



# Le stockage massif des vecteurs énergétiques fluides dans le concept EMO

## ANR FLUIDSTORY 2016-2019

## **SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL,**

**LE BRGM EST L'ÉTABLISSEMENT  
PUBLIC DE RÉFÉRENCE  
DANS LES APPLICATIONS  
DES SCIENCES DE LA TERRE  
POUR GÉRER LES RESSOURCES  
ET LES RISQUES DU SOL  
ET DU SOUS-SOL.**

**SON ACTION EST ORIENTÉE VERS  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE,  
L'APPUI AUX POLITIQUES PUBLIQUES  
ET LA COOPÉRATION INTERNATIONALE.**

## **COMPRENDRE**

*les phénomènes géologiques  
et les risques associés.*

## **DÉVELOPPER**

*des méthodologies  
et des techniques nouvelles.*

## **PRODUIRE**

*et diffuser des données  
pour la gestion du sol,  
du sous-sol et des ressources.*

## **METTRE À DISPOSITION**

*les outils nécessaires à la gestion du sol,  
du sous-sol et des ressources,  
à la prévention des risques et des pollutions,  
aux politiques de réponse au changement climatique.*

Plus de  
**1 000** salariés

*dont plus de 700 chercheurs et ingénieurs*

**ÉTABLISSEMENT PUBLIC  
À CARACTÈRE INDUSTRIEL  
ET COMMERCIAL (EPIC) CRÉÉ EN 1959,  
LE BRGM EST PLACÉ SOUS LA TUTELLE  
DU MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE,  
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE,  
DU MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT,  
DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER,  
ET DU MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE,  
DE L'INDUSTRIE ET DU NUMÉRIQUE.**



## **CERTIFICATIONS ET LABELS**

**LE BRGM EST CERTIFIÉ ISO 9001 (QUALITÉ)  
DEPUIS 2004,**

**ET ISO 14001 (ENVIRONNEMENT)  
DEPUIS 2012.**

**SES LABORATOIRES  
SONT ACCRÉDITÉS PAR LE COFRAC.**

**LE BRGM EST L'UN DES  
INSTITUTS CARNOT.**

# Une palette de solutions au BRGM pour stocker l'énergie dans le sous-sol

Le stockage de l'énergie peut être électrique ou thermique.

Concernant le stockage de chaleur issue de sources d'énergies renouvelables ou de rejets industriels, le BRGM mène des recherches sur le stockage en aquifère souterrain ou par champs de sondes géothermiques.

↳ présentation 30/11/16 « *Stockage géologique de chaleur* » de H. Lesueur

Concernant le stockage d'électricité, le BRGM s'intéresse notamment à trois nouvelles technologies :

1. Le stockage souterrain d'hydrogène
2. CAES (stockage d'énergie sous forme d'air comprimé) dans les cavités salines ou cristallines
3. STEP souterraines (Station de transfert d'énergie par pompage) utilisant les mines abandonnées comme réservoir inférieur.

Et aussi le concept innovant **EMO (Electrolyse – Méthanation – Oxycombustion)** avec le stockage des fluides en cavités salines

# Différentes scénarii sur les besoins en stockage des surplus de productions électriques en France

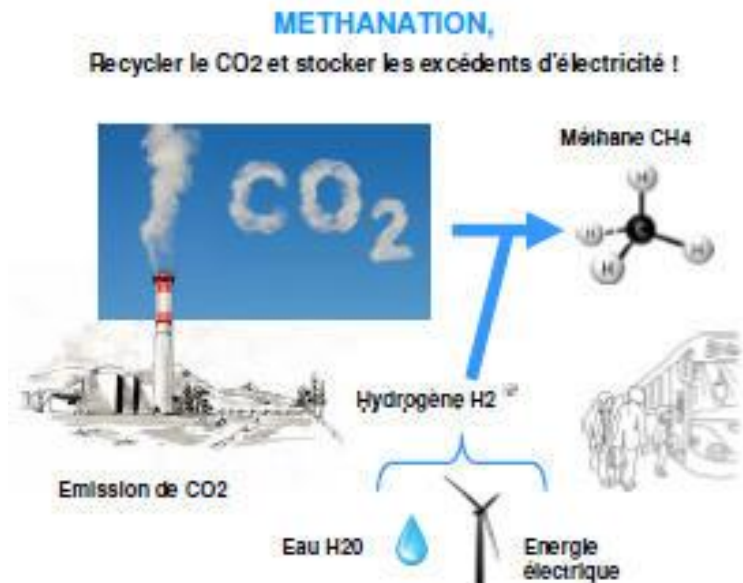
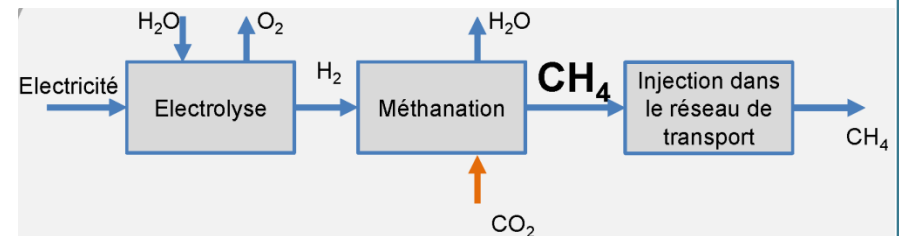
Etude	Année	Potentiel à stocker hors effacement et interconnexion		Rendement de décharge	Potentiel à décharger 2050 (puissance)
		2030	2050		
Ancre	2014		47 TWh (38 GW)		
Ademe, GRTgaz, GrDF	2014	3 TWh	20-73 TWh en P2G		
Ademe « mix électrique 100% renouvelable ? »	2015		34,8 TWh en P2G	41%	7,4 TWh (8,8 GW)
<i>Ancre (provisoire AG le 25/11/2016)</i>	<i>2017</i>	<i>~15 GW</i>	<i>~30 GW</i>		

# Qu'est-ce que c'est le Power-To-Gas classique ?

En France, **les capacités de stockage de gaz sont plus importantes que celles du réseau électrique**. Les technologies Power To Gas (P2G) permettent la conversion de l'électricité en gaz comme procédés de valorisation de l'électricité excédentaire en 1 ou 2 étapes :

