

- avec 100 cavités de 100 000 m³, eau +40°C, 1 cycle/an, rendement 90%, on peut stocker 0,4 TWh/an, soit 0,1% de la production d'énergies renouvelables en 2020
- solution adaptée pour un stockage à l'échelle locale.

Reichstag de Berlin (D)
(2 GWh de chauffage à 70°C +
4 GWh de climatisation à 5°C)



SETC de Lyckebo (S)
(104 000 m³ d'eau à T 60-90°C soit ~8 GWh)



- 4 -

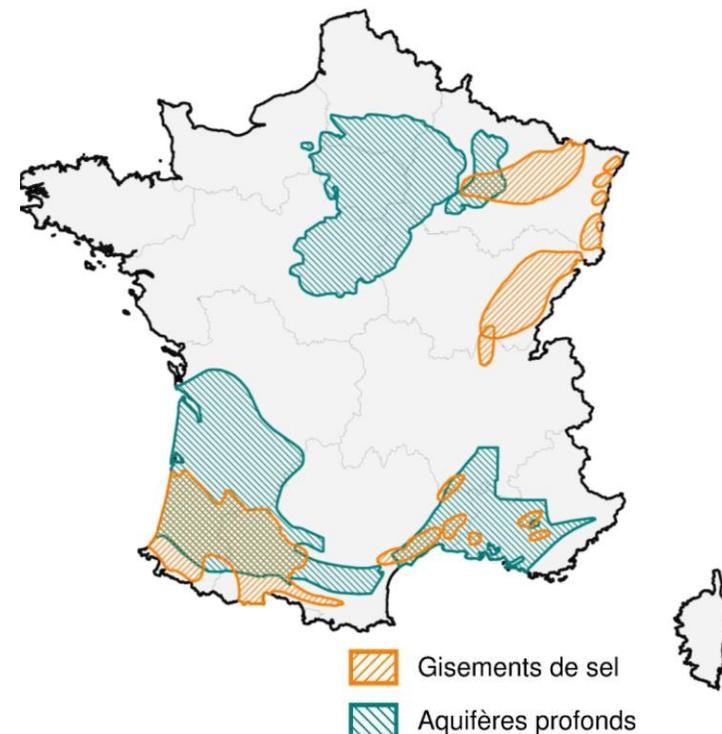
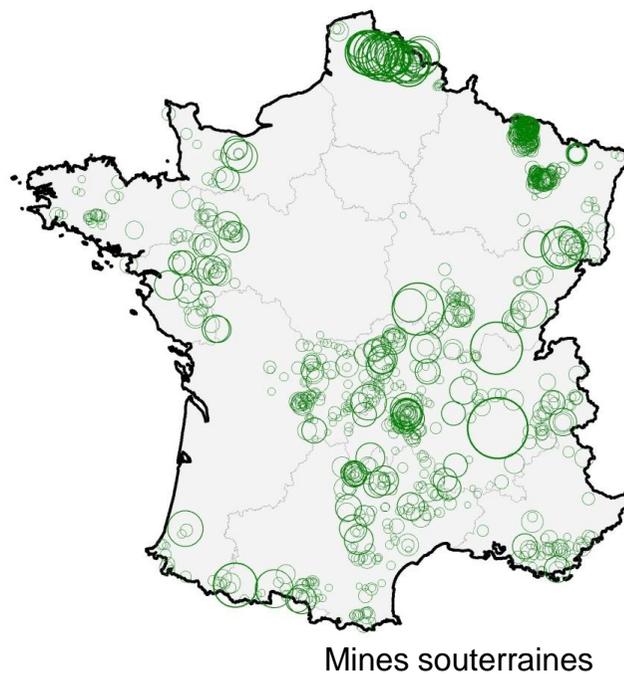
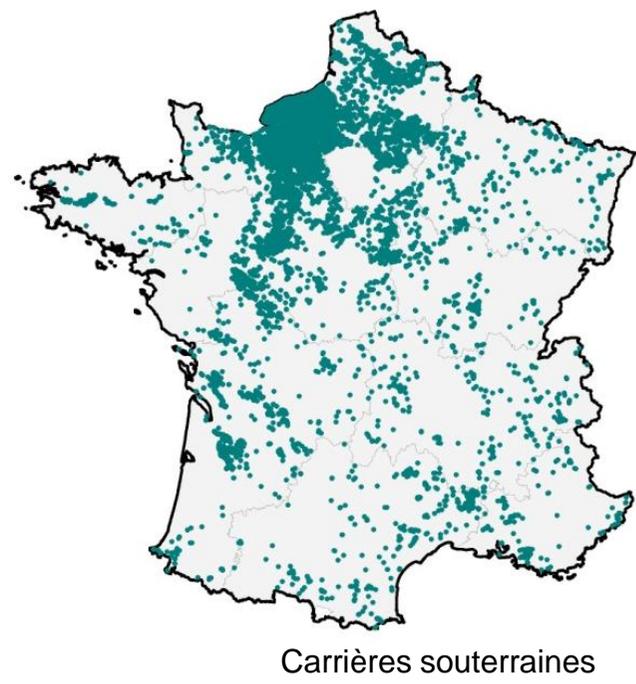
Les verrous scientifiques et technologiques à lever et les besoins de R&D

