

# Tierce-Expertise du dossier de redémarrage du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Marne)



Rapport final

**BRGM/RC-70249-FR**

Octobre 2020



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**



# Tierce-Expertise du dossier de redémarrage du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Marne)

Rapport final

**BRGM/RC-70249-FR**

P. Dominique, H. Aochi, D. Raucoules

## Vérificateur :

Nom : Georges Vigneron

Fonction : Adjoint au Directeur Risques et Prévention

Date : 23/11/2020

Signature :



## Approbateur :

Nom : Karim Ben Slimane

Fonction : Directeur Risques et Prévention

Date : 23/11/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

# AVERTISSEMENT

Ce document constitue un livrable de la tierce-expertise effectuée pour le compte de STORENGY aux termes du contrat signé. Selon les termes de cet accord, ce document ne peut être diffusé à une tierce partie que sous la condition d'une autorisation écrite de STORENGY.

**Mots-clés** : Subsidence, Sismicité induite, Stockage de gaz, Interférométrie radar, Trois-Fontaines-l'Abbaye, Marne

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Dominique P., Aochi H., Raucoules D.** (2020) – Tierce-expertise du dossier de redémarrage du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Marne) - Rapport provisoire. BRGM/RC-70249-FR, 29 p., 5 Fig., 1 tab.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

## Synthèse

STORENGY envisage la reprise du soutirage de gaz du stockage souterrain de Trois-Fontaines-l'Abbaye mis en exploitation réduite depuis 2014. L'objectif est de soutirer environ 8 Twh de gaz naturel encore présent dans le sous-sol, ce qui entrainera une diminution progressive de la pression du réservoir au cours des 15 années d'exploitation envisagées.

La DREAL Grand Est, en charge de l'instruction du dossier, souhaite une tierce expertise du dossier, au sens de l'article L181-13 du Code de l'environnement.

Dans ce cadre, le BRGM est missionné pour donner son avis sur le dossier de redémarrage du site de Trois-Fontaines-l'Abbaye, dans la Marne.

Ce rapport rappelle l'ensemble des documents et données consultés dans le cadre de cette analyse. Il précise notamment l'historique d'exploitation du site, la situation actuelle et les scénarios futurs de reprise envisagés : un scénario de base et un scénario maximal.

Ce rapport s'intéresse plus particulièrement aux aléas subsidence et déformations du sol en surface et à la sismicité induite qui pourraient être générés par la reprise de l'exploitation.

Il fournit un avis concernant la prise en compte de ces deux phénomènes dans l'étude d'incidence sous-sol de STORENGY et fournit un certain nombre de recommandations – notamment en matière de surveillance - pour une reprise du site.

Les incidences potentielles sur le site CIGEO de l'ANDRA à Bure sont également évoquées.



# Sommaire

<b>1. Contexte et objet de l'expertise.....</b>	<b>7</b>
1.1. CONTEXTE .....	7
1.2. OBJECTIFS .....	7
1.3. CONTENU DE LA MISSION D'EXPERTISE.....	8
1.3.1. Dossier / sujet soumis à l'expertise .....	8
1.3.2. Contenu et objet de l'expertise.....	8
<b>2. Avis sur les conclusions relatives à l'aléa subsidence et déformations.....</b>	<b>9</b>
2.1. ANALYSE PAR INTERFÉROMETRIE RADAR.....	9
2.1.1. Approche utilisée et outils .....	9
2.1.2. Données .....	9
2.1.3. Résultats.....	9
2.2. ANALYSE PAR MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE .....	10
<b>3. Avis sur les conclusions relatives à l'aléa sismique .....</b>	<b>15</b>
3.1. PREAMBULE.....	15
3.2. ANALYSE DE LA SISMICITÉ NATURELLE/TECTONIQUE – ALÉA SISMIQUE .....	15
3.3. SISMICITÉ INDUITE.....	16
3.3.1. Magnitude et perception .....	16
3.3.2. Sismicité induite.....	16
3.3.3. Activité sismique de janvier 2017 .....	17
3.3.4. L'événement sismique du 16 octobre 1992.....	19
3.4. ANALYSE DES EFFETS FUTURS .....	20
3.4.1. Débits de soutirage .....	20
3.4.2. Pressions et différences de pression .....	20
<b>4. Conséquences éventuelles sur le projet CIGEO de BURE .....</b>	<b>23</b>
4.1. ALÉA SUBSIDENCE ET DEFORMATIONS DU SOL.....	23
4.2. ALÉA SISMIQUE .....	23
<b>5. Recommandations pour le redémarrage du soutirage du gaz résiduel .....</b>	<b>25</b>

5.1. ALÉA SUBSIDENCE ET DÉFORMATIONS DU SOL.....	25
5.2. ALÉA SISMIQUE .....	25
<b>6. Conclusions.....</b>	<b>27</b>
<b>7. Bibliographie .....</b>	<b>29</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Calcul du déplacement vertical en surface issu de la dépression de 70 bars sur le réservoir étendu numériquement. ....	12
Figure 2 : Calcul du déplacement vertical en surface issu de la dépression de 70 bars sur le réservoir étendu numériquement (même géométrie que la Figure 1) mais avec une hauteur de 50 m (soit une profondeur allant de 1 600 à 1 650 m).....	13
Figure 3 : Localisation des trois événements (en violet) de janvier 2017 sur le site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (CEA/LDG). Localisation RéNaSS (en orange) et CEA/LDG (en violet) de l'événement M2,9 du 16 octobre 1992 au sud-ouest de la carte. ....	18
Figure 4 : Localisation et date d'installation des stations sismiques proches du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (CEA/LDG-ANDRA). ....	19
Figure 5 : Évolution des pressions en bars (en noir) et différences de pression (en bleu) entre les différents blocs constituant le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye de part et d'autre de la Faille de la Marne selon un axe nord-ouest/sud-est pour l'état actuel (en haut), le scénario de base (au milieu) et le scénario maximal (en bas) (données STORENGY).....	21

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des événements induits sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Source CEA/LDG). ....	17
--	----



# 1. Contexte et objet de l'expertise

## 1.1. CONTEXTE

STORENGY envisage la reprise du soutirage de gaz du stockage souterrain de Trois-Fontaines-l'Abbaye mis en exploitation réduite depuis 2014. L'objectif est de soutirer environ 8 Twh de gaz naturel encore présent dans le sous-sol, ce qui entraînera une diminution progressive de la pression du réservoir au cours des 15 années d'exploitation envisagées.

Aussi, dans le cadre des échanges avec l'Administration compétente en matière d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), la DREAL Grand Est, en charge de l'instruction du dossier, souhaite une tierce expertise du dossier, au sens de l'article L181-13 du Code de l'environnement. Elle a suggéré que STORENGY sollicite le BRGM, l'établissement public de référence dans les applications des sciences de la Terre, pour la réaliser. La tierce expertise permet de compléter les aspects techniques du dossier et ainsi de disposer d'une vision globale et transparente sur les phénomènes (en particulier géologiques) qui pourraient survenir suite au soutirage du gaz du site de Trois-Fontaines-l'Abbaye. Ces éléments ont été confirmés le 7 juillet 2020 avec l'ensemble des parties prenantes (administration, exploitant, expert), lors d'une réunion de travail sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye et lors de la réunion de lancement de l'opération, le 17 septembre 2020.

Pour la réalisation de cette tierce-expertise, le dossier remis par STORENGY comprend :

- une présentation de type Powerpoint expliquant le Projet ;
- l'étude d'incidence sous-sol – Modification des conditions d'exploitation du stockage de Trois-Fontaines-l'Abbaye - Synthèses et conclusions ;
- l'Annexe 3B : Rapport Technique - Étude historique InSAR au nord de Saint-Dizier - Études Sentinel-1 (2015-2019), ENVISAT (2004-2010) et ERS (1995-2000), rapport TRE ALATAMIRA, 2019 ;
- l'Annexe 3C : Recherche d'évènements sismiques autour du site de Trois-Fontaines - Rapport STORENGY.

À la demande du BRGM, des éléments complémentaires ont été envoyés par STORENGY :

- DeGolyer et MacNaughton (2014) Report as of March 31, 2014 on Reserves of the Trois Fontaines Field in France for STORENGY. (envoi du 21 septembre 2020);
- les données d'interférométrie radar concernant les campagnes ERS et SENTINEL traitées par TRE ALATAMIRA (envois du 21 septembre et 1<sup>er</sup> octobre 2020).

## 1.2. OBJECTIFS

La tierce expertise rentre ainsi dans le cadre de la partie « sous-sol » de la reprise, du fait de la modification dite « substantielle » de l'usage qui consiste à repasser d'une autorisation d'un stockage avec injection et soutirage d'un certain volume de gaz, au soutirage du gaz résiduel. C'est dans ce cadre que la DREAL Grand Est a demandé une tierce expertise au BRGM.