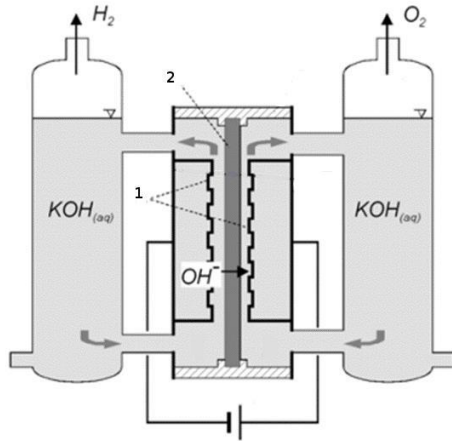
1. **Electrolyse** : étape de base qui permet la conversion d'une énergie électrique excédentaire en énergie chimique sous forme de gaz hydrogène ( $H_2$ ), par décomposition de molécules d'eau ( $H_2O$ )
2. **Méthanation** : étape supplémentaire permettant de combiner l'hydrogène avec des atomes de carbone issu de dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) pour former du méthane de synthèse ( $CH_4$ )

Ces 2 vecteurs énergétique gazeux ( $H_2$  ou  $CH_4$ ) peuvent être ensuite injectés dans les réseaux de gaz naturels ou utilisés localement (ex. usages mobilité). P2G permet de coupler le réseau électrique et le réseau gazier qui sert de **stockage tampon** avant l'utilisation finale de l'énergie mais **sans étape de stockage à proprement parler**.

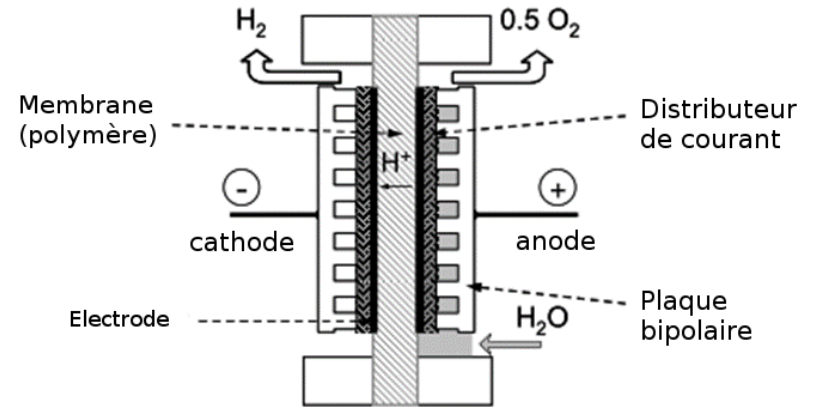


# Brique technologique de base : l'électrolyse

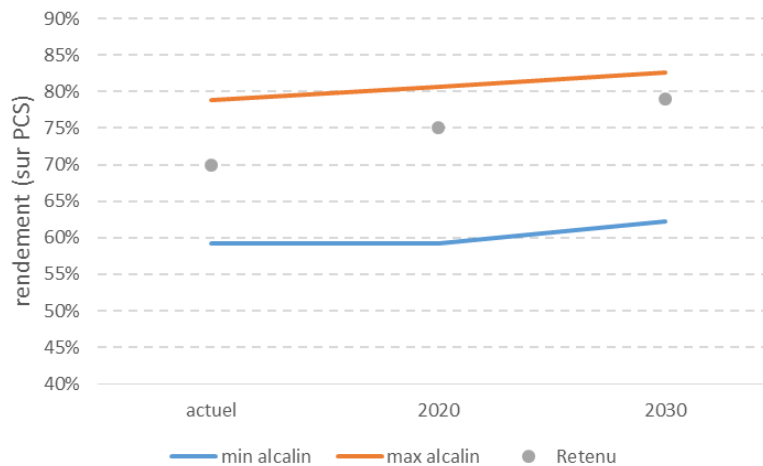
Principe d'une cellule d'électrolyse alcaline



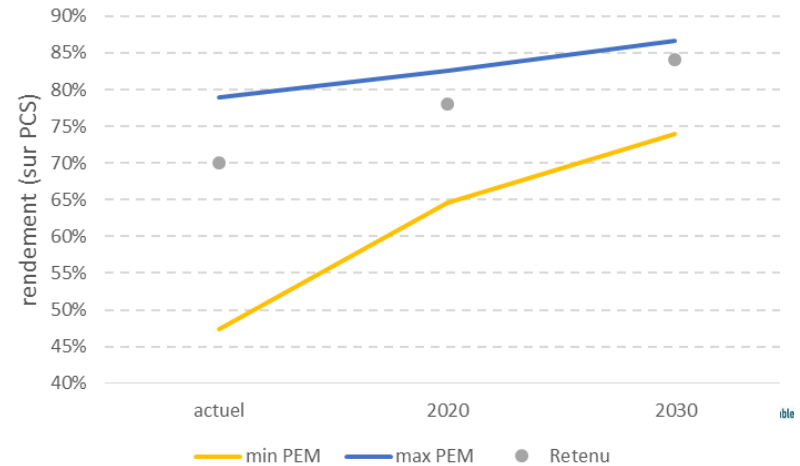
Principe d'une cellule d'électrolyse PEM



Evolution du rendement des électrolyseurs alcalins  
Sources : (Smolinka et al., 2011) et E&E



Evolution du rendement des électrolyseurs PEM  
Sources : (Smolinka et al., 2011) et E&E



# Brique technologique supplémentaire : la méthanation

La méthanation est la réaction d'hydrogénation du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) en méthane ( $\text{CH}_4$ ) découverte par Paul Sabatier (1854-1941) originaire de Toulouse.

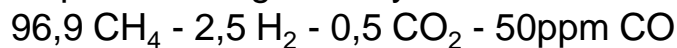


Elle utilise d'un catalyseur comme le nickel, le rhodium ou le ruthénium (Bengaouer, 2013), le nickel étant plus fréquemment utilisé en raison de son faible coût.