- Les contraintes géologiques
- Les risques et impacts sanitaires et environnementaux potentiels
- La prise en compte des attentes sociétales
- Les verrous économiques
- Les besoins en R&D

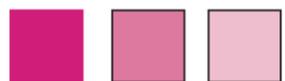
Le contexte géologique : capacités du sous-sol français

Le recours au stockage souterrain et les types de stockage possibles sont conditionnés par :

- la nature du sous-sol (hydrogène, air comprimé) →
- la présence d'anciennes cavités souterraines (STEP, SETC).



Les risques et impacts sanitaires et environnementaux potentiels



Risque accidentel et impact environnemental et sanitaire, du plus au moins important

☐ Risques accidentels liés aux ouvrages souterrains ou aux installations de surface:

- Pression (H₂, CAES) 
- Inflammation/explosion (H₂) 
- Fuite de la cavité souterraine (H₂, CAES) 

☐ Impacts sur la qualité des eaux souterraines :

- Mélange d'eaux de qualité différente (STEP) 
- Perturbation physico-chimique et/ou bactériologique de l'eau (SETA, SETC, H₂) 

⇒ Risques comparables à ceux des stockages actuels de gaz, d'hydrocarbures ou de CO₂ :

- Pas de risque supplémentaire lié à ces nouvelles technologies de stockage
- Risque plus fort pour l'hydrogène (pression, inflammation/explosion, perturbation chimique).

Enjeu majeur : la prise en compte des attentes sociétales

❑ La société civile est un acteur majeur de la transition énergétique

- Transition combinant facteurs techniques et changements de comportements, impliquant :
 - des nouveaux modes et échelles de gouvernance
 - un rôle accru des acteurs sur les territoires

❑ Infléchissement des comportements de consommation et des styles de vie

❑ Les autorités mettent à disposition des outils pour renforcer la participation du public :

- Le Conseil National de la Transition Ecologique (CNTE) renforce le dialogue environnemental pour une innovation sociale et sociétale
- L' espace participatif <http://votreenergiepourlafrance.fr/>, mis à disposition par le Ministère en charge de l'environnement pour recueillir les initiatives et les idées.

Les verrous économiques

Estimations à la demande de la CORE (sur la base de documents extérieurs)

❑ Le coût des principales solutions de stockage souterrain de l'énergie a été estimé en prenant en compte, de manière approchée :

- la réalisation des cavités souterraines et des ouvrages d'accès
- les équipements de surface (électrolyse)
- le rendement (30 à 80%)
- le nombre de cycles d'injection/soutirage (journalier à annuel)
- le mode de creusement des cavités (mécanique ou par dissolution)
- la possibilité de réutilisation de cavités existantes

Type de stockage/Produit stocké	Hydrogène (cavité saline)	Air comprimé (cavité minée)	STEP souterraine (cavité existante)	Chaleur (cavité existante ou aquifère)
Coût d'investissement (€/kWh)	8-11 ⁽⁶⁾	10-120 ⁽⁶⁾	0,1-10 ⁽⁷⁾	0,1-10 ⁽⁸⁾

❑ Le coût du stockage souterrain de l'énergie est globalement onéreux mais :

- il reste inférieur à celui des batteries (100-2000 €/kWh)
- il diminuera au fur et à mesure du développement de la demande
- il est déjà presque rentable pour H₂ si on l'utilise comme carburant .

