

MODÉLISATION DE L'ÉRUPTION D'UNE CAVITÉ SALINE DE STOCKAGE SOUTERRAIN D'HYDROGÈNE

MODELING THE BLOWOUT OF A SALT CAVERN USE FOR UNDERGROUND STORAGE OF HYDROGEN

Hippolyte DJIZANNE¹, Benoit BROUARD², Pierre BEREST³ et Grégoire HEVIN⁴

¹ Ineris, Parc Technologique ALATA, BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

² Brouard Consulting, 101 Rue du Temple, 75003 Paris, France

³ Ecole Polytechnique, Route de Saclay, 91120 Palaiseau, France

⁴ Storengy, 12 Rue Raoul Nordling, 92270 Bois-Colombes, France

RÉSUMÉ – Une éruption est un des scénarios majeurs accidentels susceptibles de se produire au cours de l'exploitation d'une cavité saline de stockage souterrain d'hydrogène. Dans cet article, la méthode de calcul présentée dans Bérest et al. 2013 est utilisée dans le cas d'une cavité pilote du stockage d'Étrez pour prédire la durée de l'éruption et l'évolution des paramètres clés tels que la température, la pression et la vitesse de l'hydrogène.

ABSTRACT – Blowout is one of the major accident scenarios which might to develop during operation of an underground salt cavern storage of hydrogen. In this paper, the computation method presented in Bérest et al., 2013 is used on Etrez's storage salt cavern, to predict the blowout duration and the evolution of key parameters such as temperature, pressure and hydrogen velocity in the salt cavern and in the well.

1. Introduction

Le stockage géologique de l'hydrogène repose en partie sur l'expérience acquise avec le stockage souterrain de gaz naturel, ce dernier étant utilisé habituellement pour fournir une capacité de modulation saisonnière. Les cavités salines, créées par lessivage dans le sel gemme, offrent l'avantage d'être pratiquement imperméables aux gaz, et sont actuellement les seules structures utilisées pour stocker massivement de l'hydrogène dans le sous-sol. Au cours des dernières décennies, plusieurs exemples de stockage, en cavité saline, d'hydrogène plus ou moins pur ont vu le jour :

- À Teesside au Royaume-Uni où, depuis plus de 30 ans, 3 cavités salines de 70 000 m³ permettent de stocker chacune 1 million de Nm³ d'hydrogène relativement pur (95% de H₂ et 3-4% de CO₂). Ces cavités sont situées à une profondeur moyenne de 370 m ;
- À Clemens Dome, Lake Jackson, au Texas (USA) où, depuis 1986, Conoco Philips stocke 30,2 MNm³ d'hydrogène d'un gaz de synthèse (95% d'hydrogène) en cavité saline. La cavité a un volume géométrique de 580 000 m³ et est opérée entre 7-13,5 MPa avec un pouvoir calorifique minimal de 92 MWh.
- À Moss Bluff, Liberty County au Texas où, depuis 2007, Praxair stocke 70,8 MNm³ d'hydrogène industriel en cavité saline. La cavité saline a un volume géométrique de 566 000 m³ et est opérée entre 7,6 et 13,4 MPa avec un pouvoir calorifique minimal de 80 GWh.
- À Spindletop Dome, à Beaumont au Texas (USA), Air Liquide a récemment mis en service la plus grande installation de stockage souterrain d'hydrogène en cavité saline au monde. La cavité saline est située à 1500 m de profondeur pour environ 70 m de diamètre et un volume de plus de 580000 m³.

Plusieurs études ont lieu actuellement dans le monde sur le stockage souterrain d'hydrogène. En Europe, le projet européen HypSTER (2021-2023), conduit par Storengy vise à démontrer la faisabilité de l'exploitation à l'échelle industrielle des stockages souterrains d'hydrogène en cavité saline. Dans ce cadre, un site pilote est prévu en France, à Etrez (Ain), dans la cavité dénommée EZ53 qui est l'une des cavités salines qui a été le plus étudiée dans le monde depuis sa création en 1982.

Cet article porte sur la modélisation de l'éruption d'une cavité saline de stockage d'hydrogène, considérée comme l'un des accidents majeurs les plus redoutés sur un tel site industriel. Un aspect important de la modélisation de l'éruption est la capacité à prédire avec précision le débit massique de gaz sortant de la tête de puits. Pour quantifier avec précision ce qu'il se passe lors d'une éruption, il faut être capable de simuler un écoulement turbulent dit "de Fanno", régime d'écoulement très rarement employé dans la plupart des logiciels utilisés par l'industrie pour prédire l'éruption. Il est possible de déterminer numériquement la durée de l'éruption avant que la cavité saline ne se vide complètement, et la modélisation thermodynamique de l'hydrogène peut être couplée avec le problème de stabilité mécanique de la cavité saline afin de vérifier les zones potentiellement endommagées autour de la cavité (notamment la zone du sabot de cuvelage du puits).