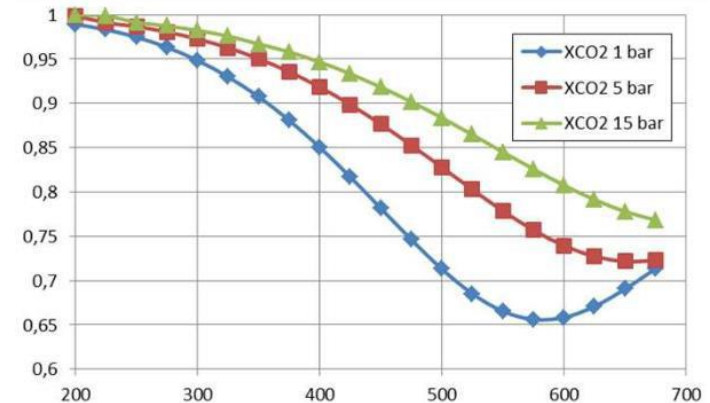
Si l'hydrogène est intégralement converti en méthane, on obtient un rendement de conversion énergétique de 78%. Un pilote allemand atteint un taux de 92% de méthane dans le gaz de synthèse avec un rendement de conversion méthane/hydrogène de 79% (Zuberbühler et al., 2013).

Cette réaction est exothermique c'est-à-dire qu'elle dégage de la chaleur. La température augmente donc en raison du caractère exothermique de la réaction de méthanation si aucun système de refroidissement n'est intégré.

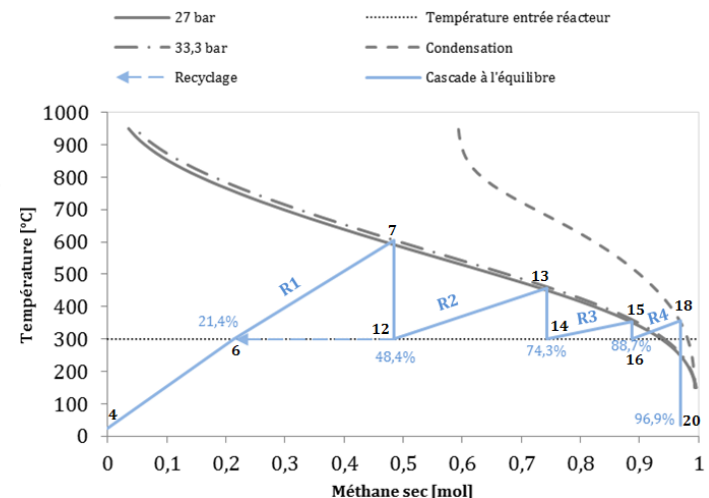
Une simulation avec ASPEN+ a montré qu'une cascade de 4 réacteurs adiabatiques permet un rendement de 76,1% avec une composition du gaz de synthèse :



Ce rendement peut augmenter à **86,2%** (88,3%) avec une **valorisation de la chaleur** à 83% (100%)



Taux de conversion du  $\text{CO}_2$  fonction de  $T$  (°C)  
Source : (Bengaouer, 2013)



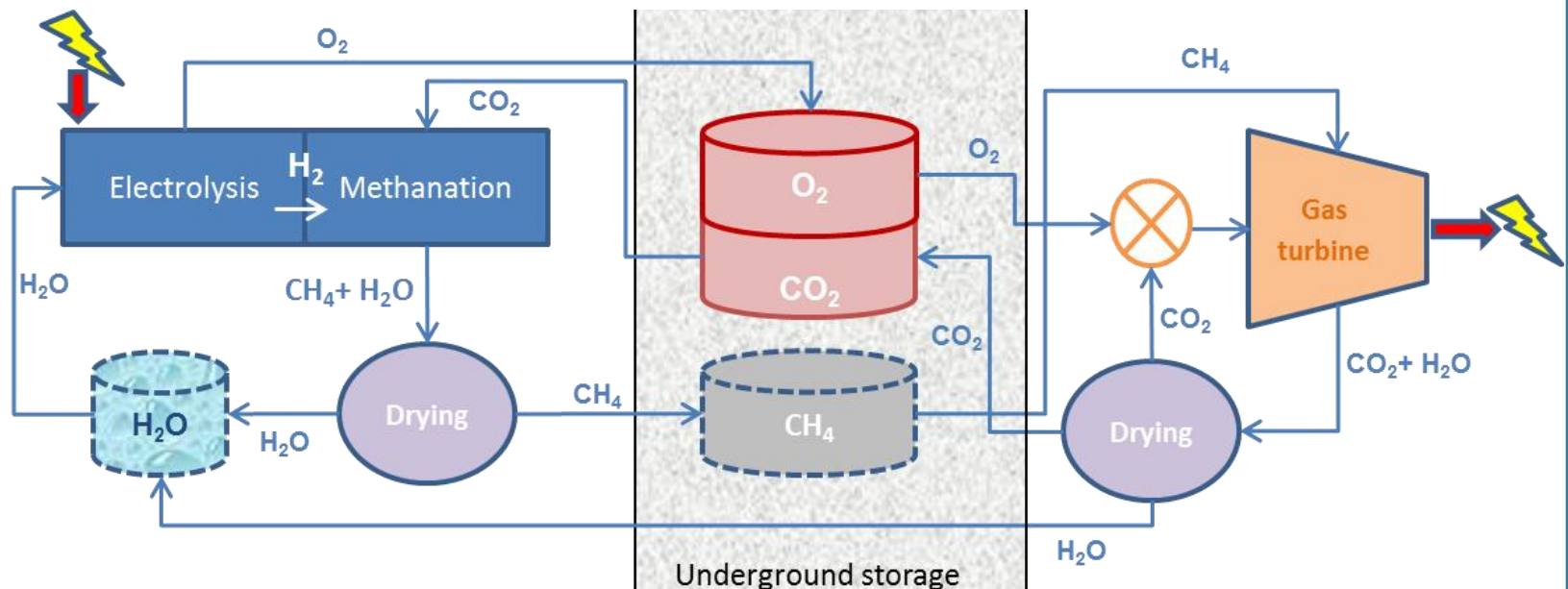


# Qu'est-ce que le concept EMO par rapport au P2G ?

Par rapport au Power-to-Gas classique (P2G), l'Electrolyse-Méthanation-Oxycombustion (EMO) est un concept **Power-to-gas-to-Power (P2G2P) avec un stockage souterrain**.