Les besoins en R&D

- ❑ **Comparaison des différentes options de stockage souterrain (entre eux et / surface) :**
 - évaluation coût-bénéfice (Analyse du Cycle de Vie)
 - cartographie des sites potentiels par rapport à la géologie, aux besoins et aux réseaux

- ❑ **Analyse des risques :**
 - évaluation intégrée des risques (technologiques, sanitaires, environnementaux) pour l'ensemble de la filière (production → transport → stockage → utilisation de l'énergie)
 - impact sur la santé et l'environnement de chaque option, incidence sur réservoirs et ouvrages d'accès

- ❑ **Développement des méthodes et moyens d'auscultation et de surveillance :**
 - auscultation fine de puits ⇔ au cours du vieillissement (corrosion du tubage, dégradation du ciment)
 - surveillance de fuites et de l'état du stockage (y compris signes précurseurs de fissuration)

- ❑ **Etudes spécifiques à certaines options de stockage :**
 - hydrogène : évaluation et maîtrise des risques accidentels (fuite ou éruption en surface)
 - air comprimé : stockage de chaleur (choix du milieu et des matériaux adaptés au CAES adiabatique)
 - STEP : impact de la reconversion d'anciennes cavités (risque d'instabilité)
 - énergie thermique : influence des hautes températures (> 80 °C).

- 5 -

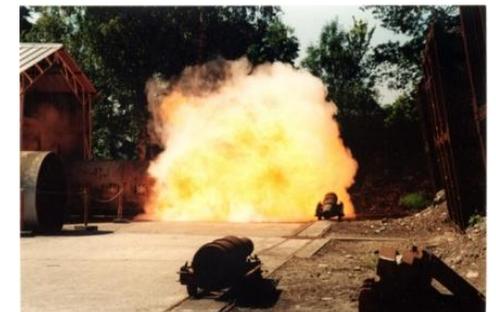
**Place de l'INERIS dans la perspective
du stockage souterrain de l'énergie**

Aide à l'évaluation et à la maîtrise des risques et impacts

- ❑ **Expertise multidisciplinaire** ⇒ **ensemble de la filière** :
 - risques liés au sol et au sous-sol
 - risques accidentels
 - risques chroniques (environnementaux et sanitaires)

- ❑ **Champs d'intervention** ⇒ **organisation en trépied** :
 - R&D
 - appui aux politiques publiques
 - expertise-conseil aux collectivités et industriels

- ❑ **Phases de vie** ⇒ **risques et impacts à court, moyen et long terme**
 - conception des stockages
 - exploitation
 - abandon



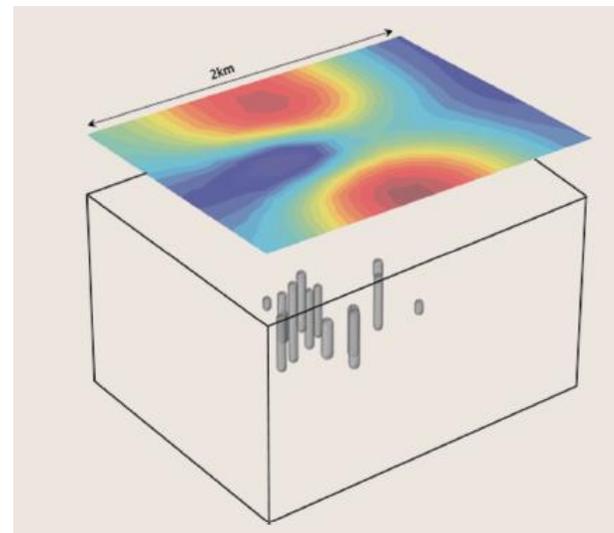
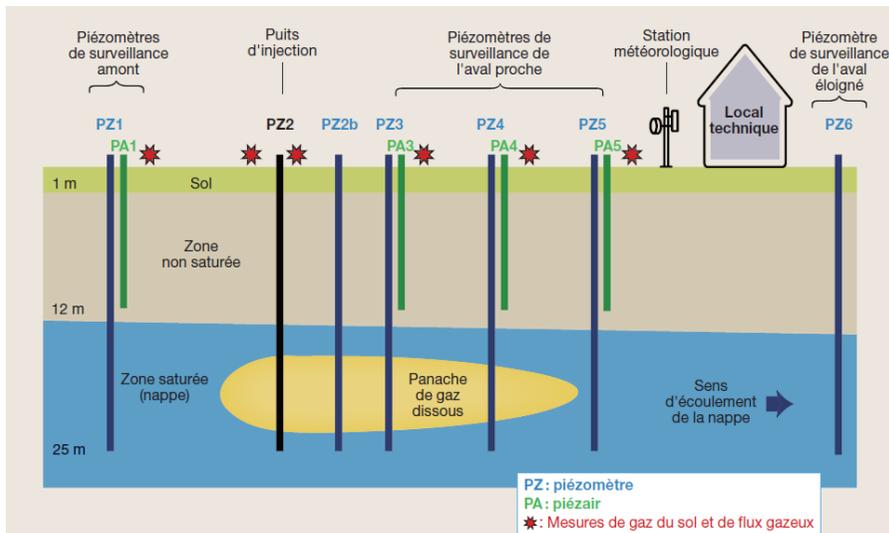
Documents produits par l'INERIS sur le stockage souterrain