2. Présentation et localisation du projet Hypster

HypSTER est le premier projet de stockage souterrain d'hydrogène vert en cavité saline soutenu par l'Union Européenne sur la période 2021-2023. Le projet coordonné par Storengy regroupe 7 partenaires : Storengy (France), Armines-Ecole Polytechnique (France), INOVYN (Royaume Uni), ESK (Allemagne), Element Energy (Royaume Uni), Ineris (France) et Axelera (France) auxquels Brouard Consulting (France) devrait bientôt se joindre. Le projet est financé à 38% par une subvention du Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) et par ses partenaires. Le projet a démarré en 2021 avec des études d'ingénierie de sous-sol et de surface qui précèdent une phase d'expérimentation en conditions réelles. Le projet utilisera la plateforme EZ53 du stockage souterrain d'Etrez, situé sur le territoire de la commune de Etrez - Bresse Vallons, dans l'Ain. Ce stockage est opéré par la société Storengy. La Figure 1 présente la localisation de la plateforme EZ53 (en vert) et de la station centrale du stockage d'Etrez (en jaune).

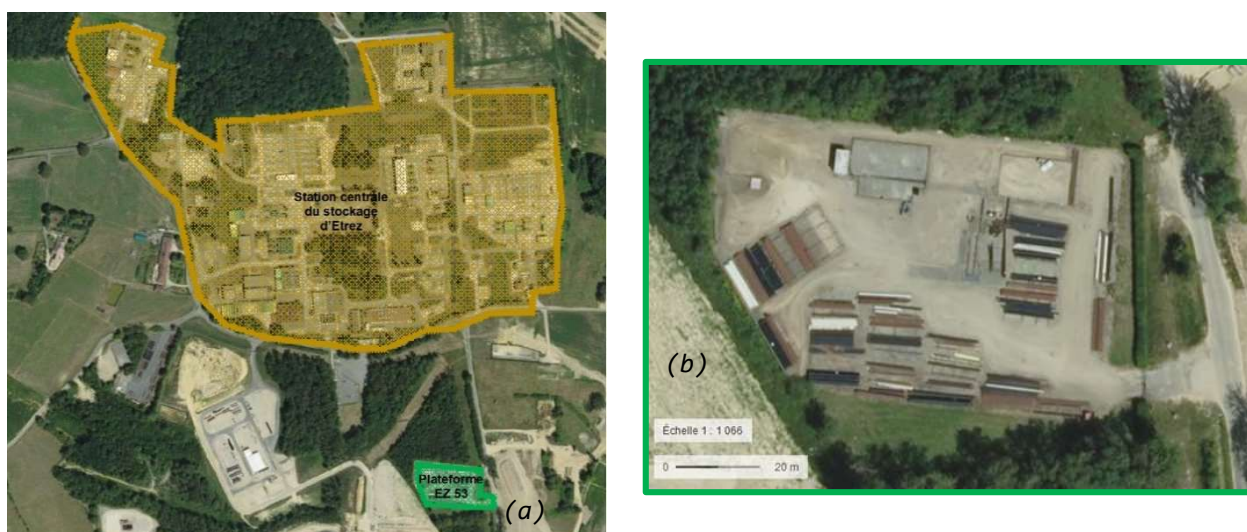


Figure 1. (a) Vue satellitaire de la plateforme EZ53 et de la station centrale du stockage d'Etrez (source : Géoportail) ; (b) Zoom sur la plateforme EZ53.

Ce projet permet de mieux identifier la place du stockage dans la chaîne de valeur de l'hydrogène. A terme, ce démonstrateur vise à accompagner le développement de l'économie de l'hydrogène en Europe. Pour la production d'hydrogène vert, le site d'Etrez

s'appuiera sur des énergies renouvelables locales (photovoltaïque, hydraulique) et un électrolyseur de 1 MW. À terme, l'installation permettra la production de 400 kg d'hydrogène par jour (l'équivalent de la consommation de 16 bus hydrogène, le plein d'un bus correspondant à 25 kg d'hydrogène environ). Cette production permettra de tester le stockage d'hydrogène vert à hauteur de 2 à 3 tonnes dans un premier temps, jusqu'à l'utilisation de la capacité totale de la cavité saline identifiée, soit 44 tonnes (l'équivalent de la consommation journalière de 1 760 bus à hydrogène).