Le dossier transmis présente l'état initial, l'état actuel et l'état futur de la structure en lien avec le projet selon différents scénarios d'exploitation, en lien avec les thématiques du sous-sol.

Deux risques sous-sol sont étudiés dans le dossier transmis :

- 1) subsidence ;
- 2) sismicité induite.

Sur la base de l'expertise de ses experts, le BRGM se prononce sur l'étude d'incidence sous-sol du Projet.

Le BRGM, certifié ISO 9001-2015, s'engage sur les conclusions et les recommandations de cette expertise, qui est de type Institutionnel.

Sa réalisation est conforme à la Charte de l'expertise du BRGM, elle-même dérivée de la norme AFNOR NF X 50-110 « *Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise* ».

### **1.3. CONTENU DE LA MISSION D'EXPERTISE**

#### **1.3.1. Dossier / sujet soumis à l'expertise**

L'expertise portera plus spécifiquement sur d'une part, la présentation de type Powerpoint expliquant le Projet et, d'autre part, l'étude d'incidence sous-sol (Modification des conditions d'exploitation du stockage de Trois-Fontaines-l'Abbaye - Synthèses et conclusion) et ses annexes.

#### **1.3.2. Contenu et objet de l'expertise**

L'expertise proposée par le BRGM a pour objectif d'apporter à STORENGY et à la DREAL Grand Est des éléments, en vue de la mise en œuvre du projet sur le site. Cette expertise comprend :

- un avis sur les conclusions relatives aux deux risques sous-sol : subsidence et sismicité induite ;
- d'éventuelles recommandations pour le redémarrage du soutirage du gaz résiduel sur le Site ;
- les interactions possibles ou pas avec le projet CIGEO de l'ANDRA à Bure.

S'agissant d'une expertise, il est rappelé que le BRGM s'astreint à une obligation de moyens pour accomplir sa mission. Il s'engage à la réaliser dans le respect des textes législatifs et réglementaires, tant européens que nationaux et en conformité avec les règles de l'art connues lors de la réalisation de sa mission.

## 2. Avis sur les conclusions relatives à l'aléa subsidence et déformations

### 2.1. ANALYSE PAR INTERFÉROMÉTRIE RADAR

L'analyse des mouvements en surface observés par interférométrie radar satellitaire est synthétisée dans le rapport produit par TRE Altamira.

#### 2.1.1. Approche utilisée et outils

Le traitement se base sur l'interférométrie radar satellitaire sur points persistants à partir des algorithmes PSINSAR® et SqueeSAR®. Les résultats fournis de façon standard par TRE Altamira sont des vitesses moyennes et séries temporelles (évolution du mouvement dans le temps) pour des points spécifiques des images radar (méthode PSINSAR®) ou des petits groupes de pixels des images (SqueeSAR®). L'intérêt de la deuxième approche est de densifier spatialement les mesures – notamment en dehors de zones urbanisées où les techniques interférométriques sont moins performantes.

Compte tenu du fait que l'on cherche à mettre en évidence des mouvements très faibles (mm/an), ces méthodes sont appropriées. En effet, la nécessité d'avoir une précision de la mesure obtenue élevée mène à privilégier les méthodes de types interférométrie sur point persistants. Pour ce type de méthodes, l'expérience de TRE Altamira (dont nous avons eu l'occasion d'évaluer les produits par le passé) **nous mène à penser que les vitesses et séries temporelles produites sont fiables et contiennent l'essentiel de l'information utilisable pouvant être extraite des jeux de données traités.**

Ces produits standard sont par ailleurs « post-traités » afin de caractériser la composante annuelle du mouvement en surface. Ce nouveau traitement présente un intérêt pour le suivi d'un stockage de gaz ou tout autre type de production présentant une périodicité annuelle. Les indicateurs extraits sont l'amplitude (mm) et la phase du mouvement annuel (valeur en radians, qui est liée à la date dans l'année du maximum de déplacement).

Ainsi les séries temporelles de mouvements peuvent être résumées par quatre valeurs cartographiables : la vitesse moyenne, l'accélération moyenne, l'amplitude du mouvement annuel et sa phase.

#### 2.1.2. Données

Afin de suivre le mouvement sur le long terme (1995-2019), il a été fait appel à trois archives de données : ERS, EnviSAT et Sentinel 1. Le choix de ces données est approprié. En effet, ces 3 missions satellitaires ont produit les archives de données issues d'acquisitions systématiques les plus complètes. Sentinel 1 continue à acquérir systématiquement ces données. Toutefois, les périodes 2001-2003 et 2011-2014 sont absentes du fait du manque de recouvrement entre missions.

À noter - comme précisé dans le rapport TRE ALTAMIRA - que Sentinel 1 acquière tous les 6 jours, contrairement à ses prédécesseurs qui acquéraient une image tous les 35 jours. Ainsi, la fiabilité des mesures (vitesse mais également amplitude du mouvement annuel) sera plus élevée dans le cas de Sentinel 1.

#### 2.1.3. Résultats

Les résultats sont présentés dans le rapport TRE ALTAMIRA sous forme de figures représentant les vitesses et amplitudes annuelles ainsi que des séries temporelles sur des

groupes de points présentant une vitesse moyenne significative. Dans ce dernier cas (figures 20 et 21 du rapport TRE ALTAMIRA), il s'agit de mouvements de subsidence localisée, situés à l'intérieur du périmètre de stockage avec des cumuls de mouvements inférieurs à 15 cm sur les 6 ans de l'archive ERS (et peu significatifs en termes d'amplitude sur les périodes couvertes par les autres missions).

Le choix des palettes de couleurs (e.g. pour les vitesses de -2 cm/an à +2cm/an) pouvant prêter à confusion dans la mesure où d'éventuels mouvements de faible ampleur pourraient ne pas ressortir, nous avons demandé à STORENGY de nous fournir les fichiers contenant les mesures afin de les visualiser avec un choix de palette de couleur faisant ressortir des mouvements plus faibles (quelques mm/an). Après visualisation, nous n'avons pas identifié de mouvements autres que ceux signalés dans le rapport TRE ALTAMIRA.

En remarque, les légendes des figures 23 et 24 du rapport TRE ALTAMIRA mentionnent l'« évolution de l'amplitude » alors qu'il s'agit visiblement de l'« amplitude », valeur identifiée comme « SEAS\_AMP » dans le rapport TRE ALTAMIRA.

Les points de référence doivent de préférence être situés à l'extérieur de la zone affectée par un éventuel mouvement afin d'éviter d'éventuels biais. Les résultats de la section 2.2 montrent a posteriori (Figure 2) que le point de référence pour ERS est bien choisi. En revanche, les points de référence pour Sentinel 1 et Envisat sont en bordure de la zone susceptible de s'affaisser.

Dans l'éventualité d'une utilisation de méthodes interférométriques pour un futur suivi de la déformation sur le site, il faudra être attentif à choisir des points de référence suffisamment éloignés de la cuvette d'affaissement potentielle.

Finalement, dans le rapport TRE ALTAMIRA, deux secteurs sont affectés par une faible subsidence localisée. La très faible extension de quelques centaines de mètres de ces secteurs et la position des points dans des zones sujettes aux travaux agricoles (labours) ne permet pas de dégager une tendance nette à l'échelle du réservoir. Le rapport conclue à « *la stabilité globale du site puisqu'aucun mouvement à large échelle n'a été détecté* ». **Au vu du rapport et des résultats (fichiers) fournis, cette conclusion nous apparaît valide, dans la limite des performances des techniques utilisées soit le mm/an, voire un peu moins.**

## 2.2. ANALYSE PAR MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE

Le déplacement de surface suite à un changement de pression dans le réservoir est calculé avec la formulation de Geerstma (1973). Le réservoir est exprimé avec deux cylindres (rayon de 3 km et 2 km, hauteur  $H=25$  m, profondeur de 1 600 m, avec une dépression de 70 bars). Cette formule est extensible numériquement pour un réservoir de géométrie complexe (code BRGM en Python-Fortran, Burnol *et al.*, 2019).

Pour commencer, nous avons repris le même calcul, mais avec le réservoir décrit numériquement en grilles au lieu d'un réservoir théorique. Nous avons utilisé les mêmes paramètres que ceux pouvant provoquer la déformation maximum, selon le test de sensibilité de la Figure 17 de l'étude STORENGY. La Figure 1 confirme que la modélisation numérique donne les mêmes résultats que les calculs réalisés par STORENGY (Figure 17).