Ce concept répond à un besoin d'un stockage massif d'énergie inter-saisonnier pour compenser l'intermittence : en situation météorologique anticyclonique avec la stagnation d'un air venu du nord, le vent sera faible et la production éolienne très faible pendant une longue période hivernale.

EMO est une solution **en boucle fermée** afin d'absorber les surplus de production électrique dus aux énergies renouvelables intermittentes, et les restituer ultérieurement, via un stockage souterrain transitoire d'O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub> dans des **cavités salines**.



# Inventaire du potentiel de cavités salines en France

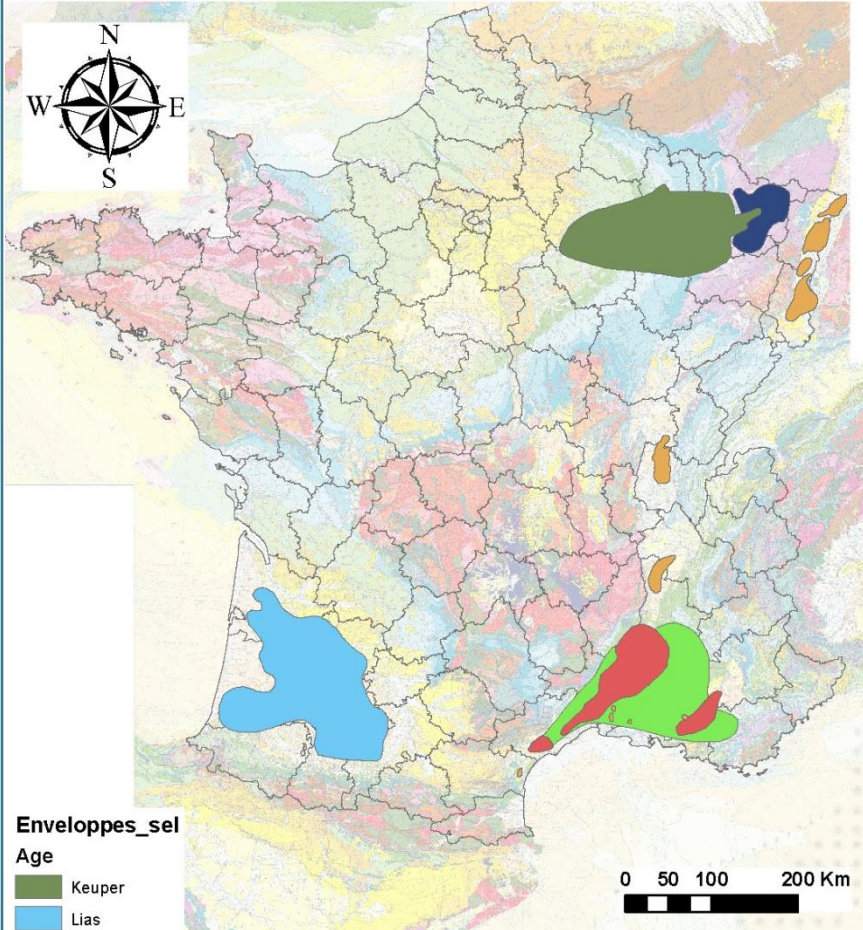
Les zones géographiques d'intérêt d'un point de vue géologique sont :

- Le champ salifère de Lorraine,
- Le bassin de la Bresse,
- Le graben de Manosque
- Le bassin aquitain

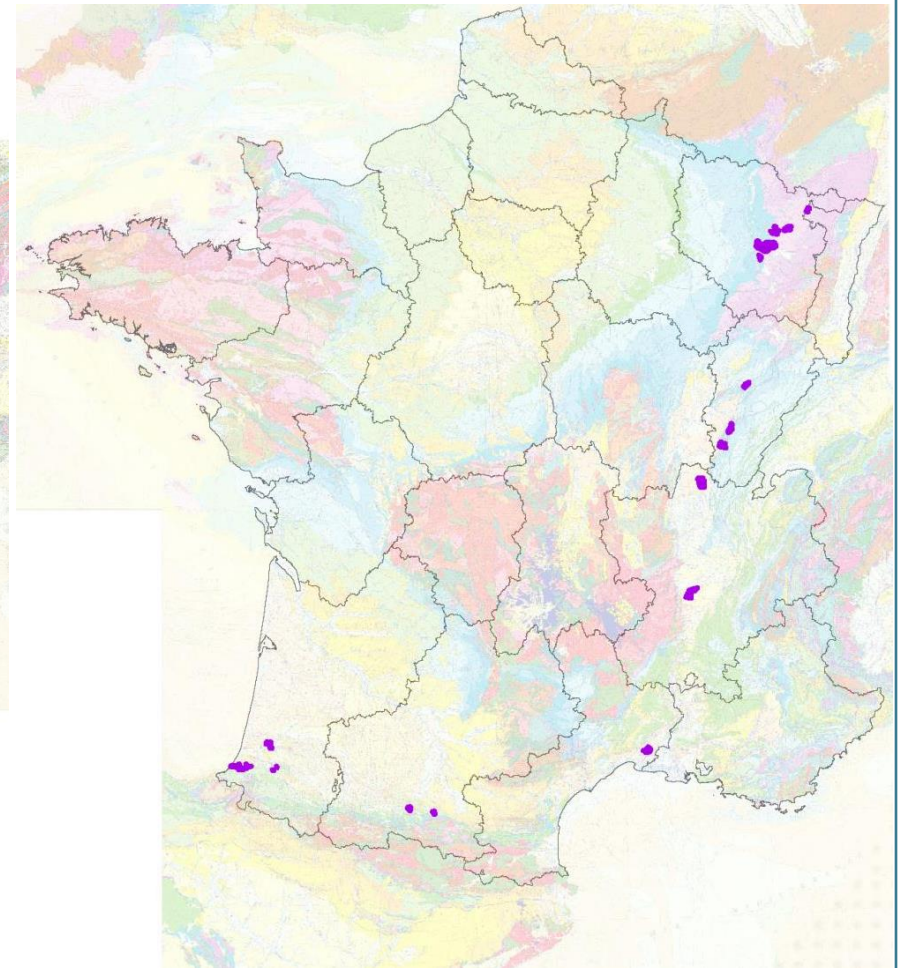
Les informations pertinentes à rassembler a minima sont :