3. Description du puits et de la cavité EZ53

Le sous-sol d'Etrez comporte deux niveaux salifères, l'un appelé « sel supérieur », situé entre 700 m et 1100 m, l'autre appelé « sel inférieur », situé entre 1150 m et 1800 m de profondeur. La cavité EZ53 a été creusée dans le « sel supérieur ». Le forage du puits EZ53 s'est déroulé du 25 mai au 18 juin 1981. La cavité a été lessivée du 19 mars au 23 avril 1982. Son lessivage n'a pas été achevé pour des raisons essentiellement économiques. La cavité EZ53 présente un petit volume (7500 m³ environ) et est toujours restée pleine de saumure ; cette cavité a été mise à profit pour effectuer des mesures et essais *in situ* à vocation scientifique. De ce fait, on bénéficie d'une très bonne connaissance de la cavité EZ53. Le puits de la cavité EZ53 comporte les principaux éléments suivants :

- un cuvelage de surface (CS) de diamètre 13-⁵/₈" ancré à 448,6 m et s'élargissant en 18-⁵/₈" à 40,30 m de profondeur. Ce cuvelage est cimenté jusqu'en surface ;
- un cuvelage de production (CP) de diamètre 9-⁵/₈" ancré à 841,73 m et s'élargissant en 13-³/₈" à 31,80 m de profondeur. Ce cuvelage est également cimenté jusqu'en surface ;
- une section découverte forée en diamètre 12-¹/₄" entre le sabot du CP et la profondeur de 846 m puis prolongée en diamètre 8-¹/₂" jusqu'à 1042 m.

On trouve ensuite : le toit de la cavité à 920 m de profondeur ; un rétrécissement (goulet) vers 930 m de profondeur et le fond de la cavité à 964 m.

Du fait de l'arrêt prématuré de son lessivage, la cavité EZ53 présente un petit volume, mesuré à 7390 m³ lors du dernier sonar effectué en 1985 (Figure 2a). La forme de la cavité est très axisymétrique. Elle présente en particulier un étranglement (« goulet ») vers 930 m (plus précisément entre 928,4 m et 929,4 m), résultant de la présence d'un banc d'insolubles. La cavité s'élargit à sa base pour atteindre un diamètre maximum de 20 m. La profondeur habituellement prise comme référence dans les calculs mécaniques pour calculer la pression au « centre » de la cavité est de 950 m. Le Tableau 1 présente les données de la cavité EZ53 utilisés pour le calcul de l'éruption.

Tableau 1. Données de la cavité EZ53 utilisée pour le calcul de l'éruption

Paramètres d'entrée	Valeur
Pression initiale de la cavité (à 920 m)	15,15 MPa
Température initiale de la cavité	45 °C
Hauteur du puits	920 m
Diamètre extérieur du puits (tubage métallique)	7- ⁵ / ₈
Volume de la cavité	7390 m ³
Surface intérieure de la cavité	2303 m ²
Rugosité du puits	0.002/1000 (m)

Un schéma simplifié du puits, tel qu'il devrait se présenter après l'opération de reprise de cet ouvrage (plus précisément au cours de l'essai cyclique), est reporté sur la Figure 2b ci-après. Ce schéma précise notamment les différents éléments constitutifs du puits et de la tête de puits.