Dans un deuxième temps, nous avons pris la géométrie des contours du réservoir telle que présentée dans la Figure 7 de l'étude STORENGY. La valeur de la superficie est très proche avec 41,1 km<sup>2</sup> au lieu de 40,8 km<sup>2</sup> dans le premier calcul. La géométrie s'étend plus loin vers le nord et se resserre au niveau de la faille courant vers le sud-est. La distribution spatiale de la déformation de surface n'est plus symétrique et se déforme selon la complexité de la géométrie. La déformation s'étend un peu plus vers le nord et se limite un peu plus au-delà de

la faille, vers le nord-est. Le déplacement vertical maximum obtenu approche 15 mm, ce qui ne change pas significativement des résultats obtenus par les calculs avec un réservoir représenté par deux cylindres. **Concrètement, le réservoir est suffisamment profond pour que l'influence de la géométrie soit négligeable.**

Concernant la sensibilité des résultats aux paramètres du modèle, il est à noter que le déplacement est proportionnel au changement de pression si la géométrie est inchangée. Donc, si on double la pression de 70 bars à 140 bars, le déplacement en surface peut aussi doubler à près de 30 mm (Figures 25 et 26 de l'étude STORENGY).

De la même manière, la hauteur du réservoir peut affecter les résultats du calcul. Un doublement de la hauteur, 50 m au lieu de 25 m, engendrerait un déplacement en surface approximativement doublé, comme indiqué dans la Figure 2. La déformation de surface est également quasi-doublée. Cela montre l'importance de la définition du volume du réservoir dans les modélisations prédictives.

Sur cette base, un calcul analytique permet d'estimer la déformation de surface. Si l'on considère un déplacement maximum de 15 mm pour une durée de l'opération de 22 ans (1984-2006), le taux de déformation calculé est de 0,7 mm/an. Si cette valeur est difficile à mesurer sur le site par interférométrie satellitaire sur une courte période, elle reste cependant possible à vérifier sur le long terme par cette méthode.

La pente générée en surface reste très faible, comme discuté dans l'étude STORENGY. Pour arriver à une pente de 2 pour mille sur 5 km de longueur, l'amplitude nécessaire est

- $U_z = 2 \text{ ‰} \times 5 \text{ km} = 10 \text{ m}$ .

Cette valeur n'est pas vraisemblable si l'on suppose une déformation élastique.

**Le BRGM valide donc les prédictions de STORENGY en matière de subsidence et de déformation.**

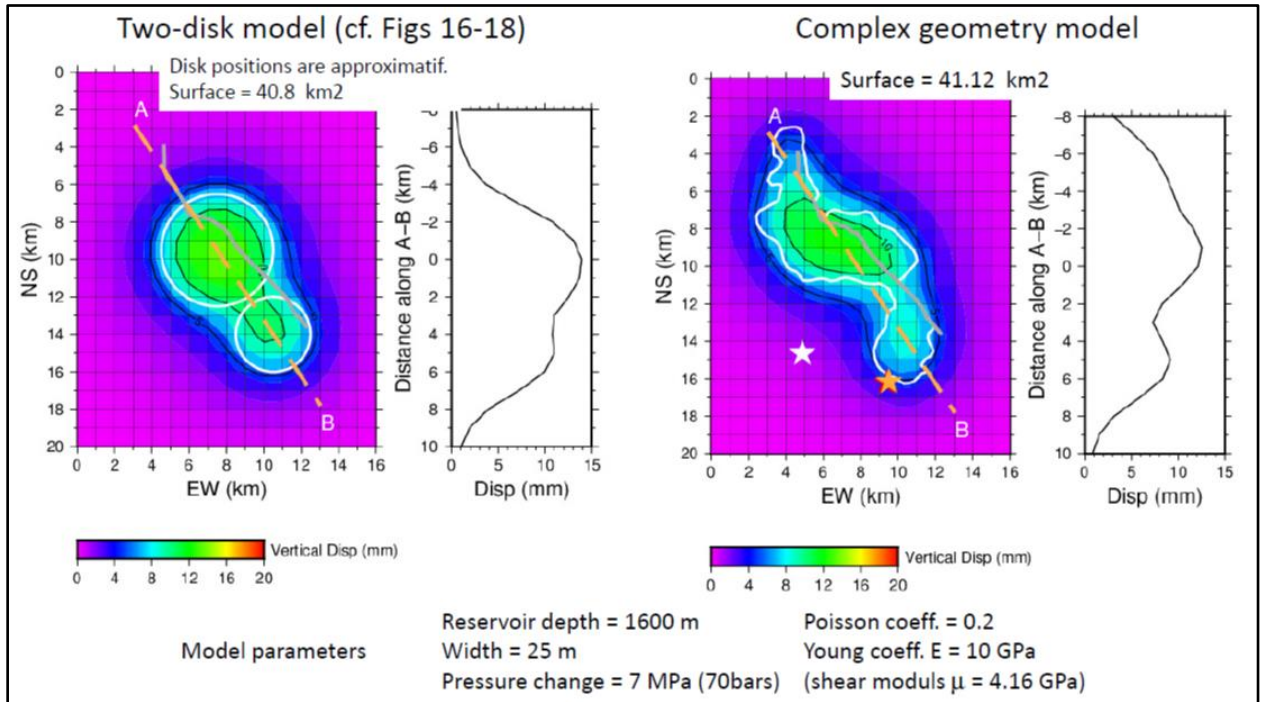


Figure 1 : Calcul du déplacement vertical en surface issu de la dépression de 70 bars sur le réservoir étendu numériquement.

À gauche, géométrie avec deux cylindres (cercles blancs). Profil A-B de subsidence en surface (en orange). À droite, géométrie complexe prise en compte (contour blanc). Profil A-B de subsidence en surface (en orange). Faille principale en gris. Les paramètres des modèles sont également donnés. Point de référence Mission ERS pour l'analyse d'InSAR (Mission ERS - X = 844561.24 m ; Y=6840611.37m – Lambert 93) (étoile blanche) ; Point de référence Mission Sentinel 1 (X = 849197.86 m ; Y = 6839091.66 m – Lambert 93) (étoile rouge) ; Point de référence Mission Envisat (X = 849083.93 m ; Y = 6839047.01 m – Lambert 93) (étoile orange).