- La profondeur de la formation salifère
- L'épaisseur de la formation salifère
- La quantité (%) d'insolubles
- Les informations qualitatives sur la nature des insolubles (en blocs, en bancs, ep. des bancs...)
- Les informations sur la couverture (épaisseur, lithologie)

# Localisation des formations salifères en France métropolitaine



Zones sélectionnées pour caractériser les cavités salines possibles pour FluidSTORY, nouvelles ou anciennes





Dans le cadre d'un projet de recherche cofinancé par l'ANR, le BRGM coordonne le projet FluidSTORY qui étudie un concept innovant de stockage d'énergie, combinant en surface l'électrolyse, la méthanation et l'oxycombustion (EMO) avec des stockages souterrains massifs et réversibles de fluides en cavités salines



# Projet ANR FluidSTORY 2016-2019

massive and reversible  
underground storage of FLUIDs  
(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) for energy  
STORage and recoverY

## Les partenaires



### B. Bazargan-Sabet

Coordinateur  
b.bazargan-sabet@brgm.fr  
02.38.64.31.04

### A. Burnol

a.burnol@brgm.fr  
02.38.64.46.47

### Le projet FluidSTORY associe pendant 4 ans :

1. **BRGM** : Coordination, risques, inventaires géologiques
2. **ARMINES** : Thermodynamique et chimie, process
3. **X-LMS Ecole Polytechnique** : Thermo-mécanique, simulation et expérimentation
4. **Brouard Consulting** : Thermodynamique
5. **Geostock** : Geotechnique, expertise cavités
6. **Geogreen** : Stratégie et économie
7. **ENEA consulting** : Modèles économiques, scénarios énergétiques
8. **AREVA H2-GEN** : Electrolyse

# Objectif et verrous scientifiques et techniques

## Objectifs

Le projet **FluidSTORY** vise à une étude de faisabilité technico-économique du **stockage souterrain massif et réversible** de vecteurs énergétiques fluides comme solution au décalage dans le temps entre périodes d'excès de production d'énergie renouvelable et périodes de demande d'énergie en France à l'horizon 2030-2050

## Verrous

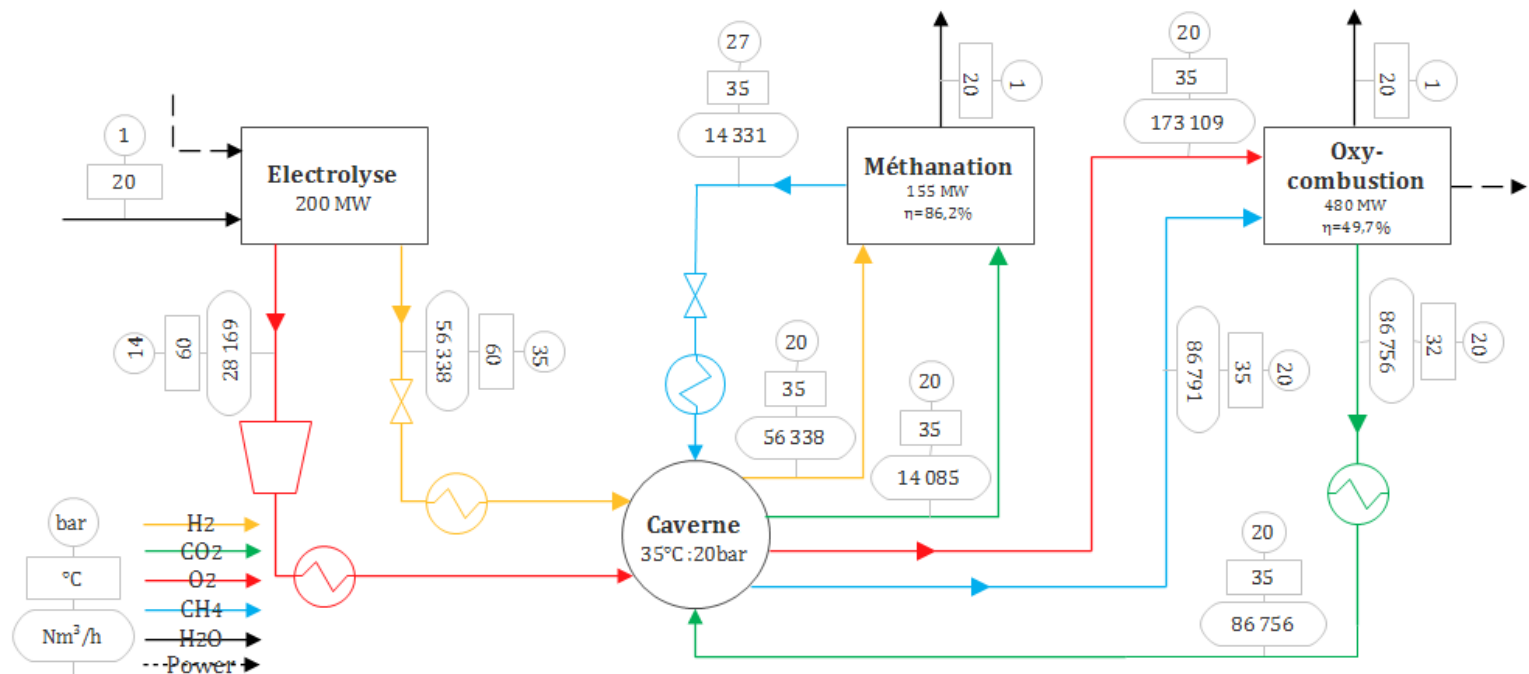
- I. Connaissances sur les **aspects procédés de surface** pour la chaîne entière EMO
- II. Comportement **thermophysique** des mélanges de fluides en conditions variables de stockage en cavité saline
- III. Intégrité **thermomécanique** des cavités salines pour les fluides O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> ou/et un mélange de fluides O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>
- IV. **Sécurité** pendant la durée de l'exploitation et en période post-fermeture
- V. Considérations **économiques** sur le coût du stockage d'énergie type EMO de grande capacité (inter-saisonnier)