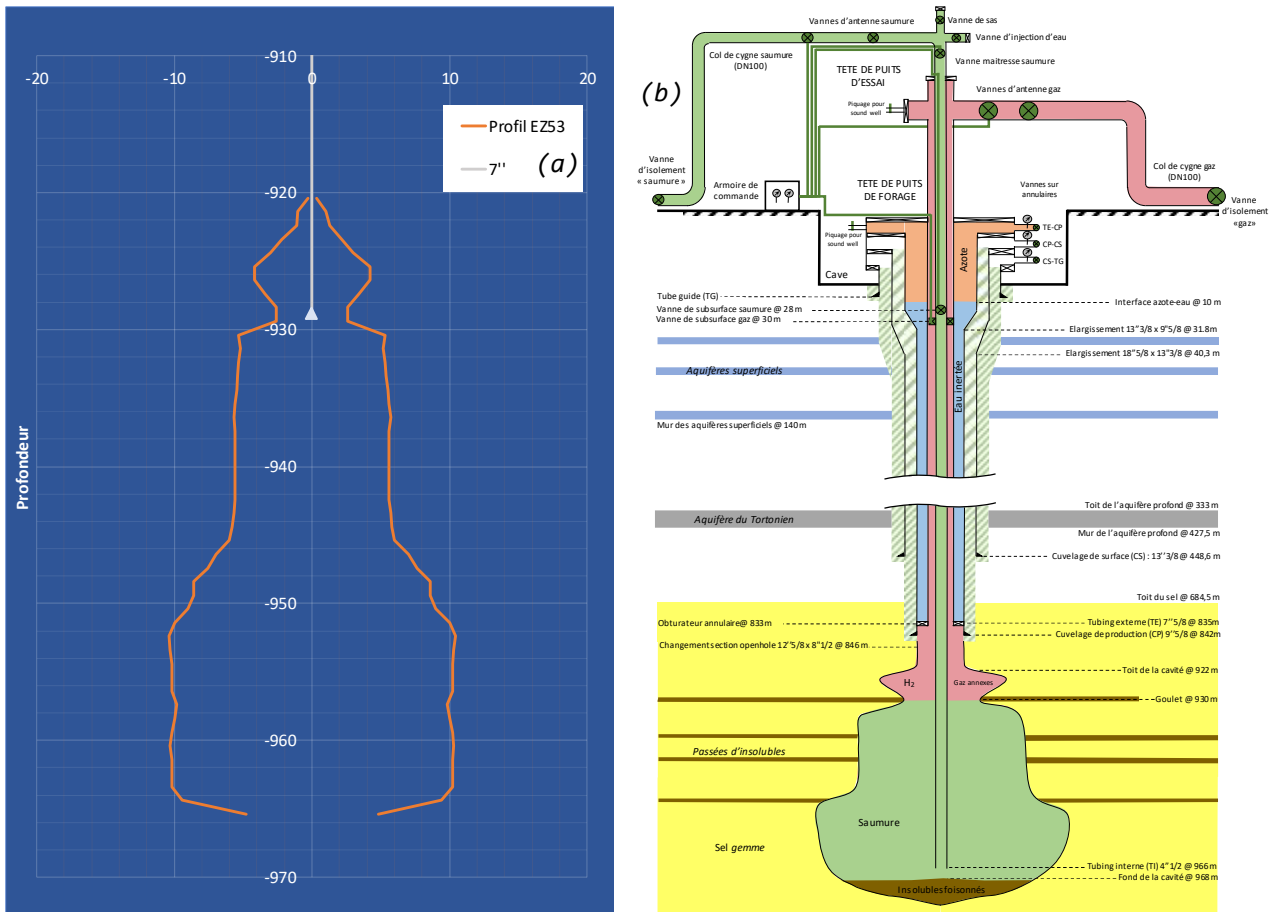


Figure 2. (a) Dernier profil sonar de la cavité EZ53 réalisé le 23 avril 1985 (source 28) ; (b) Configuration prévisionnelle du puits EZ53 qui est repris dans le projet Hypster.

L'éruption d'une cavité saline pleine de gaz est une expulsion non contrôlée de l'hydrogène en tête de puits après endommagement du système de sécurité du puits. Dans le puits de la cavité EZ53, la configuration double packer reprend une grande partie du poids de la complétion, donc en cas de rupture/éclatement de la tête de puits, l'hydrogène stocké dans la cavité s'écoulera vers l'air ambiant au travers du tubage métallique 7"5/8.

4. Modèle de prédiction de l'éruption

Le modèle de prédiction de l'éruption en cavité saline utilisé dans cet article pour calculer les paramètres clés d'une potentiel éruption dans le pilote d'Etrez a été développé dans Bérest et al. 2013. Il s'agit d'un modèle constitué d'hypothèses relativement simples conduisant à des calculs numériques de taille modeste.

4.1. Principales hypothèses du modèle

Puits

Le diamètre du puits, D , est supposé être constant sur toute sa longueur, raison pour laquelle l'aire de la section transversale du puits, $\Sigma = (\pi D^2)/4$, est aussi constante.

Écoulement turbulent

Au moins pendant les premières heures ou jours après le début de l'éruption, le débit de gaz est très rapide et l'écoulement est turbulent. Les effets du frottement sont confinés à une couche limite mince à la paroi du couvelage en acier. La vitesse moyenne du gaz est uniforme dans toute la section transversale (sauf évidemment dans la couche limite). La température, la pression ou le volume spécifique du gaz sont des fonctions du temps et de la profondeur z ($z = 0$ au toit de la cavité ou au sabot du couvelage, et $z = H$ en tête de puits).