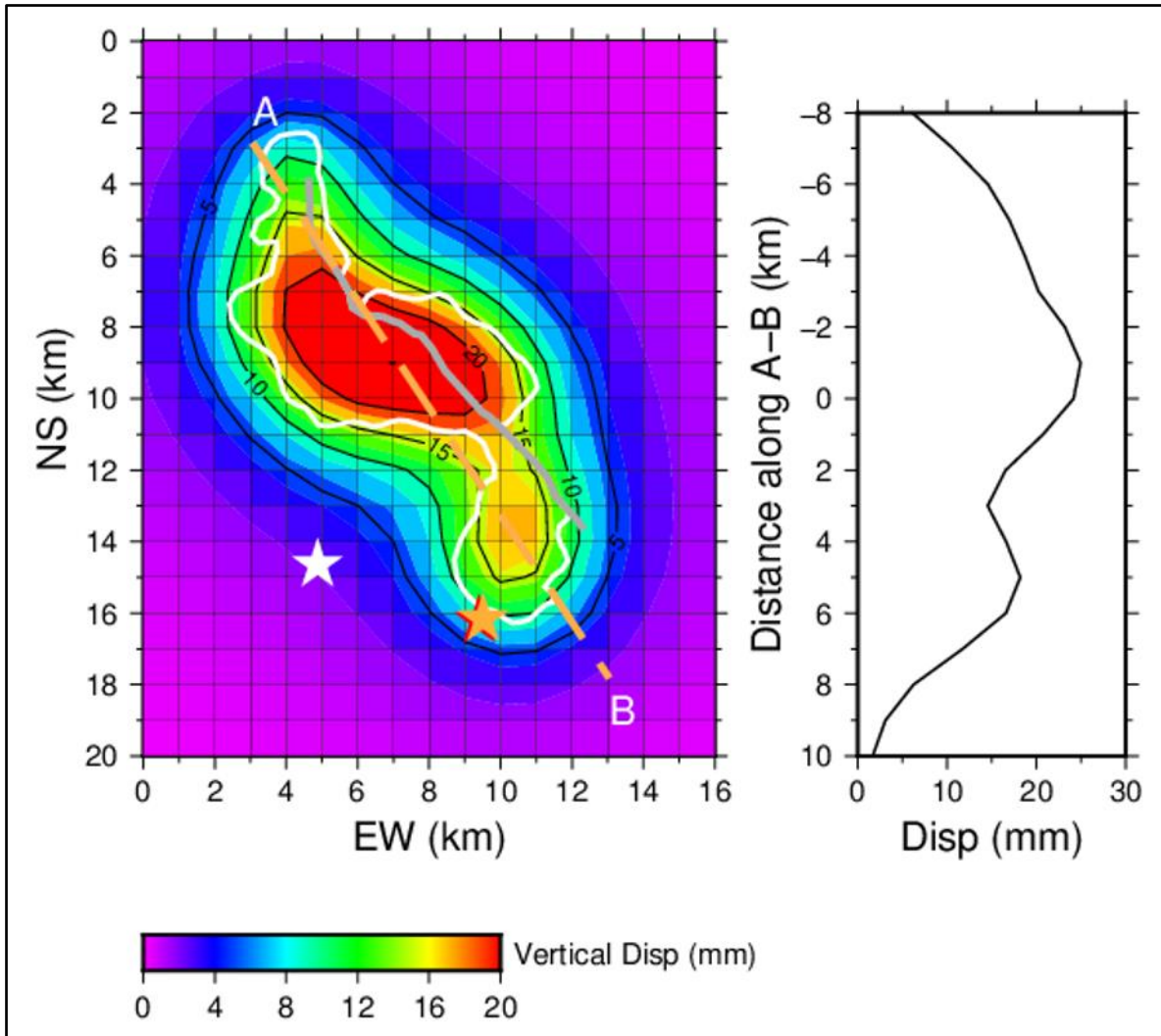


Figure 2 : Calcul du déplacement vertical en surface issu de la dépression de 70 bars sur le réservoir étendu numériquement (même géométrie que la Figure 1) mais avec une hauteur de 50 m (soit une profondeur allant de 1 600 à 1 650 m).

Profil A-B de subsidence en surface (en orange). Point de référence Mission ERS pour l'analyse d'Insar (Mission ERS -  $X = 844561.24 \text{ m}$  ;  $Y = 6840611.37 \text{ m}$  – Lambert 93) (étoile blanche) ; Point de référence Mission Sentinel 1 ( $X = 849197.86 \text{ m}$  ;  $Y = 6839091.66 \text{ m}$  – Lambert 93) (étoile rouge) ; Point de référence Mission Envisat ( $X = 849083.93 \text{ m}$  ;  $Y = 6839047.01 \text{ m}$  – Lambert 93) (étoile orange).





## 3. Avis sur les conclusions relatives à l'aléa sismique

### 3.1. PRÉAMBULE

L'avis donné dans ce chapitre concerne la prise en compte de la sismicité. Il repose sur l'analyse de l'étude STORENGY d'incidence sous-sol du stockage souterrain de Trois-Fontaines-l'Abbaye, dans la Marne, de mars 2020. Il s'intéresse plus particulièrement aux chapitres V.2.3. (État actuel / sismicité induite), VI.2.3. (Analyse des effets futurs / sismicité induite) et VIII.2. (Mesures d'évitement – Compensation / Prévisions d'évolution du dispositif). Cet aléa est également pris en compte de façon plus détaillée dans l'Annexe C : Recherche d'événements sismiques autour du site de Trois-Fontaines-l'Abbaye, rapport interne STORENGY de 2020.

### 3.2. ANALYSE DE LA SISMICITÉ NATURELLE/TECTONIQUE – ALÉA SISMIQUE

Le Site se trouve sur le système de Failles de la Marne qui constituent le fossé le plus occidental de la Lorraine méridionale. Ce fossé est délimité par deux failles normales bordières de socle décalant verticalement les formations géologiques avec un rejet de l'ordre de 80 mètres. D'une trentaine de kilomètres de longueur, subméridien dans sa partie Sud, il s'oriente vers le nord-ouest à hauteur du stockage de Trois-Fontaines-l'Abbaye. Ce système de failles se prolonge plus au Sud par le système de failles de Joinville de direction nord-nord-est/sud-sud-ouest, lui-même limité au sud par la Faille de Vittel. Il est également à noter que le site se trouve dans le prolongement occidental de l'anticlinal sarro-lorrain, vaste structure primaire orientée est-nord-est/ouest-sud-ouest. Elle est particulièrement visible dans sa partie orientale, à l'affleurement, en Lorraine et en Sarre, où elle est accompagnée de structures cassantes majeures (faille de Metz). Elle plonge sous le recouvrement secondaire lorsque l'on se déplace vers l'ouest. Cet anticlinal, même s'il ne s'exprime pas par de la tectonique cassante au niveau du site et dans les terrains du secondaire, constitue néanmoins un trait structural majeur qui explique sans doute l'existence du gisement initial de gaz naturel de Trois-Fontaines-l'Abbaye.

L'étude STORENGY inventorie la sismicité instrumentale répertoriée dans des catalogues d'événements par différents observatoires nationaux, c'est-à-dire la sismicité enregistrée depuis 1962 (début de l'instrumentation à l'échelle nationale par le CEA/LDG). Elle intègre notamment la refonte nationale du catalogue de sismicité instrumentale dans le cadre des travaux du Groupe SI-Hex (Cara *et al.*, 2015) qui intègre les données des principaux réseaux nationaux du RéNaSS et du CEA/LDG de 1962 à 2009. Ce catalogue fait référence et constitue une excellente source pour la sismicité instrumentale, même s'il ne contient pas les données postérieures à 2009. C'est pourquoi STORENGY a complété ce catalogue par les données du RéNaSS et du CEA/LDG jusque fin 2019.

On peut regretter l'absence de consultation de la sismicité historique, c'est-à-dire de la macrosismicité décrite essentiellement par les témoignages écrits relatant les effets des séismes sur la population, les biens (constructions) et l'environnement. Cette information est libre d'accès dans la base de données SisFrance (SisFrance, 2016). [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net).

Le site de Trois Fontaines-l'Abbaye se trouve dans le bassin parisien septentrional. Il se trouve dans une zone de très faible sismicité (1) – selon le zonage sismique réglementaire de la France - avec des événements historiques ne dépassant pas l'intensité épicertrale VI MSK

(Medvedev, Sponheuer, Karnik) (SisFrance, 2016). Compte tenu de cette faible sismicité, on peut supposer que le jeu des failles dans ce secteur est normal (c'est-à-dire avec un mouvement d'affaissement d'un bloc par rapport à l'autre) ou décrochant (c'est-à-dire avec un mouvement horizontal d'un bloc par rapport à l'autre) ou mixte normal-décrochant.

**En résumé, STORENGY rappelle le contexte de très faible sismicité de ce secteur, ce qui est tout à fait conforme au contexte sismotectonique régional, même si cela n'exclue pas la possibilité de séismes de plus forte magnitude à ce qui est mentionné dans l'étude (M 2,9 – 16 octobre 1992), par analogie avec des contextes sismotectoniques similaires.**

### 3.3. SISMICITÉ INDUITE

#### 3.3.1. Magnitude et perception

Dans son rapport, STORENGY indique que « *la magnitude de 2,9 correspond à la plus faible magnitude d'un séisme ressenti en surface* ». Cette affirmation est surprenante car de nombreux séismes tectoniques sont ressentis pour de plus faibles magnitudes. Ce fut par exemple le cas lors du séisme d'Annecy en 1996 où des répliques de magnitude proches de 1 étaient régulièrement ressenties par la population. De même, lors de la crise de Clansayes dans le Tricastin, **des séismes de magnitude négative ont pu être ressentis** (Thouvenot *et al.*, 2009).

En effet, la perception (ou le ressenti) en surface d'un séisme dépend de sa magnitude, mais aussi de sa profondeur, des caractéristiques géomécaniques des sols en subsurface, des conditions de perception (au repos, en immeuble de grande hauteur par exemple) et d'autres paramètres encore.

Ces observations sont encore plus fréquentes pour ce qui concerne la sismicité induite (d'origine anthropique) car les sources de déclenchement sont en général relativement superficielles – de la surface à quelques kilomètres de profondeur. Ainsi, sur le bassin minier de Gardanne, les séismes de magnitude 1 sont régulièrement ressentis par la population.

Cependant, **l'extraction réalisée par STORENGY inclue bien l'ensemble des données de faible magnitude** issues des catalogues SI-Hex (Mw 1,2), RéNaSS (MLv 1,2) ainsi que la sismicité induite (RéNaSS) avec des tirs de carrière dont la magnitude minimale est de 1,7.

#### 3.3.2. Sismicité induite

STORENGY indique que « *durant la période 1984 à 2019, seulement 3 séismes ont été enregistrés à une distance maximum de 30 km du site de Trois-Fontaines avec des magnitudes comprises entre 1.2 à 2.9 MLv.* »

L'extraction des événements à partir du catalogue RéNaSS intègre bien les événements induits : les tirs de carrière y sont mentionnés (cf. ci-dessus).

Un gros travail de discrimination des événements induits a été réalisé par le Groupe de Travail SI-Hex afin d'exclure ces événements induits du catalogue. Même si certains événements induits peuvent subsister dans ce catalogue, **le catalogue Si-Hex ne peut donc pas être retenu pour identifier des événements induits qui se seraient produits sur le Site de Trois-Fontaines-l'Abbaye**. Enfin, il faut bien considérer que les localisations fournies sont entachées d'une assez forte incertitude concernant leur localisation pouvant atteindre quelques dizaines de kilomètres, en particulier dans les secteurs mal couverts par les stations sismiques, pour les séismes les plus anciens (avant 2002) ou de faible magnitude.