# I. Brique spécifique du concept EMO : l'oxycombustion

C'est la brique technologiques la moins mature aujourd'hui, car les unités pilotes existantes sont de faible puissance. Le modèle Aspen+ basé sur le procédé de J. Martinez-Frias et al. « *Thermodynamic Analysis of Zero-Atmospheric Emissions Power Plant*. ASME Journal, 2004 » donne les résultats suivants :

Rendement=Puissance nette/Puissance calorifique

Puissance calorifique [MWt]	utile [MWe]	nette [MWe]	Rendement
962,8	526,4	479,0	<b>49,7%</b>



## II. Comportement thermophysique/géochimique des mélanges de fluides CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> :

Compléter les données manquantes sur les mélanges

- “binaires-ternaires” CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+NaCl, O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O et O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+NaCl
- “ternaires-quaternaires” : CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O+NaCl
- Et éventuellement avec CH<sub>4</sub>

Pour ces mélanges, des mesures de **densité** ainsi que de **solubilité** en équilibre avec le sel seront réalisées expérimentalement et modélisées. En outre, des nouvelles données sur la formation d’hydrates de mélanges seront aussi réalisées afin d’aborder les conditions de situations de risques (ex. éruption de gaz avec baisse de température)

Tests labo + modélisations

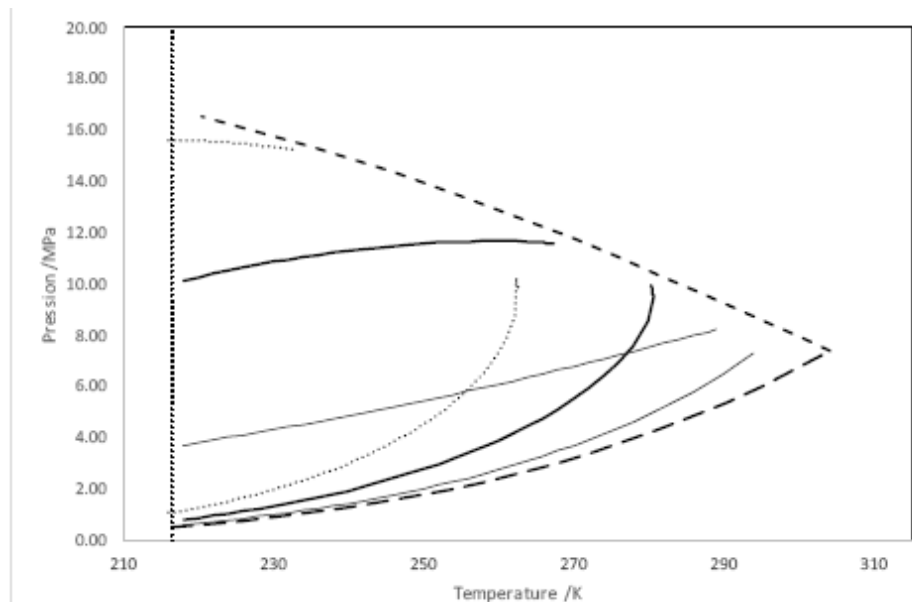
Enveloppe Pression – Température du système CO<sub>2</sub>+O<sub>2</sub> pour les 3 mélanges

O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>
0.1	0.9
0.3	0.7
0.5	0.5

Tirets : tension de vapeur du CO<sub>2</sub> pur

Tirets courts : ligne des points critiques

Ligne verticale : température fusion du CO<sub>2</sub> pur



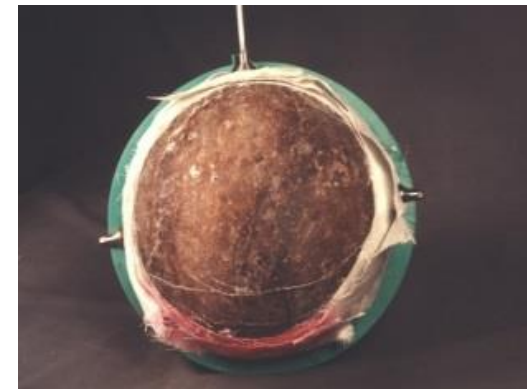
### III. Intégrité thermomécanique du comportement d'une cavité saline :

Vérifier que la perméabilité du sel au  $\text{CO}_2$  et à  $\text{O}_2$  n'est pas plus importante qu'avec le  $\text{CH}_4$  (*a priori* non, mais les tests n'ont jamais été réalisés à notre connaissance).

L'enjeu principal est d'éviter de créer des zones de tractions dans la cavité, qui peuvent potentiellement engendrer des micro-fracturations, et une augmentation de la perméabilité des parois de la cavités salines aux fluides.

Au delà des pertes énergétiques, les fuites des fluides stockés peuvent représenter un enjeu environnemental.

Tests labo + modélisations



Figures : Sphères utilisées pour les mesures de perméabilités



## IV. Sécurité des cavités salines et management du risque

Les risques de l'exploitation de cavités salines pour les fluides  $O_2$ ,  $CO_2$  seuls ou des mélanges  $O_2/CO_2$  ou  $CH_4/CO_2$  devront être listés puis étudiés en utilisant le retour d'expérience pour le  $CH_4$  et les travaux développés pour le stockage géologique du  $CO_2$

A ce stade, on peut citer de manière non exhaustive plusieurs questions à traiter :