Écoulement stationnaire

Le débit de gaz dans le puits est typiquement de quelques centaines de mètres par seconde. En d'autres termes, seules quelques secondes sont nécessaires au gaz pour se déplacer du toit de la cavité jusqu'à la tête du puits (en surface). Ce laps de temps est insuffisant pour que la pression et la température de la cavité changent de manière significative. L'état de l'écoulement est donc supposé stationnaire et, pour simplifier, la température du gaz, la vitesse du gaz, etc. seront notées $T = T(z)$, $u = u(z)$, etc. Ces hypothèses font partie du modèle d'écoulement dit "de Fanno".

Propriétés thermodynamiques de l'hydrogène

L'équation d'état de van der Waals dans le modèle semi-analytique et le modèle de Lemon (2008) dans le logiciel LOCAS (Brouard et al., 2020) sont utilisés pour décrire le comportement thermodynamique de l'hydrogène. Pour rappel, l'équation d'état de van der Waals s'écrit :

$$P = -a/v^2 + RT/(v-b) \quad (1)$$

où a et b , sont deux constantes. Les propriétés de l'hydrogène gazeux utilisé dans la modélisation sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Propriétés de l'hydrogène utilisé dans le code semi-analytique.

Gaz	Cp (J/kg/K)	Cv (J/kg/K)	$\gamma (-)$	M (g / mol)	a (J.m ³ /kg ²)	b (m ³ /kg)
H2	14831	10714	1,384	2,016	6 092	0,013

4.2. Expression analytique du flux de gaz

Le flux de gaz peut être décrit par le système d'équations suivant :

$$\dot{\mu} = u(z)/v(z) = -V_0/\Sigma (v'(z))/(v^2(z)) \quad (2)$$

$$dh/dz + u du/dz + g = 0 \quad (3)$$

$$v dP/dz + u du/dz + g = -f(u) \quad (4)$$

$$u dS/dz \geq 0 \quad (5)$$

- L'équation (2) est l'équation de conservation de la masse, où u et v définissent respectivement la vitesse en m/s et le volume massique du gaz en m^3/kg , et $\dot{\mu} = u(z)/v(z)$, ou débit massique par unité de surface en $kg/(s - m^2)$, est une constante le long du puits. Σ est l'aire de la section transversale du puits et le volume de la cavité V_0 est supposé constant.
- L'équation (3) est l'équation de l'énergie où g (m/s^2) est l'accélération de la pesanteur et h est l'enthalpie du gaz.
- L'équation (4) est l'équation de la quantité de mouvement. Les pertes de charges par unité de longueur sont décrites par $f(u) > 0$, où $f = f(u, D, \varepsilon \dots)$ est une fonction de la vitesse du gaz $u(m/s)$, du diamètre du conduit $D(m)$, de la rugosité de la paroi interne du puits ε , etc...
- L'équation (5) est la condition de positivité de la variation de l'entropie S qui joue un rôle majeur dans le modèle d'écoulement dit "de Fanno".

Si l'application de la condition à la limite : pression en tête de puits égale à la pression atmosphérique ($P_{wh} = P_{atm}$), conduit à une solution telle que l'écoulement du gaz est

supersonique dans une partie du puits (cela peut se produire lorsque la pression dans la cavité est suffisamment élevée), une autre solution doit être choisie. Cette solution est construite de telle sorte que la vitesse de l'hydrogène en tête de puits soit égale à la vitesse du son en tête de puits ($u_{wh} = c_{wh}$). L'écoulement, qui est sonique au niveau du sol, est dit "*de Fanno*". Dans un tel cas, aucune condition n'est appliquée à la pression du gaz en tête de puits, ou P_{wh} , qui, en général, est supérieure à la pression atmosphérique. Inversement, lorsque la pression dans la cavité est relativement faible, l'écoulement de gaz est dit "*normal*" : même au niveau du sol, la vitesse du gaz est plus lente que la vitesse du son, et la condition limite $P_{wh} = P_{atm}$ s'applique. L'équation décrivant l'évolution des paramètres thermodynamiques dans la cavité, d'autres conditions aux limites et les simplifications associées sont décrites dans (Bérest et al., 2013) et (Djizanne et al., 2014).