Une extraction classique à partir du catalogue de sismicité du CEA/LDG fournit également les séismes naturels excluant tout événement artificiel et induit.

### 3.3.3. Activité sismique de janvier 2017

Une recherche plus approfondie à partir du catalogue du CEA/LDG - incluant les événements induits - permet de mettre en évidence **3 événements induits de petite magnitude (inférieure à 1,5), survenus sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye** (Tableau 1). Les valeurs reportées des demi petit-axe et demi grand-axe de l'ellipse de confiance à 90 % de la localisation sont de quelques kilomètres (inférieures à 3 km), avec un azimut du grand axe orienté globalement nord-ouest/sud-est (direction principale du stockage). Ceci confère une faible incertitude sur la localisation qui, dans tous les cas, positionne l'événement sur le site de stockage de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Figure 4).

On peut aussi remarquer la profondeur superficielle des événements (2 km). Ceci est compatible avec les arrivées émergentes observées. Cette profondeur - bien qu'incertaine compte tenu de la distance (20 à 25 km) à la station la plus proche - est cohérente avec la profondeur du stockage.

DATE	Temps Origine (TU)	Latitude	Longitude	Ellipse de confiance à 90%			Profondeur (km)	Magnitude		Type
				½ grand axe (km)	½ petit axe (km)	Azimut (°)		MI	Md	
07/01/2017	01h03 47	48,7067	4,9428	2,2	1,5	146	2	1,4	1,5	Séisme induit
21/01/2017	01h08 07	48,7093	4,9571	2,6	1,9	123	2	1,0	1,1	Séisme induit
22/01/2017	01h30 33	48,6872	4,9759	2,8	1,1	153	2	0,6	0,9	Séisme induit

Tableau 1 : Caractéristiques des événements induits sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Source CEA/LDG).

Par ailleurs, nous avons récupéré en ligne un document technique de l'ANDRA (Delay, 2019) confirmant cette identification des trois événements induits survenus en 2017, au droit du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye.

Ce secteur était assez mal instrumenté avant 2002 (Figure 4). De 1965 à 2002, la station la plus proche se trouvait à Haudompré (HAU) dans les Vosges, à environ 125 km de Trois-Fontaines-l'Abbaye. C'est à partir de l'installation de nouvelles stations SFTF (55 km), MEZF (20 km), RFYF (35 km) en 2002, de PAGF (55 km) en 2008, et surtout de SAVF en 2014, située à quelques kilomètres de Trois-Fontaines-l'Abbaye, que la détection et la localisation précise de la sismicité sur ce secteur se sont améliorées, en particulier pour les petits événements de magnitude inférieure à 2 (microsismicité).

**On peut considérer que l'écoute sismique des petits événements ( $M < 2$ ) sur le secteur de Trois-Fontaines-l'Abbaye s'est grandement améliorée à partir de décembre 2014.**

**Cette installation progressive de l'instrumentation peut expliquer l'absence de détection d'événements sismiques de faible magnitude de 1984 à 2002 pendant la période de production principale de 1984 à 2006, avec des débits maximums de soutirage entre 1991 et 1997.**

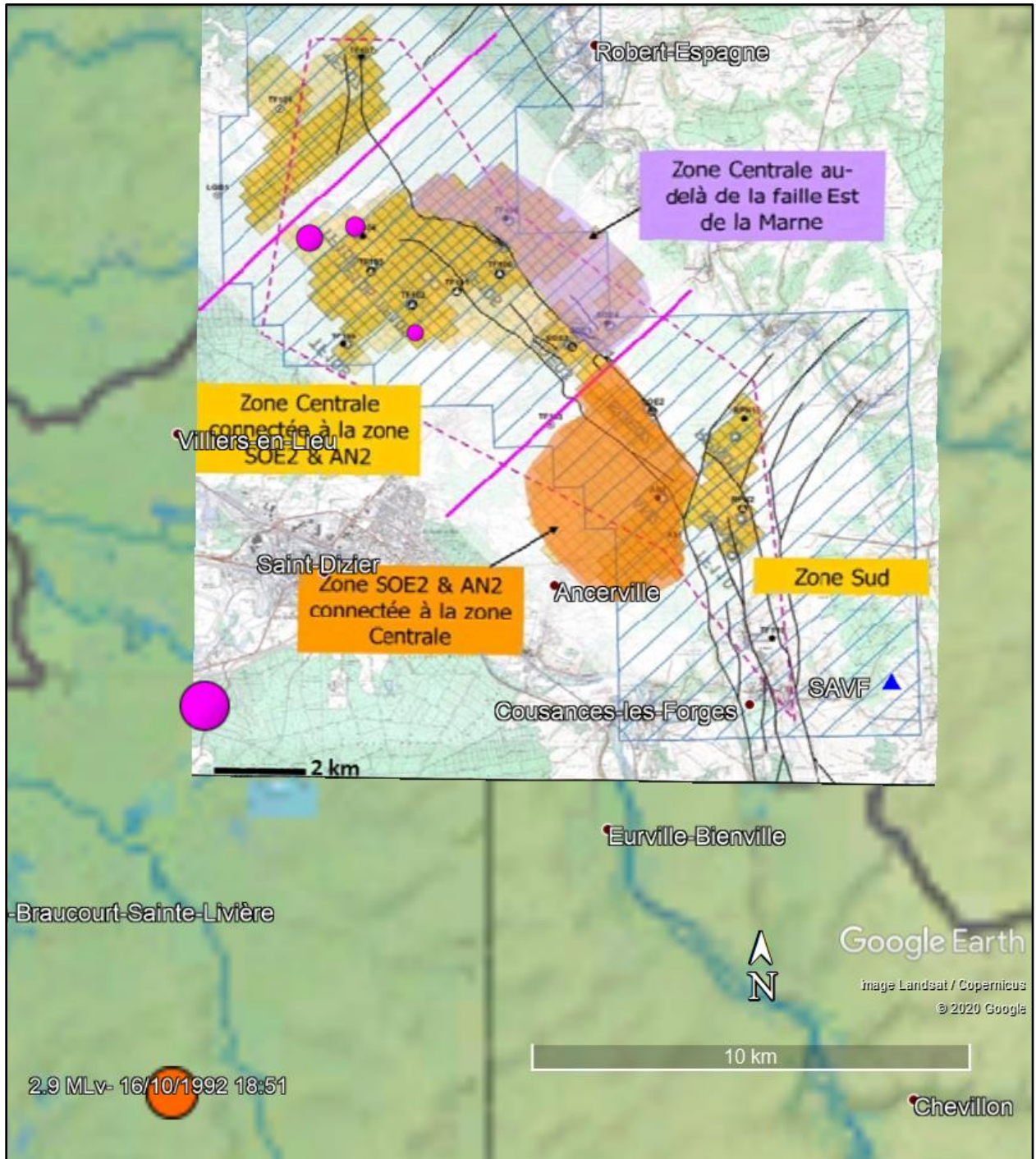


Figure 3 : Localisation des trois événements (en violet) de janvier 2017 sur le site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (CEA/LDG). Localisation RéNaSS (en orange) et CEA/LDG (en violet) de l'événement M2,9 du 16 octobre 1992 au sud-ouest de la carte.