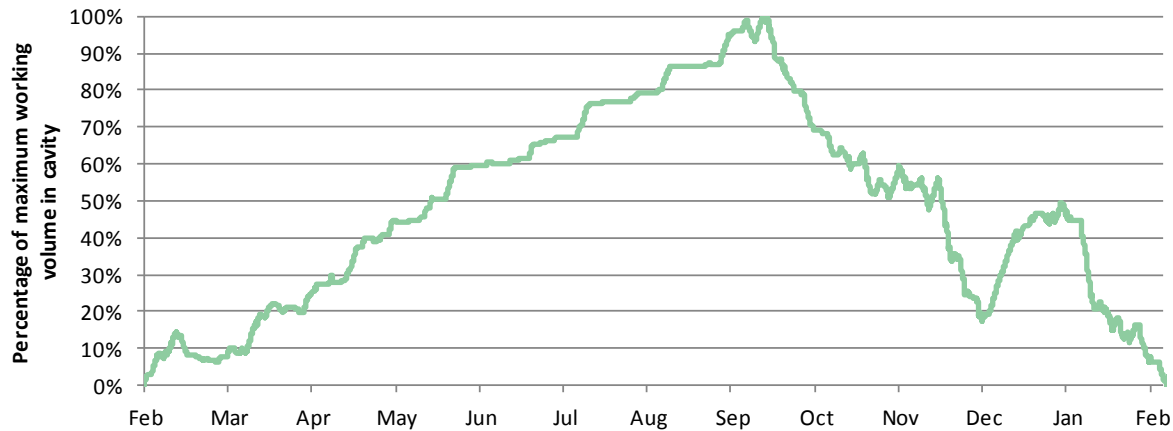
1. le scénario de l'**éruption** (relargage non contrôlé de fluides vers la surface)
2. L'intégrité des puits (**ciment et casing**) en présence de  $O_2/CO_2$
3. en cas de ré-utilisation d'une cavité déjà existante, la possible réactivité des fluides stockés avec **les contenus résiduels en hydrocarbures** des cavités
4. Le couplage avec d'autres sources de  $CO_2$  pour pallier les pertes de la boucle EMO
5. Les impacts potentiels des **impuretés** (ex.  $H_2$  dans  $CH_4$  /  $CH_4$  dans  $CO_2$ )
6. Les interactions entre procédés de surface et opérations souterraines

A noter aussi l'aspect réglementaire français à examiner (ex. nouveau code minier, législation sur la taxe carbone en cours...)

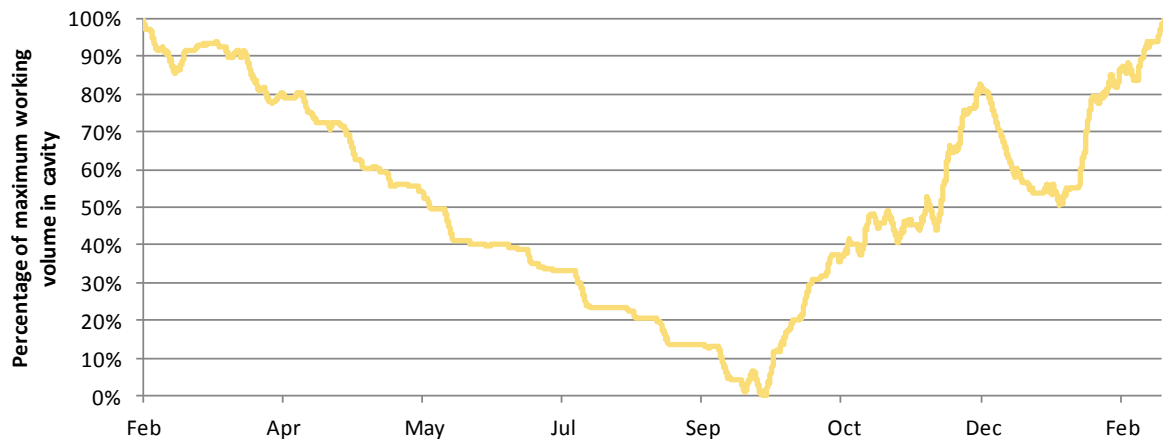
Des ateliers d'experts seront mis en place afin de livrer un rapport de recommandations pour le management du risque pour le développement d'une filière EMO avec stockage en France.

# Exemple d'un cycle intersaisonnier de stockage-déstockage en cavité saline

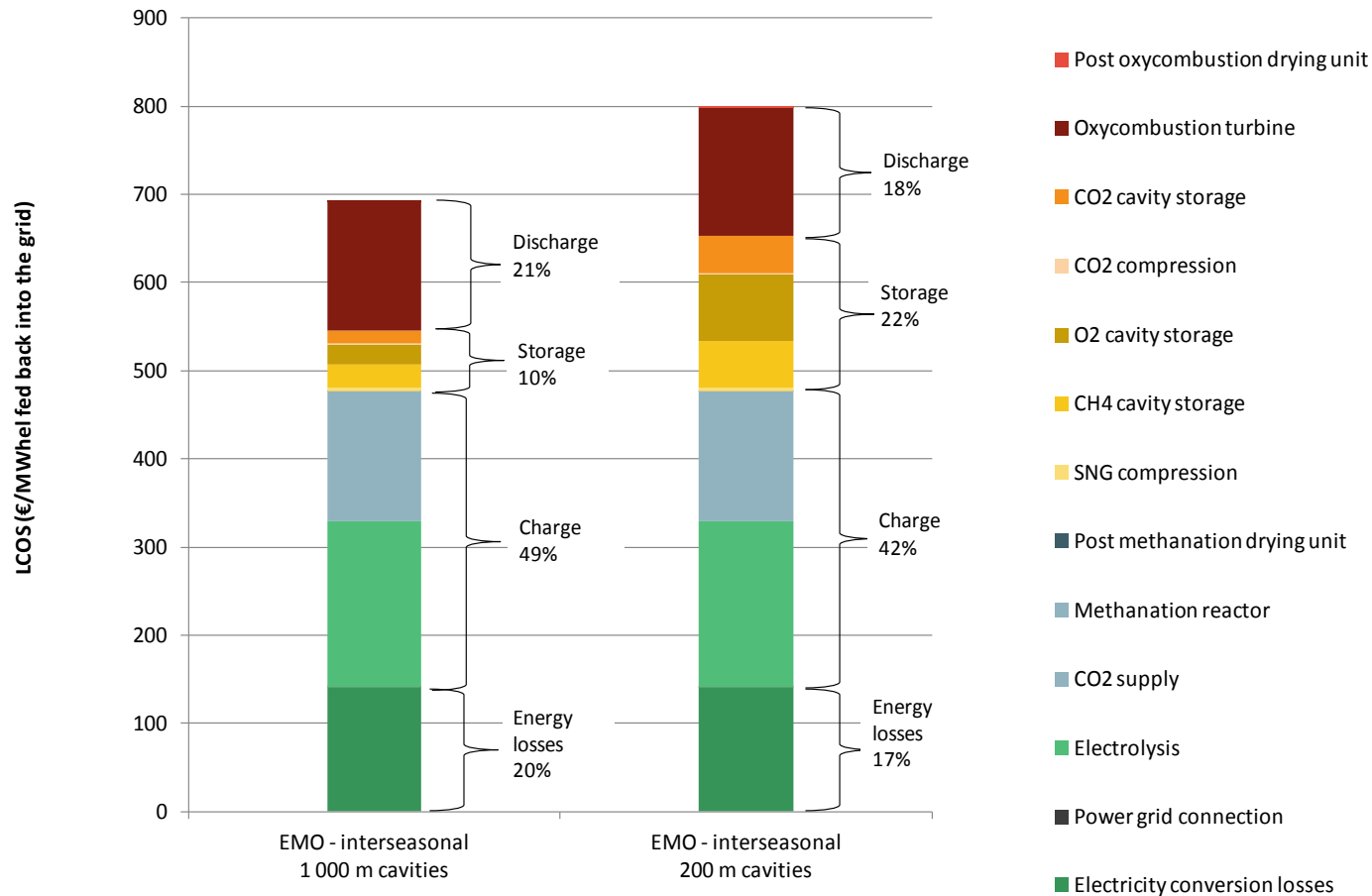
Volume of CH<sub>4</sub> in the cavity during a year