5. Résultats et discussions

Dans cette section, les résultats de la simulation de l'éruption de la cavité saline EZ53 supposée remplie d'hydrogène est présentée. Le modèle proposé par Bérest, 2013, a servi à développer un code semi-analytique pour calculer la durée d'une éruption et l'évolution des paramètres principaux du système tels que la température, la pression et la vitesse du gaz dans le puits. Une comparaison est faite entre les résultats issus dudit code semi-analytique et ceux provenant du logiciel LOCAS, développé par Brouard Consulting.

La discussion des résultats numériques porte notamment sur la durée de l'éruption, la vitesse d'écoulement de l'hydrogène à la sortie du puits, et les évolutions de la pression et de la température de l'hydrogène à la sortie de la cavité et à la sortie du puits. Ce dernier point revêt une importance particulière car la baisse de la température d'un gaz dans une cavité saline pendant une éruption est souvent sévère et des contraintes de traction d'origine thermique sont engendrées en paroi de la cavité (Bérest et al., 2012). Du point de vue de la stabilité mécanique de la cavité saline, on peut craindre que ces contraintes conduisent à l'apparition de fractures en paroi de la cavité. Un écaillage et la perte d'étanchéité de la cavité peuvent s'ensuivre. Une évaluation correcte de la température du gaz dans la cavité est donc primordiale dans ce contexte. Le problème majeur restant l'explosion – incendie redouté en surface dans le cas d'une éruption.

5.1. Evolution en fonction du temps

La rupture de la tête de puits est synonyme d'une variation rapide du stock d'hydrogène ou de la pression et donc d'une modification importante de la température de l'hydrogène. Cet écoulement rapide de l'hydrogène de la cavité vers la surface ne peut pas être considéré comme adiabatique en raison de l'apport de chaleur résultant de la conduction thermique dans le massif. Les Figures 3 et 4 présentent l'évolution des paramètres décrivant l'éruption en fonction du temps.

La pression de l'hydrogène stocké chute rapidement lors de l'écoulement dit "*de Fanno*" et plus lentement lorsque la pression en tête de puits atteint la valeur de la pression atmosphérique, c'est à dire au bout de 93 min (1h 33 min – voir Figure 3b). Dans la configuration actuelle et sur la base des hypothèses et des données d'entrée susmentionnées (Tableau 1 et Tableau 2), une éruption dans la cavité saline EZ53 du site d'Etrez, durerait 218 min (3 h 38 min). Pendant l'éruption, la température de l'hydrogène dans la cavité chuterait à -22°C en moins d'une heure (58 min) avant de se réchauffer lentement. A la fin du refroidissement en cavité, la température de l'hydrogène en tête de puits serait de -62°C. À ce moment, la variation de l'énergie engendrée par l'expansion de l'hydrogène compenserait exactement le taux de chaleur provenant de la masse rocheuse. A la fin de l'éruption, l'augmentation de la température de l'hydrogène serait rapide car sa densité serait faible (*la pression est atmosphérique*) et la capacité calorifique volumique de l'hydrogène, beaucoup plus basse qu'avant l'éruption.

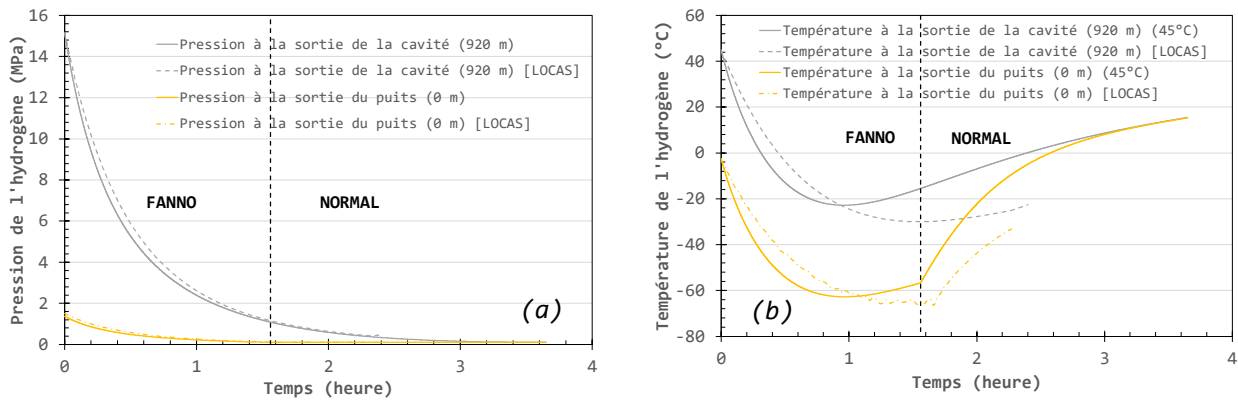


Figure 3. Évolution de la pression (a) et de la température de l'hydrogène (b) en fonction du temps pendant l'éruption : à la sortie de la cavité en grisé et à la sortie du puits en jaune.