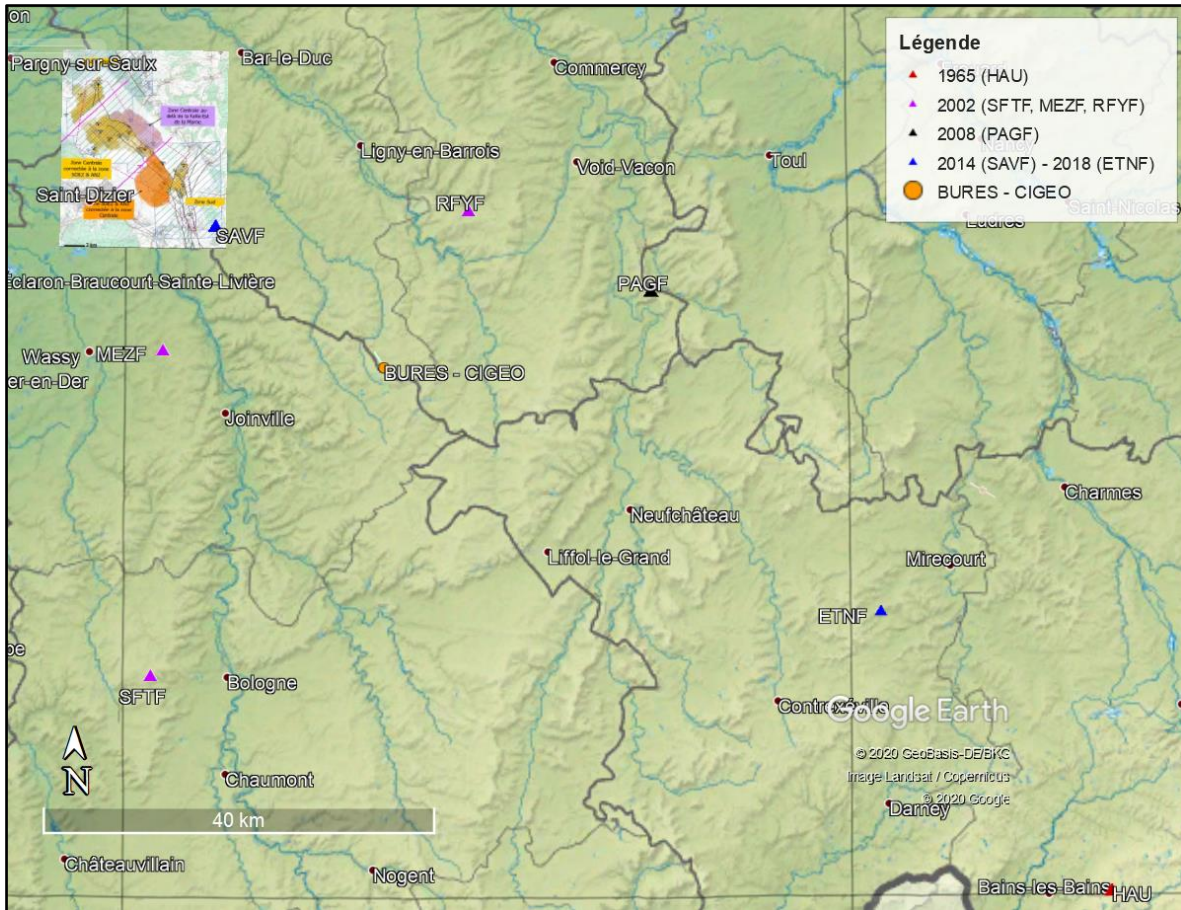


Figure 4 : Localisation et date d'installation des stations sismiques proches du site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye (CEA/LDG-ANDRA).

### 3.3.4. L'événement sismique du 16 octobre 1992

Par ailleurs, l'annexe C de l'étude STORENGY reporte la localisation RéNaSS de l'événement régional le plus fort du 16 octobre 1992 18h51 TU, de magnitude 2,9.

Comme vu ci-dessus, le réseau sismique était peu dense à cette époque. La station sismique la plus proche du CEA/LDG (HAU) se trouve à plus de 120 km de l'événement et le gap azimutal, c'est-à-dire la distance azimutale maximale en degrés par rapport à l'épicentre entre deux stations voisines utilisées dans le calcul est de 179°. Ces éléments rendent l'incertitude forte sur sa localisation, probablement de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. La localisation du CEA/LDG situe cet événement – qu'il classe comme induit - à une dizaine de kilomètres plus au Nord que celle du RéNaSS, ce qui le place à une dizaine de kilomètres au Sud-Ouest du stockage de Trois-Fontaines-l'Abbaye (Figure 3). **Cette forte incertitude** concernant la localisation d'une part, et son absence du catalogue SI-Hex - alors même que sa magnitude est de 2,9 – d'autre part, **laisse supposer une origine induite pour cet événement, confirmée par le CEA/LDG**. Cet événement est survenu pendant une période de pleine exploitation du gaz avec des débits jamais atteints auparavant (Figure 8 du rapport STORENGY). Même incertaine, la profondeur est aussi superficielle : 2 km pour le CEA/LDG et 5 km pour le RéNaSS (fixé par l'opérateur).

Cet événement peut aussi avoir été généré par une carrière, comme indiqué dans un document technique de l'ANDRA (Delay, 2019), même si, dans ce cas, sa magnitude est assez élevée et l'heure assez peu commune pour un tir (20h51 heure locale).

Enfin, toujours par rapport à la localisation fournie par le CEA/LDG, la retenue d'eau du Der-Chantecoq se trouve à une distance d'une dizaine de kilomètres équivalente à celle du stockage. Tous les dix ans, il est procédé à une vidange décennale complète qui permet l'examen des ouvrages immergés. La dernière vidange décennale a eu lieu en 2003. Il est possible qu'une vidange totale ou partielle ait été réalisée en 1992. De plus, les opérations de soutien d'étiage nécessitent une vidange généralement menée entre le 1<sup>er</sup> juillet et le 31 octobre. Ce type de variation de niveau d'eau peut occasionner une sismicité induite. La hauteur de la retenue reste cependant modeste avec une hauteur moyenne de 7 m.

### 3.4. ANALYSE DES EFFETS FUTURS

#### 3.4.1. Débits de soutirage

Sans préjuger des débits de soutirage envisagés sur les deux scénarios (scénario de base et scénario maximal), nous avons essayé d'extrapoler à partir des courbes de la Figure 6 et de la Figure 8 de l'étude STORENGY les débits moyens annuels prévus en supposant une exploitation linéaire, même si ce n'est pas le cas.

Nous obtenons ainsi un débit moyen annuel de l'ordre de 65 millions de m<sup>3</sup> pour le scénario de base (2021-2036) et de 80 millions de m<sup>3</sup> pour le scénario maximal (2021-2042) que nous pouvons comparer aux 99 millions de m<sup>3</sup> sur la période d'exploitation allant de 1985 à 2006.

Sur la période 1992-1996 de soutirage maximal (en incluant la période d'arrêt pour la maintenance des mois de juillet et août), le débit moyen annuel a atteint près de 180 millions de m<sup>3</sup>.

Par conséquent, il apparaît que **les débits annuels envisagés pour deux scénarios sont inférieurs à ceux pratiqués lors de la période d'exploitation (1984-2006)**. La sollicitation dynamique sur le réservoir (différence de pression sur le réservoir principal par unité de temps) devrait être inférieure à ce qu'elle a été historiquement. **En revanche, la différence de pression entre le réservoir principal au sud-ouest et les blocs au nord-est augmente significativement avec le temps**, quasiment d'un facteur 2, comme exposé dans le chapitre suivant.

#### 3.4.2. Pressions et différences de pression

STORENGY a prévu de reprendre le soutirage de gaz sur le site avec deux scénarios : un scénario de base et un scénario maximal.

Comme indiqué aux chapitres V.2.2. et V.2.3 de l'étude STORENGY, **ce soutirage va augmenter les différences de pression entre les deux compartiments nord-est et sud-ouest séparés par la Faille Est de la Marne**, plus précisément la faille bordière nord-est du fossé de la Marne qui constitue une barrière étanche. Ces compartiments nord-est et sud-ouest sont eux-mêmes séparés en blocs (DeGolyer et MacNaughton, 2014) :

Au nord-est :

- bloc D (Zone Nord) – bloc non exploité, ne contribue pas au gisement ;
- bloc B (Zone centrale au-delà de la Faille Est de la Marne) – bloc non exploité ;
- bloc C1 – bloc exploité par le passé.

Au sud-ouest :

- bloc A (Zone centrale connectée à la zone SOE2 et AN2) - seul bloc exploité ;
- bloc E (Zone SOE2 et AN2 connectée à la zone centrale) - bloc non exploité ;
- bloc C2 (Zone Sud) - bloc exploité par le passé.