Volume of CO<sub>2</sub> in the cavity during the year

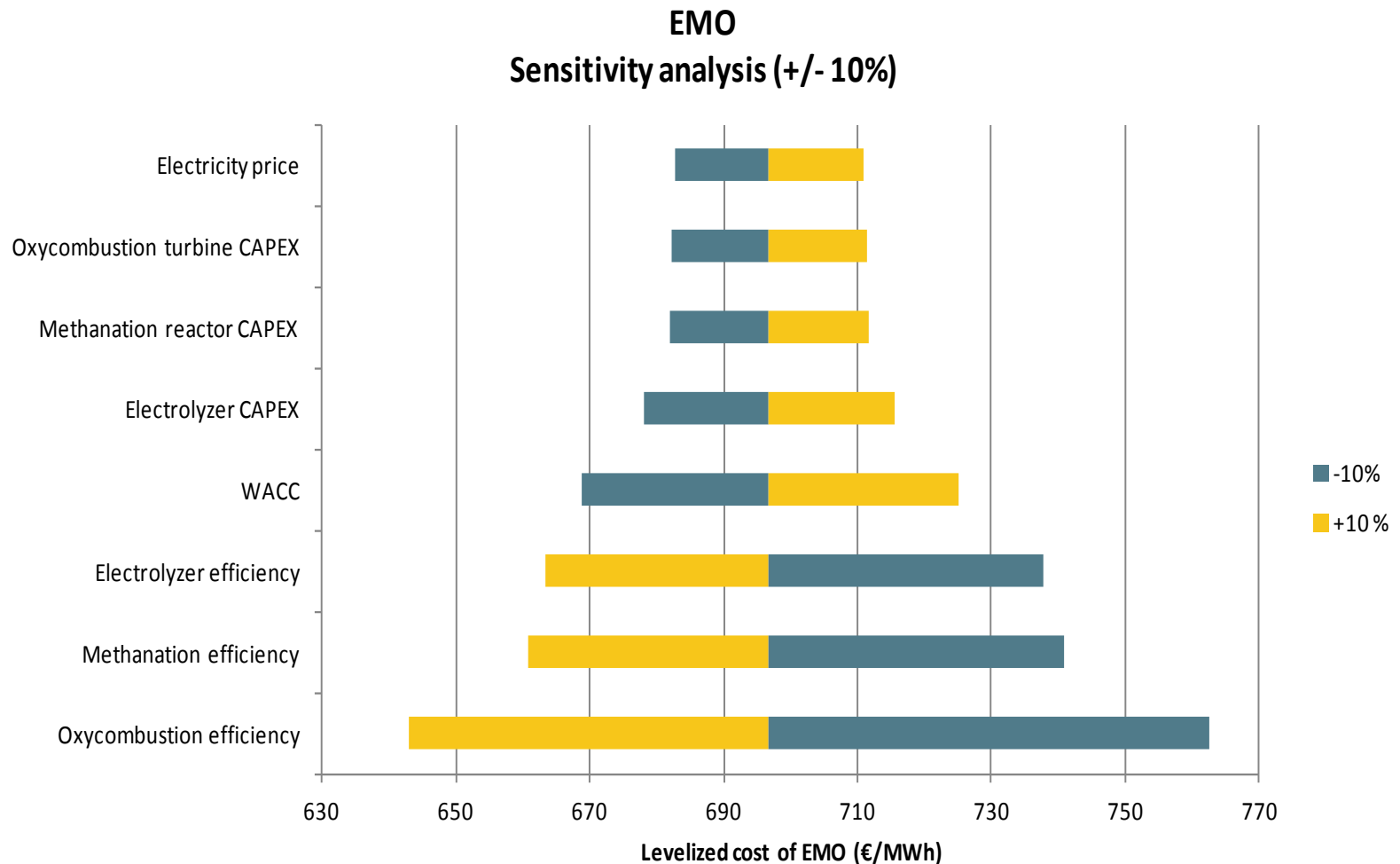


## V. Etude de la sensibilité du coût de la technologie EMO (€ /Mwh) à la profondeur de la cavité saline (200 m ou 1000 m)



Plus la cavité est profonde, plus le coût diminue

## V. Etude de la sensibilité du coût de la technologie EMO (€ /Mwh) aux différents paramètres des procédés de surface



## Dimensionnement de la filière EMO avec stockage pour la réalisation des objectifs de transition énergétique en France

Le projet FluidSTORY permettra un saut de connaissance sur le potentiel de valorisation des cavités salines françaises existantes et potentielles pour le stockage massif d'énergie renouvelable associé au déploiement d'une filière en France power-to-gas/gas-to-power (P2G2P).

Cette filière pourrait contribuer à la réalisation des objectifs de la transition énergétique en France d'ici 2030-2050. L'objectif du projet est aussi de préparer les conditions de mise en place d'un prototype en France.

N'hésitez donc pas à prendre contact avec le BRGM si vous êtes intéressés à participer au pilote industriel **PILOT FluidSTORY** en France.

Cette histoire (STORY) peut être aussi la votre bientôt !

Merci pour votre attention et d'avance pour toutes vos questions...