La Figure 4a montre que la cavité saline se vide à 90% pendant l'écoulement dit "de Fanno". La vitesse de l'hydrogène diminue progressivement en écoulement normal et devient presque nulle au bout de 3h 38 min (Figure 4b) ; à la fin de l'éruption, la condensation de la vapeur d'eau non prise en compte dans ce modèle est susceptible de jouer un rôle majeur.

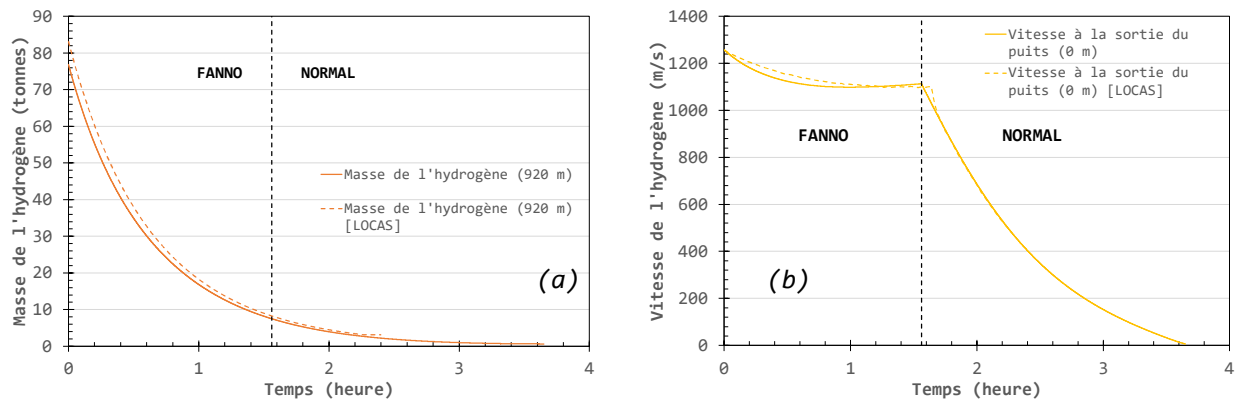


Figure 4. Évolution de la masse d'hydrogène stockée (a) et de la vitesse de sortie de l'hydrogène (b) en fonction du temps à la sortie du puits (en surface – 0 m).

5.2. Evolution en fonction de la profondeur

Dans cette section, les évolutions de la pression de l'hydrogène (Figure 5a) et de la température de l'hydrogène (Figure 5b) en fonction de la profondeur sont analysées au début de l'éruption. La température de l'hydrogène stocké dans la cavité au début de l'éruption peut ne pas être connue avec précision. Dans ce cas, une analyse paramétrique sur la température initiale de l'hydrogène dans la cavité avant l'éruption est proposée autour de 3 valeurs : 38°C, 45°C et 50°C. Les résultats montrent que dans cette configuration d'EZ53, la température initiale a une influence négligeable sur l'évolution de la pression entre la cavité et la surface (Figure 5a).

Toutefois, la Figure 5b, montre que l'évolution de la température de l'hydrogène de la cavité à la surface est la même qu'elle que soit la température d'injection, mais diffère entre les résultats du calcul semi-analytique et ceux de LOCAS. En effet, dans les calculs semi-analytiques, la température commence par augmenter dans le fond du puits. La détente de l'hydrogène est proche d'être isenthalpique car les vitesses sont encore faibles. L'invariant constitué par la somme de l'enthalpie et de l'énergie cinétique est presque égal à l'enthalpie seule et il y a vraisemblablement un effet Joule-Thomson. Pour confirmer cet effet Joule-Thomson (le gaz s'échauffe en se détendant), le même calcul a été réalisé avec une cavité remplie d'air comprimé (*dans les mêmes configurations que précédemment*) en changeant le comportement thermodynamique du gaz pour un gaz idéal. Les résultats de ce nouveau calcul n'ont pas montré de réchauffement du gaz à la base du puits.