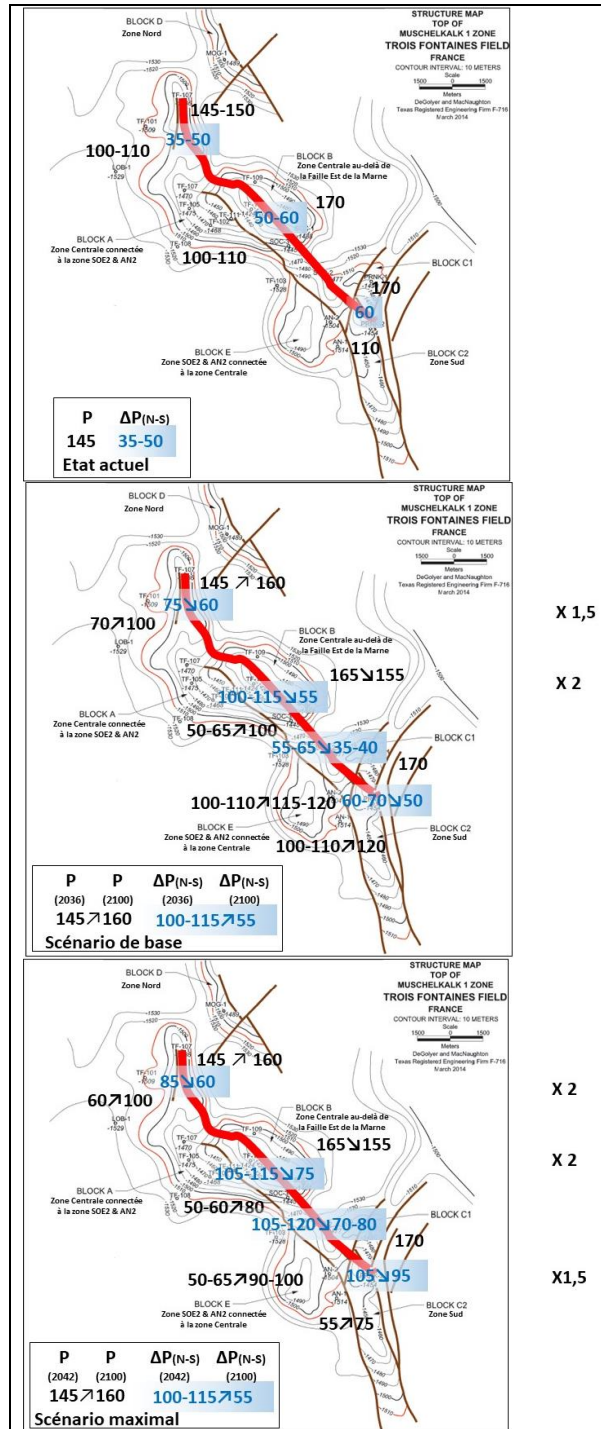


Figure 5 : Évolution des pressions en bars (en noir) et différences de pression (en bleu) entre les différents blocs constituant le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye de part et d'autre de la Faille de la Marne selon un axe nord-ouest/sud-est pour l'état actuel (en haut), le scénario de base (au milieu) et le scénario maximal (en bas) (données STORENGY).

Faille bordière nord-est du Fossé de la Marne (en rouge). Les flèches indiquent l'évolution de la pression ou de la différence de pression entre l'état à l'issue du soutirage (2036 – scénario de base ; 2042 – scénario maximal) et l'état en 2100. Facteur multiplicatif maximal sur les différences de pression entre le scénario concerné et l'état actuel sur les différents compartiments (à droite des figures). (Schéma, d'après DeGolyer et MacNaughton, 2014).

Sur la Figure 5, nous avons représenté les pressions et les différences de pression en bars pour l'état actuel, le scénario de base et le scénario maximal sur les différents secteurs de la Faille Est de la Marne. Ces données issues d'une modélisation réalisée par STORENGY sont fournies dans la Figure 23 de l'étude STORENGY.

Dans l'état actuel, les différences de pression augmentent du nord-est vers le sud-ouest de 35-50 à 60 bars.

Dans le scénario de base, les différences de pression varient de 55 à 115 bars avec des variations, selon les zones Nord, Centrale et Sud.

Enfin, dans le scénario maximal, les différences de pression varient de 85 à 120 bars avec des variations, selon les zones Nord, Centrale et Sud.

**On constate une augmentation des différences de pression quasiment d'un facteur 1,5 à 2 quel que soit le scénario proposé. Il est également à noter que ces différences de pression ne se répartissent pas de façon homogène le long de la faille Est de la Marne.**

L'état « d'équilibre » prévu en 2100 pour le scénario de base est assez comparable à celui de l'état actuel avec des différences de pression de l'ordre de 35 à 60 bars, même si la répartition de ces différences de pressions est assez différente. Pour le scénario maximal, les différences de pression sont un peu plus élevées d'un facteur 1,5 par rapport à l'état actuel, avec des valeurs allant de 60 à 95 bars.

Ces valeurs de différence de pression dans le réservoir – même si celles-ci se développent progressivement dans le temps – peuvent être mises en perspective avec les pressions maximales d'injection ou de réinjection limitées réglementairement en France à 100 bars en tête de puits, dans le cas de la géothermie profonde, afin de prévenir toute nuisance liée à la sismicité induite. Cette valeur de 100 bars en tête de puits conduit à adopter des pressions réservoir bien inférieures.

**Cette augmentation du déséquilibre déjà existant et significatif des pressions de part et d'autre de la faille et la répartition hétérogène de ces différences de pression le long de la faille méritent une vigilance accrue de la stabilité mécanique du système de faille local. La forte probabilité de l'existence d'une sismicité induite passée (janvier 2017) sur le site accentue encore la nécessité de prendre des dispositions spécifiques pour surveiller l'évolution du site.**

La faible activité sismique locale et régionale est principalement liée à une faible contrainte tectonique (Wileveau *et al.*, 2007). C'est probablement la raison pour laquelle aucune activité induite importante n'est survenue sur le site jusqu'à maintenant (Dieterich *et al.*, 2015).



## 4. Conséquences éventuelles sur le projet CIGEO de BURE

### 4.1. ALÉA SUBSIDENCE ET DEFORMATIONS DU SOL

La déformation de surface s'atténue en fonction de  $(1/r)$ . L'estimation de la subsidence, basée sur une réponse élastique du milieu, donne une amplitude de 1 mm en terminaison de profil sud-est (environ 5 km de distance à partir du maximum de déformation) dans la Figure 1. Cela dit, à une trentaine de kilomètres du site, la subsidence cumulée est estimée inférieure à 0,2 mm, qui ne semble pas mesurable avec les outils proposés. En réalité, la trentaine de kilomètres correspond globalement à l'épaisseur de la croûte. Seule, une structure à grande échelle (pluri déca-kilométrique) avec une surcharge ou sous-charge significative peut impacter le processus de déformation à grande distance. L'influence de l'exploitation de gaz sur la déformation à une distance de l'ordre d'une trentaine de kilomètres n'est par conséquent pas à considérer comme un aléa.

### 4.2. ALÉA SISMIQUE

Comme indiqué, la région se trouve en aléa sismique très faible.

La possibilité d'événements sismiques induits sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye existe.

La surveillance de cette sismicité reste une priorité dans la perspective du projet de soutirage du gaz résiduel sur un accident structural régional majeur que constitue la Faille de la Marne qui atteint le socle.

Le site CIGEO de Bure se trouve à moins d'une vingtaine de kilomètres du segment nord-nord-ouest/sud-sud-est de la Faille de la Marne et à une trentaine de kilomètres du segment nord-ouest/sud-est sur lequel se trouve le site STORENGY.

Les installations CIGEO ont été dimensionnées de la manière suivante pour les installations de surface et les installations souterraines, (Andra, 2005) :

- concernant la période d'exploitation du site, sur la base du plus fort séisme historique majoré de la région dont l'épicentre a été déplacé, au plus proche du site, en accord avec le schéma tectonique régional. Cette approche correspond à un séisme de magnitude 6 à 25 km du site de CIGEO ;
- concernant le long-terme et pour les approches de sureté, le Séisme Maximal Physiquement Possible (SMPP) a été considéré ramené à la position des failles les plus proches du site. Ce séisme aurait une magnitude 6,1 à 6 km du site de CIGEO.

Ces approches très majorantes couvrent donc naturellement les mouvements des séismes qui pourraient être induits par la reprise de l'exploitation à Trois-Fontaines-l'Abbaye, située par ailleurs à une distance de CIGEO supérieure à celles des événements considérés ci-dessus pour le dimensionnement des installations.



## **5. Recommandations pour le redémarrage du soutirage du gaz résiduel**

### **5.1. ALÉA SUBSIDENCE ET DÉFORMATIONS DU SOL**

Le calcul présenté au chapitre 2 indique un taux maximum de déformation, au-dessus du réservoir et résultant de l'extraction passée, de 0,7 mm/an. Cette valeur maximum était en limite de détectabilité avec les outils satellitaires de l'époque, en l'occurrence la mission ERS 1-2 pour les résultats présentés dans le rapport STORENGY. Ceci peut expliquer que le phénomène n'ait pas été observé.

L'archive temporellement dense d'une acquisition tous les 6 jours avec une continuité sur plusieurs décennies, envisagée par l'ESA (Agence Spatiale Européenne) des missions Sentinel-1, devrait pouvoir améliorer significativement cette capacité de détection des faibles mouvements.

Des mesures au sol (type campagne de nivellement annuelle) peuvent par ailleurs compléter cette information. Nous préconisons de surveiller régulièrement la subsidence autour du réservoir exploité, dans un rayon de 5-10 km. Nous insistons sur le fait que les points de référence des mesures doivent être choisis suffisamment loin, afin de garantir qu'ils ne soient pas affectés par la subsidence.