www.ineris.fr/rapports-etude/risques-sols-sols

Option de stockage	Titre du document INERIS
Stockage d'énergie renouvelable	Le stockage souterrain d'énergie thermique dans le contexte de la transition énergétique (2015)
	Note relative à la valorisation d'anciennes mines et carrières en Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) dans le contexte de la transition énergétique (2015)
	Stockage souterrain de l'hydrogène (2015)
	Stockage souterrain de l'air comprimé dans le contexte de la transition énergétique (2015)
Stockage de gaz naturel et d'hydrocarbures liquides et liquéfiés	Note relative à la fuite massive de gaz survenue sur un puits d'Aliso Canyon en Californie (2016)
	Note relative au cadre législatif et réglementaire des stockages souterrains (2015)
	Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains (2010)
	L'abandon des cavités de stockage lessivées dans le sel : stratégies envisagées pour la fermeture des cavités et la maîtrise des aléas à long terme (2011)
	Règles méthodologiques applicables aux études de danger des stockages souterrains (2013)
	L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Technologiques relatifs aux stockages souterrains visés à l'article 3-1 du Code Minier (2007)
Stockage de CO₂	Etat des connaissances sur les risques liés au stockage géologique du CO ₂ : les risques en phase d'injection (2010)
	Etat de l'art et analyse des risques pour un stockage de CO ₂ en aquifère salin (2010)
	Lignes de conduite pour la sécurité d'un site de stockage géologique de CO ₂ (2011)
	Retour d'expérience des incidents et accidents sur des sites d'exploitation ou de stockage en milieu souterrain - application au stockage géologique du CO ₂ (2013)

Méthodes et outils

- ❑ Produire des documents de référence
- ❑ Développer/utiliser des outils et méthodes d'évaluation et de maîtrise du risque
- ❑ Se positionner principalement sur les 3 points suivants :
 - ① concevoir et installer des dispositifs de surveillance appropriés → (eau, gaz, microsismique ; sol et sous-sol ; in situ et en laboratoire)
 - ② définir / mettre en place / évaluer des méthodes de maîtrise ↓ des risques adaptées à la prévention ou à la mitigation
 - ③ modéliser des phénomènes dangereux. ↓



- 6 -
Conclusion

Conclusion sur le stockage souterrain d'énergie

- ❑ **La transition énergétique nécessitera le développement des stockages d'énergie dans le futur :**
 - coexistence de ++ solutions de stockage pour pallier le caractère intermittent de certaines énergies
- ❑ **Les avantages majeurs des stockages souterrains :**
 - grands volumes et meilleure sécurité par rapport à un stockage en surface
- ❑ **Des défis technologiques à relever :**
 - interactions fluide stocké-eau-roche, impact de la température, étude du confinement, surveillance...
- ❑ **Une évaluation précise des nouveaux risques et impacts :**
 - basée sur le retour d'expérience des stockages souterrains existants et/ou sur des sites-pilotes
- ❑ **Disposer d'une meilleure connaissance des potentialités du sous-sol :**
 - cartographie des zones favorables ⇨ adaptation des caractéristiques des futurs stockages
- ❑ **Améliorer le coût des stockages souterrains et des infrastructures de surface :**
 - diminution avec le développement de la demande, plus rentable sans transformation en électricité
- ❑ **Le choix d'une filière de stockage (surface/souterrain) dépendra de plusieurs facteurs liés aux territoires et aux ressources**
 - demande énergétique, réseaux, nature du sous-sol, présence de cavités...

Merci de votre attention !