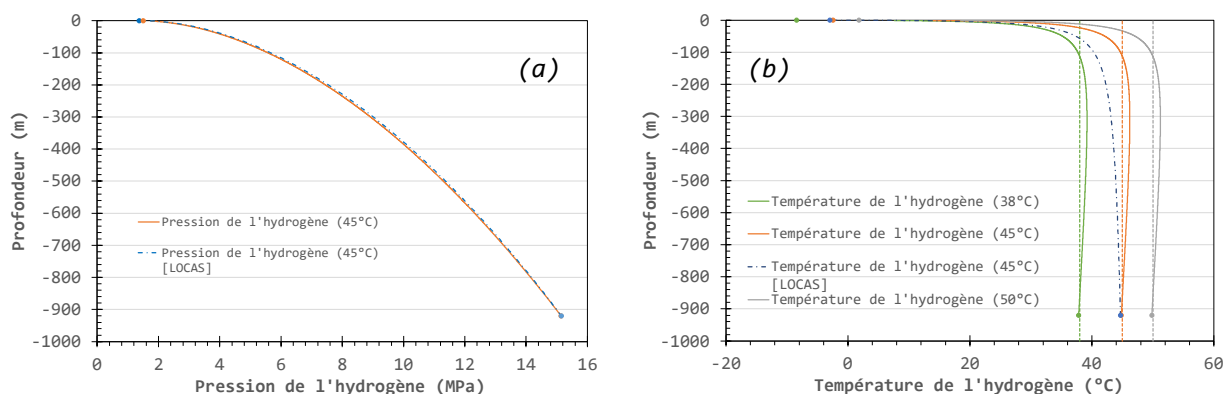


Figure 5. (a) Evolution de la pression en fonction de la profondeur pour une température initiale d'hydrogène stocké dans la cavité de 45°C ; (b) Evolution de la température en fonction de la profondeur pour 3 températures initiales de l'hydrogène stocké dans la cavité (38°C, 45°C et 50°C).

6. Conclusion

Dans cet article, le modèle thermodynamique proposé dans Bérest et al. 2013 permet de simuler l'accident majeur qu'est l'éruption. Les résultats du calcul semi-analytique réalisé par l'Ineris sont comparables à ceux produits par le logiciel LOCAS de Brouard Consulting. Des différences subsistent néanmoins en raison d'une part, des propriétés thermodynamiques particulières retenues pour l'hydrogène, notamment l'équation d'état de gaz qui est différente entre le code et le logiciel et, d'autre part, des hypothèses prises pour simuler «la fin de l'éruption». Sur la base des données d'entrée sus-citées et des hypothèses du calcul semi-analytique, la durée d'une éruption dans la configuration actuelle de la cavité EZ53 pleine d'hydrogène serait de 218 min (3h 38 min). L'écoulement d'hydrogène serait dit "de Fanno" pendant 93 min (1h 33 min), durée pendant laquelle la vitesse de l'hydrogène serait sonique en tête de puits. Puis, la pression de l'hydrogène deviendrait plus faible en entraînant des vitesses plus lentes et donc un écoulement normal. Pendant cette éruption, les températures minimales de l'hydrogène attendraient -22°C dans la cavité et -62°C en surface. Le calcul semi-analytique montre que la détente rapide de l'hydrogène stocké en cavité saline, à la suite de l'éruption de la tête de puits, peut conduire à un effet Joule-Thomson, c'est-à-dire à une augmentation de sa température dans le puits. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants, ils permettront dans un deuxième temps de calculer la hauteur du jet et les distances d'effet en surface d'un tel évènement.

7. Références bibliographiques

- Bérest P., Djizanne H., Brouard B. et Hévin G. (2012) – Rapid depressurizations: can they lead to irreversible damage? Proc. SMRI Spring Technical Conference, Regina, Canada, 63-83.
- Bérest P., Djizanne H., Brouard B. et Frangi A. (2013) – A simplified solution for gas flow during a blowout in an H₂ or air storage cavern. Proc. SMRI Spring Technical Conference, Lafayette, Louisiana, 125-138.
- Brouard B., Zakharov V. and Frangi A. (2020) – Full geomechanical modeling and data management of a gas-storage facility using LOCAS 3D. Proc. SMRI Virtual Conference.
- Djizanne H., Bérest P., Brouard B. et Frangi A. (2014) – Blowout in gas storage caverns. Oil and Gas Science Technology – Revue IFP Energies Nouvelles, DOI : 10.2516/ogst/2013208.
- Lemmon E.W. and Leachman J.W. (2008) – Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. Volume 113, Number 6, November-December 2008.