### **5.2. ALÉA SISMIQUE**

Les éléments exposés dans le chapitre 1 montrent que le développement d'une sismicité induite est très probable sur le site de Trois-Fontaines-l'Abbaye, dans le cadre de la modification des conditions d'exploitation du stockage souterrain, quel que soit le scénario retenu.

Dès lors, il paraît essentiel d'assurer une surveillance microsismique accrue du site. Pour cela, la réalisation d'une étude de conception d'un réseau microsismique dédié couvrant l'ensemble du périmètre du stockage et ses abords permettrait de définir des critères de détection et de localisation des petits événements sismiques, en fonction du nombre et de la géométrie des stations composant le réseau. Ce type d'information est essentiel pour détecter d'éventuels microséismes et suivre leur évolution (nombre et énergie) et leur éventuelle migration au sein des structures tectoniques principales.

Cette surveillance sismique et les résultats qui en découlent constituent un élément de pilotage essentiel de l'exploitation sur la base de critères et de seuils à définir, en concertation avec l'ensemble des parties prenantes.



## 6. Conclusions

Sur la base des documents fournis par STORENGY, le BRGM a expertisé l'incidence sous-sol de reprise du soutirage sur le site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye portant sur deux phénomènes :

- la subsidence ;
- la sismicité induite.

Il apparaît que les études géomécaniques confirment la très faible tendance à la subsidence (0,7 mm / an). Les résultats de l'étude d'interférométrie radar montrent que seuls deux secteurs semblent affectés par une subsidence significative (15 cm en 6 ans, soit 2,5 cm / an). L'analyse rapide des zones touchées montre qu'elles se trouvent dans une zone de champs, sensible aux modifications de surface liées à l'exploitation agricole (labours, semis...) et que leur faible extension (quelques centaines de mètres) ne permet pas de dégager une tendance nette à l'échelle du site.

L'aléa sismique est très faible dans cette région. Cependant, une sismicité induite semble s'être développée en janvier 2017. Un doute existe également sur l'événement du 16 octobre 1992 qui pourrait être rattaché au début de la période d'exploitation la plus forte, sachant que les capacités de détection et les incertitudes de localisation étaient importantes à cette période. L'hypothèse d'un déclenchement de l'événement par les variations du niveau de la d'eau du Der-Chantecoq lors de vidange est possible, même si elle reste peu probable compte tenu de la faible hauteur d'eau (7 mètres).

Les modélisations de pression réalisées dans les différents blocs et compartiments du site au niveau des puits de surveillance et d'exploitation par STORENGY permettent d'estimer les situations passées, actuelles et futures des débits, pressions et différences de pression entre les blocs nord-est et les blocs sud-ouest séparés par la faille bordière orientale de la Marne.

Il en ressort que les débits annuels de soutirage envisagés pour les scénarios de base et maximal sont inférieurs en moyenne à ceux observés pendant la période d'exploitation entre 1984 et 2006. La situation initiale du stockage était à l'équilibre avec une pression à 175 bars de part et d'autre de la Faille de la Marne. À la fin de l'exploitation en 2006, c'est-à-dire en situation actuelle, une différence de pression de l'ordre de 35 à 60 bars s'est créée par rapport à la situation équilibrée initiale à 175 bars. La surpression se trouve sur les compartiments nord-est.

Les scénarios de base et maximal vont encore augmenter cette différence de pression de l'ordre d'un facteur 2 avec une répartition hétérogène de cette différence de pression le long de la Faille. Des différences de pression pouvant dépasser les 100 bars en réservoir – valeur limite à ne pas dépasser réglementairement en France en géothermie profonde en tête de puits – pourraient déstabiliser mécaniquement les roches et engendrer une sismicité induite. Ceci est d'autant plus probable qu'une sismicité induite s'est déjà produite sur le site.

**Nous recommandons pour l'aléa subsidence de vérifier régulièrement d'éventuelles déformations de surface, soit lors de campagnes de nivellement au sol, soit par une analyse interférométrique. Pour les deux types de méthode, il conviendra de s'assurer de choisir un point de référence en dehors de la zone d'affaissement probable identifiée par la modélisation géomécanique la plus représentative possible de la géométrie réelle du réservoir.**

**Nous recommandons pour l'aléa sismicité induite de procéder à la réalisation d'une étude de conception d'un réseau microsismique afin d'améliorer significativement les**

**capacités de détection et de localisation sur l'ensemble du site de Trois-Fontaines-l'Abbaye et ses abords.** Il est notamment conseillé de tester différents sites et d'installer ce réseau dès que possible afin d'établir un état initial du bruit de fond sismique, avant toute opération de redémarrage du soutirage. L'objectif de ce réseau microsismique est de contribuer au pilotage de l'exploitation du site en fonction de critères à définir avec les parties prenantes (exploitant, administration, expert).

Une analyse des conséquences potentielles sur le site CIGEO de l'ANDRA, à Bure, dans la Meuse, situé à une trentaine de kilomètres au sud-est du site STORENGY montre que :

- selon les modélisations géomécaniques réalisées par STORENGY et le BRGM, l'emprise maximale de la cuvette d'affaissement ne dépasse pas quelques kilomètres au-delà de la projection des contours du réservoir en surface ; Par conséquent, **toute incidence concernant l'aléa subsidence sur le site CIGEO de Bure est exclue** ;
- une sismicité induite existe sur le site STORENGY de Trois-Fontaines-l'Abbaye. Cette sismicité induite pourrait se réactiver et se développer lors de la reprise du soutirage. Il est alors possible, selon la magnitude et la localisation de ces événements que des mouvements sismiques soient perceptibles sur le site de CIGEO de Bure pendant la phase de construction (avant 2035) ou d'exploitation (après 2035). Cependant, **les mouvements sismiques générés par ces séismes induits devraient être très largement couverts par ceux pris en compte pour le dimensionnement des installations de CIGEO et pour le SMPP, considérés pour les approches de sûreté à long terme.**

## 7. Bibliographie

- Andra** (2005). Dossier 2005 Argile – Architecture and management of a geological disposal system – France. 495 p. <https://international.andra.fr>
- Burnol, A., H. Aochi, D. Raucoules, F. M. L. Veloso, F.; Koudogbo, P. Chiquet, and C. Maisons** (2019). Wavelet-based analysis of ground deformation coupling data from satellites (Sentinel-1, SMOS) and from shallow and deep wells in Southwestern France, *Sci. Reports*, 9:8812, doi:10.1038/s41598-019-45302-z.
- Cara M., Cansi Y., Schlupp A., Arroucau P., Bethoux N., Beucler E., Bruno S., Calvet M., Chevrot S., Deboissy A., Delouis B., Denieul M., Deschamps A., Doubre C., Frechet J., Godey S., Golle O., Grunberg M., Guilbert J., Haugmard M., Jenatton L., Lambotte S., Leobal D., Maron C., Mendel V., Merrer S., Macquet M., Mignan A., Mocquet A., Nicolas M., Perrot J., Potin B., Sanchez O., Santoire J.-P., Sebe O., Sylvander M., Thouvenot F., Van der Woerd J. and Van der Woerd K.** (2015). SI-Hex: a new catalogue of instrumental seismicity for metropolitan France. *Bull. Soc. géol. France*, t. 186, 1, 3-19.
- Delay J.** (2019) **ANDRA**. Synthesis of 20 years Research, Development and Demonstration in Andra's Underground Research Laboratory in Bure for Cigéo Project – France. 104 p., 6 Annexes. <https://international.andra.fr/>
- DeGolyer et MacNaughton** (2014) Report as of March 31, 2014 on Reserves of the Trois Fontaines Field in France for STORENGY.
- Dieterich J. H., Richards-Dinger K. B. & Kroll K. A.** (2015). Modeling injection-induced seismicity with the physics-based earthquake simulator RSQSim. *Seismological Research Letters* 86(4), 1102–1109. doi: 10.1785/0220150057
- Geertsma J.** (1973). A basic theory of subsidence due to reservoir compaction: the homogeneous case, *Trans. R. Dutch Soc. Geol. Min. Eng.* 28 (1973) 43–62.
- SisFrance** (2016) BRGM-EDF-IRSN. Histoire et caractéristiques des séismes ressentis en France métropolitaine et sur ses abords. [www.sisfrance.net](http://www.sisfrance.net)
- Thouvenot, F., Jenatton, L. et Gratier, J.-P** (2009). 200-m-deep earthquake swarm in Tricastin (lower Rhône Valley, France) accounts for noisy seismicity over past centuries, *Terra Nova*, 21, 2009, p. 203-210. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00875.x
- Wileveau Y., Cornet F.H., Desroches J., Blumling P.** (2007). Complete in situ stress determination in an argillite sedimentary formation. *Phys. Chem. Earth* 32 :866-878. doi:10.1016/j.pce.2006.03.018



**Centre scientifique et technique  
Direction Risques et Prévention**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34  
[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)